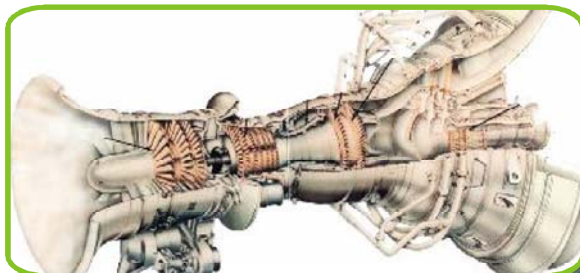


Basishandboek Warmtekrachtkoppeling



**COGEN
Vlaanderen
VZW**

Voor de
PROMOTIE VAN WKK
in Vlaanderen



INHOUD

1	DEFINITIE EN HISTORISCHE ONTWIKKELING VAN WARMTEKRACHTKOPPELING.....	9
1.1	Definitie.....	9
1.2	Situering.....	9
1.3	Troeven van warmtekrachtkoppeling	10
1.4	Historische ontwikkeling.....	11
2	WARMTEKRACHTKOPPELING IN VLAANDEREN.....	13
3	HEDENDAAGSE TECHNOLOGIEËN VOOR WARMTEKRACHTKOPPELING ..	16
3.1	Definities	16
3.1.1	Rendementsbepalingen	16
3.1.2	Bepalingen omtrent de brandstofbesparing.....	17
3.2	Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met stoomturbines.....	20
3.2.1	Basisconfiguraties van warmtekrachtkoppelinginstallaties met stoomturbines	20
3.2.2	Thermodynamische prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met stoomturbines	23
3.3	Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gasturbines	24
3.3.1	Gasturbinecycli.....	25
3.3.2	Thermodynamische prestaties van warmtekrachtinstallaties met gasturbines	27
3.4	Warmtekrachtinstallaties met zuigermotoren met inwendige verbranding	31
3.4.1	Types van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met zuigermotoren met inwendige verbranding	31
3.4.2	Thermodynamische prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met zuigermotoren met inwendige verbranding.....	36
3.5	Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gecombineerde cyclus.....	39
3.5.1	Installaties met gecombineerde Joule-Rankine cyclus	40
3.5.2	Installaties met gecombineerde Diesel-Rankine cyclus	42
3.6	Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met brandstofcellen	42
3.6.1	Fundamenteel werkingsprincipe van brandstofcellen.....	42
3.6.2	Types brandstofcellen.....	44
3.6.3	Thermodynamische prestaties van brandstofcellen	48
3.6.4	Toekomstperspectieven van brandstofcellen.....	48
3.7	Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met Stirlingmotoren.....	49
3.7.1	Basisprincipes van Stirlingmotoren	49
3.7.2	Configuraties van Stirlingmotoren.....	50
3.7.3	Ontwikkelingen in Stirling-technologie	52
3.7.4	Prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met Stirlingmotoren	53
3.8	Warmtekrachtinstallaties met microturbines.....	53
3.8.1	Werkingsprincipe van microturbines	53
3.8.2	Thermodynamische prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met microturbines	55
3.9	Warmtekrachtinstallaties met Organic Rankine Cycle.....	55
3.10	Samenvatting.....	57
4	KLASSIEKE TOEPASSINGEN VAN WARMTEKRACHTKOPPELING.....	58
4.1	Warmtekrachtkoppeling in de nutsvoorzieningssector	58
4.2	Warmtekrachtkoppeling in de industrie.....	59
4.3	Warmtekrachtkoppeling in de gebouwensector	61
4.4	Warmtekrachtkoppeling in de primaire sector.....	64
5	INPASSING EN AANSLUITING VAN WARMTEKRACHTKOPPELING	66
5.1	Inleiding.....	66

5.2	Elektrische inpassing	66
5.2.1	Eiland- en parallelbedrijf.....	67
5.2.2	Synchrone en asynchrone generatoren	68
5.2.3	Aandachtspunten inzake netkoppeling.....	69
5.3	Warmtetechnische inpassing	71
5.3.1	Opbouw van warmtesystemen - subsystemen.....	71
5.3.2	Inpassing van WKK	73
5.4	Gaszijdige aansluiting	75
6	TECHNISCHE DIMENSIONERING VAN WARMTEKRACHTKOPPELING	76
6.1	Belastingcurves.....	76
6.1.1	Belastingsprofielen	76
6.1.2	Belastingsduurcurven.....	81
6.1.3	Capaciteitsbelastingcurven.....	81
6.2	Werkingsmodes van WKK-systemen	82
6.3	Procedure voor het dimensioneren van een systeem.....	83
6.3.1	Eerste fase: analyse van de energievraag en de site	83
6.3.2	Tweede fase: selectie van technisch haalbare systemen.....	84
6.3.3	Derde fase: analyse van de financiële haalbaarheid.....	87
6.3.4	Vierde fase: gedetailleerd design	87
6.3.5	Vijfde fase: sensitiviteitsanalyse.....	88
7	ECONOMISCHE HAALBAARHEID VAN WARMTEKRACHTKOPPELING	90
7.1	Belangrijkste kosten bij warmtekrachtinstallaties	90
7.1.1	Investeringskost.....	90
7.1.2	Werkings- en onderhoudskosten	95
7.2	Belangrijkste opbrengsten bij warmtekrachtinstallaties	96
7.2.1	Geproduceerde energie	96
7.2.2	Subsidies	98
7.3	Definities van enkele economische begrippen.....	116
7.3.1	Economische Parameters.....	116
7.3.2	Maatstaven voor de economische prestatie.....	117
7.4	Procedure voor economische analyse	120
7.5	Enkele voorbeelden van de economische haalbaarheid van WKK in Vlaanderen	121
7.6	Economisch optimale uitbating van warmtekrachtinstallaties	124
7.6.1	Simulatie en prestatievoorspelling van systemen via modellen	125
7.6.2	Optimalisatie van de werking van WKK-systemen	127
8	IMPACT VAN WARMTEKRACHTKOPPELING	130
8.1	Impact op het brandstofverbruik.....	130
8.2	Impact op het productiepark voor elektriciteit.....	131
8.3	Impact op het milieu.....	132
8.3.1	Impact op de kwaliteit van lucht, water en bodem	132
8.3.2	Lawaai en trillingen	134
8.4	Impact van warmtekrachtkoppeling op de luchtkwaliteit	135
8.4.1	Uitlaatgasemissies	135
8.4.2	Emissiebalansen	145
8.5	Economische en sociale impact	150
9	ADMINISTRATIEVE ASPECTEN IN VERBAND MET WARMTEKRACHTKOPPELING.....	152
9.1	Vergunningen	152
9.2	Europese initiatieven met betrekking tot warmtekrachtkoppeling.....	152
9.2.1	Liberalisering van de elektriciteits- en gasmarkten.....	154
9.2.2	Richtlijn om WKK te promoten.....	154

9.2.3	Europees systeem van handel in emissierechten.....	156
10	UITBREIDINGEN OP HET KLASSIEKE CONCEPT VAN WARMTEKRACHTKOPPELING.....	158
10.1	Trigeneratie en absorptiekoeling.....	158
10.1.1	Algemeen werkingsprincipe van een koelmachine met dampen.	158
10.1.2	Werkingsprincipe van een absorptiekoelmachine	159
10.1.3	Gebruik van absorptiekoelmachines	161
10.1.4	Absorptiekoelmachines in combinatie met WKK: trigeneratie	162
10.1.5	Milieuvoordelen.....	163
10.1.6	Besluit	164
10.2	Warmtekrachtkoppeling met hernieuwbare energiebronnen	164
10.2.1	Allerlei biogassen.....	164
10.2.2	Vloeibare en vaste brandstoffen	167
10.2.3	Goede prestaties beloond?.....	168
	REFERENTIES	169

LIJST VAN FIGUREN EN TABELLEN

Figuur 1.1: Vergelijking van de brandstofbenutting en de verliezen bij gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit (rechts) en bij warmtekrachtkoppeling (links)	11
Figuur 2.1: Evolutie van het opgesteld vermogen aan warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen	14
Tabel 2.1: Opsplitsing van het potentieel aan warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen naar technologie	15
Figuur 2.2: Opsplitsing van het potentieel aan warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen naar sector	15
Figuur 3.1: Voorbeeld van de primaire energiebesparing bij het gebruik van warmtekrachtkoppeling (links) ten opzichte van gescheiden productie (rechts)	20
Figuur 3.2: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met tegendrukstoomturbine.....	21
Figuur 3.3: Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met condenserende stoomturbine.....	22
Figuur 3.4: Prestatiediagram van stoomturbines (Orlando 1996)	24
Figuur 3.5: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met gasturbine in open cyclus.....	25
Figuur 3.6: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met gasturbine in gesloten cyclus	27
Figuur 3.7: Effect van de drukverliezen van de gasstroming bij in- en uitlaat op de capaciteit van de turbine (Orlando 1996)	29
Figuur 3.8: Prestatiediagram voor gasturbines	29
Figuur 3.9: Effect van de inlaattemperatuur op het vermogen van een gasturbine	30
Figuur 3.10: Effect van de last en de inlaattemperatuur van de lucht op het elektrisch rendement van een gasturbine systeem.....	30
Figuur 3.11: Effect van de last en de inlaattemperatuur op de uitlaattemperatuur van het gas uit de turbine (Parameter van inlaattemperatuur T_a varieert van 5 tot 35°C)	31
Tabel 3.1: Methaangehalte van gasvormige brandstoffen	33
Tabel 3.2: Snelheid en vermogen van Dieselmotoren	33
Figuur 3.12: Werkschema van een warmtekrachtkoppelingsinstallatie met een zuigermotor met inwendige verbranding	34
Figuur 3.13: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met een tweefasig gekoelde motor (Waukesha)	35
Tabel 3.3: Voorbeelden van prestaties bij deellast voor warmtekrachtkoppelingen met een gasmotor	37
Figuur 3.14: Prestatiecurve van de zuigermotor met inwendige verbranding.....	38
Figuur 3.15: Warmtebalans van de zuigermotor met inwendige verbranding.....	39
Figuur 3.16: Joule-Rankine gecombineerde cyclus met tegendruk stoomturbine	40
Figuur 3.17: ASEA STAL gecombineerde cyclus met een condenserende stoomturbine/stoomturbine met aftap (IEA, 1988)	41
Figuur 3.18: Basisprincipe van een waterstof-zuurstof brandstofcel.....	43
Tabel 3: Voornaamste karakteristieken van de verschillende types brandstofcellen.....	44
Figuur 3.19: Basisprincipe van een MCFC	46
Figuur 3.20: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met SOFC voor toepassing in de tertiaire sector	47
Figuur 3.21: Hybride concept van een SOFC brandstofcel op druk met een gasturbine (Concept Westinghouse).....	48
Figuur 3.22: De ideale Stirlingcyclus (Urieli en Berchowitz, 1984).....	50
Figuur 3.23: Classificatie van Stirling motoren (Urieli en Berchowitz 1984).....	51
Figuur 3.24: Stirlingmotoren van het Alfa-type (SES 1993)	52
Figuur 3.25: Schematische voorstelling van een microturbine	54
Figuur 3.26: T,s-diagram van de rankine cyclus met water (links) en een organische vloeistof (rechts)	56
Tabel 3.5: Technische eigenschappen van een warmtekrachtkoppelingsinstallatie.....	57
Figuur 4.1: Belastingskarakteristieken van industriële processen (Belding 1982)	60

Figuur 4.2: Kracht-warmte verhouding in functie van de werkingsduur van industriële processen (Belding 1982).....	61
Tabel 4.1: Typische elektrisch vermogen in gebouwen.....	62
Figuur 4.3: Gestandaardiseerde verpakte cogeneratie-unit Fiat TOTEM 15 kW.....	63
Figuur 4.4: Hoofdcomponenten van een kleinschalige verpakte cogeneratie-unit met zuigermotor. (Jennekens 1989)	64
Figuur 5.1: Principe-indeling van een warmtesysteem voor gebouwenverwarming (Belcogen, 2004).....	72
Figuur 5.2: Koppeling productie-distributie (WB: warmtebron, WA: warmteafnemer).....	73
Figuur 6.1: Elektrische vermogenprofielen per uur voor typische dagen in de winter, tussenseizoen en zomer in een hotel.	79
Figuur 6.2: Thermisch vermogenprofielen per uur (ruimteverwarming en warm water) voor typische dagen in de winter, tussenseizoen en zomer in een hotel.	79
Figuur 6.3: Profielen van weekdagen in een ziekenhuis per seizoen. (Orlando 1996).....	80
Figuur 6.4: Profielen van weekenddagen in een ziekenhuis per seizoen. (Orlando 1996)	80
Figuur 6.5: Voorbeeld van belastingsduurcurven (Jennekens 1989).....	81
Figuur 6.6: Voorbeeld van een capaciteitsbelastingcurve voor één maand (Orlando 1996).....	82
Figuur 6.7: Jaarbelastingsduurcurve (boven) en productiecurve (onder).....	85
Figuur 6.8: Belastingsduur curve en verscheidene generatoren (Orlando 1996)	87
Tabel 7.1: Indeling van de investeringskosten voor een kleinschalige warmtekrachtkoppeling [Jennekens, 1989].....	92
Tabel 7.2: Voorbeelden van een indeling van investeringskosten voor een warmtekrachtkoppeling met een gasturbine en een stoomturbine [Belding, 1982].....	92
Figuur 7.1: Specifieke investeringskost van kleinschalige warmtekrachtkoppelingssystemen met zuigermotor met interne verbranding.	93
Figuur 7.2: Specifieke investeringskost van warmtekrachtkoppelingssystemen met Dieselmotor. .	94
Figuur 7.3: Specifieke investeringskost van middelgrote- tot grootschalige warmtekrachtkoppelingssystemen.	94
Tabel 7.3: Onderhoudskosten voor warmtekrachtkoppelingssystemen.	96
Figuur 7.4: Basisprincipes certificatensysteem	100
Tabel 7.4: Europees vastgelegde rendementen voor de referentiecentrale voor elektriciteitsproductie, in functie van de aangewende brandstof en het jaar van indiening	105
Tabel 7.5: Europees vastgelegde correctiefactoren voor het elektrisch referentierendement in functie van de aansluitspanning	106
Tabel 7.6: Europees vastgelegde rendementen voor de referentieketel voor warmteproductie, in functie van de aangewende brandstof en de warmtevorm.....	106
Figuur 7.5 : Verloop van het aantal inleverbare certificaten in de tijd; voorbeeld voor een gasmotor	107
Tabel 7.7: Emissiefactoren van brandstoffen zoals gehanteerd in het Waalse certificatensysteem.	110
Figuur 7.6: Berekeningsprincipe groene certificaten in Wallonië, bron CWaPE.....	111
Figuur 7.7: Berekeningsprincipe groene certificaten in Wallonië (2), bron CWaPE.....	112
Figuur 7.8: Berekeningsprincipe groene certificaten in Brussel.....	113
Figuur 7.9: Maximale steun, in €/MWh geproduceerde elektriciteit, in de drie Belgische regio's voor een gasturbine van 40 MWe met een elektrisch rendement van 40% en een thermisch rendement van 40%, gebaseerd op boetewaarden en uitgemiddeld over 10 jaar.	115
Figuur 7.10: Maximale steun, in €/MWh geproduceerde elektriciteit, in de drie Belgische regio's voor een gasmotor van 1 MWe met een elektrisch rendement van 35% en een thermisch rendement van 50%, gebaseerd op boetewaarden en uitgemiddeld over 10 jaar.	115

Figuur 7.11: Maximale steun, in €/MWh geproduceerde elektriciteit, in de drie Belgische regio's voor een dieselmotor van 1 MWe met een elektrisch rendement van 40% en een thermisch rendement van 42%, gebaseerd op boetewaarden en uitgemiddeld over 10 jaar.	116
Tabel 7.8: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een microturbine.....	121
Tabel 7.9: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een gasmotor	122
Tabel 7.10: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een gasmotor	123
Tabel 7.11: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een gasturbine	124
Figuur 8.1: Relatie tussen de relatieve primaire energie besparing (FESR) en de kracht-warmteverhouding (PHR) voor verschillende warmtekrachtkoppelingstechnologieën (Belding 1989).....	130
Figuur 8.2: Impact van de totale brandstofbenuttigingsgraad op de emissie van vervuilende elementen (Belding 1982).....	132
Tabel 8.1: Typische eigenschappen van brandstoffen voor de berekening van CO ₂ -emissies.	137
Tabel 8.3: Typische waarden van de emissies van conventionele elektriciteitscentrales.....	139
Tabel 8.4: Typische waarden van emissies van water- en stoomketels.....	140
Figuur 8.3: Invloed van de stoichiometrische luchtverhouding (λ) op NO _x , CO en HC-emissie, vermogen en rendement van een gasturbine (Jennekens 1989)	142
Figuur 9.4: De invloed van de stoechiometrische luchtverhouding (λ) op de omzetting van niet-selectieve katalytische reductie (Jennekens 1989).....	144
Tabel 8.5: Invloed van de NO _x -reductietechnieken [Jennekens, 1989].	147
Tabel 8.6: Voorbeelden van een globale emissiebalans: vergelijking van warmtekrachtkoppeling met de gescheiden productie van elektriciteit en warmte (resultaten per 100 kWh _e).....	148
Tabel 8.7 :Voorbeeld van een jaarlijkse globale en lokale emissiebalans van een warmtekrachtkoppelingssysteem met een gasmotor.....	149
Figuur 9.1: Cogeneratie als aandeel van de nationale vermogenproductie in EU landen in 1999	155
Figuur 10.1: Dampspanningscurve (links) en schematische voorstelling van een koelcyclus (rechts)	159
Figuur 10.2: Schema absorptiekoelmachine	160
Figuur 10.3: Schema houtvergassingsinstallatie met WKK (Bron: Xylowatt sa, http://www.xylowatt.com).....	165

1 DEFINITIE EN HISTORISCHE ONTWIKKELING VAN WARMTEKRACHTKOPPELING

1.1 Definitie

Cogeneratie of warmtekrachtkoppeling kan gedefinieerd worden als volgt:

Cogeneratie is het thermodynamisch sequentieel produceren van twee of meer nuttige energievormen uitgaande van één enkele primaire energiebron.

De twee meest voorkomende energievormen zijn mechanische en thermische energie, waarbij de mechanische energie meestal gebruikt wordt om een elektrische generator aan te drijven. Dat verklaart ook de naam warmtekrachtkoppeling (WKK) en de daarbij aansluitende definitie, die vaak in de literatuur voorkomt:

Warmtekrachtkoppeling is de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische) en nuttige thermische energie, uitgaande van dezelfde primaire energiebron.

De geproduceerde mechanische energie kan echter ook gebruikt worden om hulpapparatuur aan te drijven, zoals compressoren en pompen. Voor wat de geproduceerde thermische energie betreft, kan deze zowel gebruikt worden voor verwarming als voor koeling. Koeling kan gerealiseerd worden door een absorptiekoelmachine, die kan aangedreven worden door heet water, stoom of hete gassen.

1.2 Situering

De gebruikelijke (conventionele) manier om te voldoen aan de behoefte aan warmte en elektriciteit, is elektriciteit aankopen uit het lokale net, en warmte genereren door een brandstof te verstoffen in een verwarmingsketel, een stoomketel, enz. Er kan echter een aanzienlijke daling in het brandstofverbruik bekomen worden wanneer warmtekrachtkoppeling wordt toegepast.

Bij conventionele elektriciteitscentrales worden immers grote hoeveelheden warmte geloosd in de atmosfeer zowel via de koelcircuits (stoomcondensators, koeltorens, waterkoelers in diesel- of ottomotoren,...) als via de uitlaatgassen. Het grootste deel van deze warmte zou kunnen gerecupereerd worden en gebruikt worden om aan de warmtevraag te voldoen, op voorwaarde dat de warmte in de nabijheid van de centrale zou kunnen gebruikt worden. Op deze manier kan de brandstofbenutting stijgen van 30-55% bij een klassieke elektriciteitscentrale, tot 80-90% bij een warmtekrachtkoppelingssysteem.

Dergelijke waarden voor de totale brandstofbenutting zijn vergelijkbaar met deze van klassieke warmteproductie.. Echter, niet alle vormen van energie zijn gelijkwaardig, en brandstofbenuttigingsgraden kunnen dus niet zomaar worden vergeleken.

De kwaliteit van een energievorm wordt mede bepaald door de mate waarin die energievorm kan worden omgezet in andere energievormen. Elektriciteit is volledig omzetbaar in andere energievormen, en heeft dus een hoge kwaliteit. Voor warmte neemt de omzetbaarheid in andere energievormen, en dus de kwaliteit, af met de temperatuur. In de thermodynamica gebruikt men ook het begrip 'exergie' om de kwaliteit van een energievorm aan te duiden.

Conventioneel wordt warmte geproduceerd door een brandstof te verstoffen in boilers, fornuizen of ketels, die dicht bij de gebruiker gesitueerd zijn. De warmte wordt echter meestal

geproduceerd op een niet al te hoge temperatuur. Dit betekent dat een energievorm van hoge kwaliteit (brandstof) wordt omgezet in een energievorm van lage kwaliteit (warmte op lage temperatuur), die slechts in beperkte mate kan omgezet worden in andere energievormen. We kunnen dus concluderen dat de energieverliezen bij gescheiden warmteproductie beperkt zijn, maar dat er wel aanzienlijk kwaliteitsverliezen of exergieverliezen zijn. In het kader van een zo efficiënt mogelijke benutting van brandstoffen is dit uiteraard een pijnlijke zaak, gezien kostbare exergie verloren gaat.

Bij warmtekrachtkoppeling wordt de hoogwaardige energie (warmte op hoge temperatuur) die vrijkomt bij het verbranden van de brandstof eerst gebruikt voor het produceren van mechanische energie, die meestal via een alternator wordt omgezet in elektriciteit. Hierna blijft laagwaardige restwarmte over, en deze wordt dan gebruikt om warmte te produceren voor een bedrijf, een ziekenhuis, ... Men kan dus stellen dat een WKK een slimme manier is om warmte te produceren, waarbij een veel hoger exergetisch rendement bekomen wordt.

Een warmtekrachtkoppelinginstallatie wordt dan ook bij voorkeur op de warmtevraag gedimensioneerd. De elektriciteitsopwekking wordt hierbij gebruikt om de warmte op de gewenste temperatuur te produceren, en zorgt daardoor voor minder exergieverlies en voor een meer rationeel energiegebruik.

Er bestaan verschillende technologieën om het bovenstaande principe van gecombineerde productie van elektriciteit en warmte te realiseren. Elke technologie heeft zijn specifieke toepassingsgebieden. De meest courante uitvoeringsvormen zijn de stoomturbine, de gasturbine en de inwendige verbrandingsmotor, die zowel gas als diesel als brandstof kan hebben. Daarnaast staan microturbines op de rand van een marktdoorbraak, en wordt onderzoek verricht naar nieuwe technologieën, zoals Stirlingmotoren, brandstofcellen en Organic Rankine Cycles.

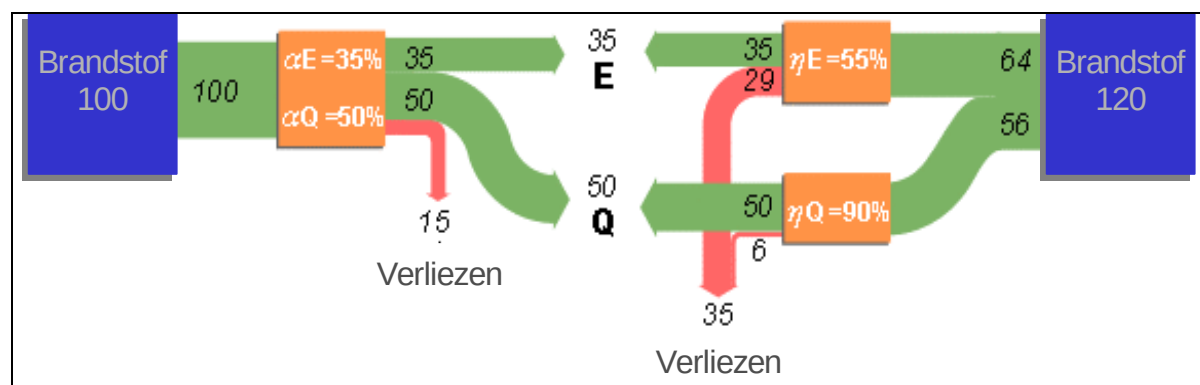
1.3 Troeven van warmtekrachtkoppeling

Het grote voordeel aan warmtekrachtkoppeling is dus dat bij een gezamenlijke opwekking van warmte en elektriciteit de in de brandstof aanwezige energie veel beter wordt benut. Hierdoor is bij cogeneratie beduidend minder brandstof nodig dan bij een gescheiden productie van een zelfde hoeveelheid warmte en elektriciteit. Zoals bekend zijn de reserves aan fossiele brandstoffen eindig, en dienen we er dus zuinig mee om te springen. In dit opzicht is warmtekrachtkoppeling natuurlijk een interessante techniek. De meeste WKK's werken op fossiele brandstoffen, maar het is ook mogelijk om hernieuwbare energiebronnen als brandstof te gebruiken, denken we maar aan biomassa of biogas. Een dergelijke uitvoering biedt een dubbel voordeel: er wordt niet alleen een milieuvriendelijke brandstof gebruikt, maar deze wordt bovendien optimaal benut. Een vergelijking tussen warmtekrachtkoppeling en gescheiden productie van warmte en elektriciteit vanuit het oogpunt van brandstofbenutting is weergegeven in figuur 1.1. De gebruikte cijfers zijn typische waarden.

Minder brandstofverbruik houdt bovendien ook in dat de CO₂-uitstoot en de uitstoot van andere schadelijke stoffen (roet, NO_x, SO₂, CO, ...) in belangrijke mate gereduceerd wordt. De vermelde stoffen komen in steeds hogere concentraties voor in lucht, water en bodem. De impact ervan op leefmilieu, atmosfeer en klimaat is aanzienlijk, denk maar aan het broeikaseffect en de ozonproblematiek. Het protocol van Kyoto bepaalt dat de uitstoot van broeikasgassen, waarvan CO₂ het belangrijkste is, voor de periode 2008-2012 met 5% gereduceerd dient te worden ten opzichte van het referentiejaar 1990. Europa gaat een stapje verder, hetgeen er voor België op

neerkomt dat een daling van 7,5% gerealiseerd moet worden voor wat betreft de uitstoot van broeikasgassen. Warmtekrachtkoppeling kan hier een bijdrage leveren, maar het spreekt voor zich dat ook andere maatregelen nodig zijn.

Een toename van het aantal warmtekrachtkoppelingsinstallaties zorgt er bovendien voor dat de elektriciteitsproductie wat opschuift van een sterk centrale productie naar een meer gedecentraliseerde productie. Een dergelijke decentrale productie veroorzaakt minder transportverliezen, en maakt een klant minder afhankelijk van één centrale, waardoor de beschikbaarheid van elektrische energie vergroot.



Figuur 1.1: Vergelijking van de brandstofbenutting en de verliezen bij gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit (rechts) en bij warmtekrachtkoppeling (links).

1.4 Historische ontwikkeling

Warmtekrachtkoppeling werd voor het eerst toegepast rond 1890 in Europa en de V.S. Gedurende het begin van de 20ste eeuw maakten de meeste industrieën hun eigen elektriciteit met kolengestookte stoomketels en stoomturbines. Veel bedrijven gebruikten de uitlaatstoom voor hun industriële processen. Er wordt geschat dat in het begin van de 20^{ste} eeuw in de V.S. meer dan 58% van de decentraal in de industrie geproduceerde elektriciteit via cogeneratie werd aangemaakt.

Toen grote elektriciteitscentrales werden gebouwd en een betrouwbaar elektriciteitsnet werd uitgebouwd, daalde de prijs van de elektriciteit en kochten vele industrieën hun elektriciteit aan in plaats van die zelf te produceren. Daardoor daalde het aandeel van industriële warmtekrachtkoppeling in de totale productiecapaciteit aan elektriciteit van 15% in 1950 tot ongeveer 5% in 1974.

Andere factoren die bijdragen tot de achteruitgang van industriële warmtekrachtkoppeling waren de toenemende reglementering inzake elektriciteitsopwekking, de lage energiekosten (die slechts een klein percentage bedroegen van de totale kosten in de industrie), de technologische ontwikkelingen op gebied van boilers en ketels, de beschikbaarheid van vloeibare en vaste brandstoffen aan lage prijzen, en de steeds strenger wordende milieuvorschriften.

Na de eerste spectaculaire toename van de brandstofkosten in 1973, begon er een kentering te komen in de hiervoor vermelde trend. Systemen die efficiënt werken en alternatieve brandstoffen kunnen gebruiken, werden steeds belangrijker in het licht van prijsstijgingen en onzekerheid van brandstofbevoorrading. Naast een potentieel verminderd brandstofverbruik, leidt warmtekracht zoals gezegd ook tot een reductie van schadelijke emissies en een vermindering van de uitstoot

van broeikasgassen. Omwille hiervan werken de Europese, Amerikaanse en Japanse overheden mee aan een toename van het gebruik van warmtekrachtkoppeling. Er zijn drie belangrijke methoden om het gebruik van warmtekrachtkoppeling aan te moedigen: (i) wettelijke verplichtingen of vrijstelling van wettelijke verplichtingen, (ii) financiële stimulansen ondermeer door het invoeren van verhandelbare certificaten, en (iii) financiële steun voor onderzoek en ontwikkeling. De evolutie van warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen tijdens de jongste jaren, niet alleen in de industrie maar ook in andere sectoren, wordt uitgebreid behandeld in een apart hoofdstuk.

Onderzoek, ontwikkeling en demonstratieprojecten gerealiseerd gedurende de laatste 25 jaar, leidden ook tot een significante verbetering van de technologie, die nu sterk ontwikkeld en betrouwbaar is. Ook aan de technologie van warmtekrachtkoppeling wordt een hoofdstuk gewijd.

2 WARMTEKRACHTKOPPELING IN VLAANDEREN

Warmtekrachtkoppeling is het interessantst in bedrijven die nood hebben aan de twee energievormen (warmte en elektriciteit) tegelijkertijd. Een warmtevraag is essentieel; een eventueel overschot aan elektriciteit kan ook in het net geïnjecteerd worden. Voor bedrijven die hieraan voldoen, kan warmtekrachtkoppeling een aanzienlijke besparing op de energiefactuur realiseren. Omwille daarvan werden in het verleden reeds een respectabel aantal installaties gerealiseerd. In Vlaanderen waren de jaren '90 een echte bloeiperiode voor warmtekrachtkoppeling. Een hoge investeringskost en voor WKK ongunstige prijzen van gas en elektriciteit zorgden er echter voor dat het bestaande potentieel nog niet volledig is ingevuld. Steunmaatregelen moeten hierin verandering brengen.

Sommige industriële sectoren hebben een behoefte aan zowel warmte als elektriciteit, en zijn dan ook potentieel geschikt voor warmtekrachtkoppeling. We denken hierbij dan in de eerste plaats aan de grotere industrie: raffinaderijen, chemie, petrochemie, papier, voeding, textiel en metaalverwerking. Toch zijn er ook op kleinere schaal zeer interessante toepassingen voor WKK, zoals in de tuinbouw, in ziekenhuizen, zwembaden, recreatiecentra, woningcomplexen, ...

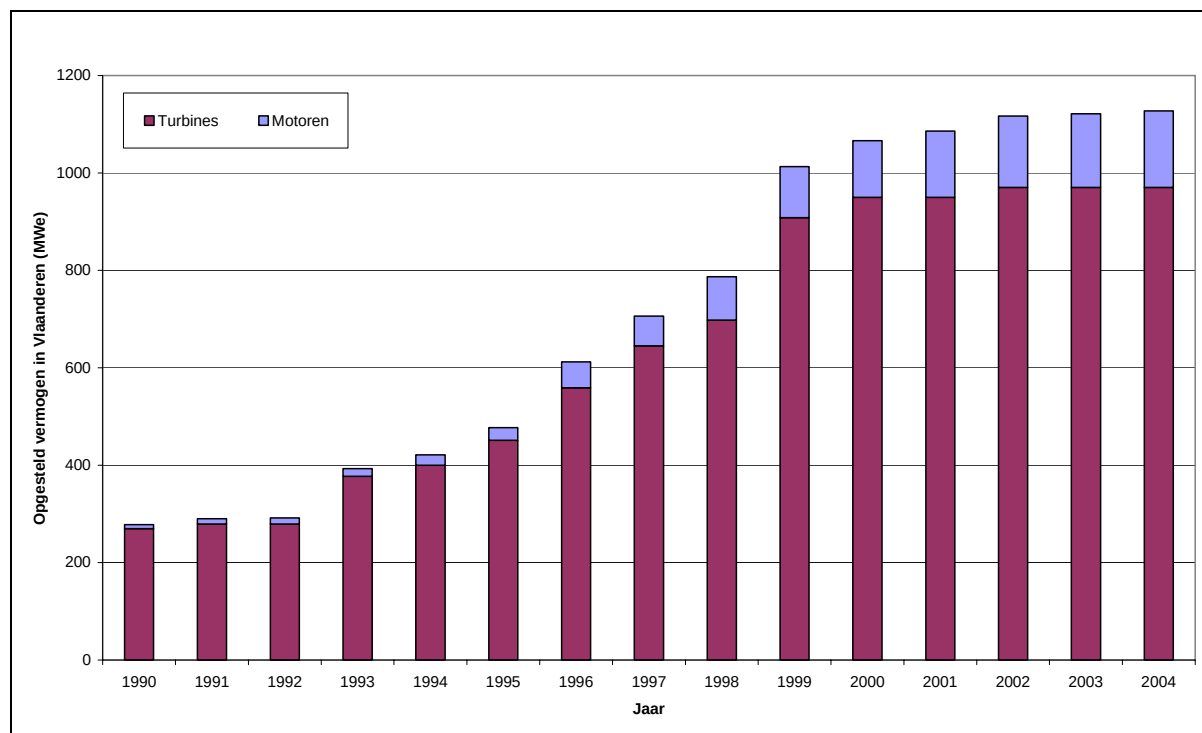
Voor 1990 werden in Vlaanderen vooral (tegendruk)-stoomturbines geplaatst voor WKK-toepassingen, bijvoorbeeld in de voedingsindustrie. Tijdens de bloeiperiode van de jaren '90 werden behoorlijk wat gasturbines (in de grote industrie) en motoren (voor toepassingen met kleiner vermogen) gebouwd. De eerste vier tot vijf jaren van het derde millennium waren daarentegen eerder zwarte jaren, en er werden nog weinig nieuwe projecten gerealiseerd. De liberalisering van de energiemarkten, een stijgende gasprijs, en het aanslepen van de invoering van een certificatiesysteem om WKK economisch interessanter te maken, zijn de belangrijkste oorzaken daarvan. Nu de turbulente periode van het vrijmaken van de energiemarkten grotendeels achter de rug is, en de regelgeving inzake certificaten definitief is goedgekeurd en in het Staatsblad is verschenen, wordt verwacht dat er opnieuw meer investeringen in warmtekrachtkoppeling zullen gebeuren, en dat het bestaande potentieel aldus gerealiseerd kan worden.

VITO inventariseert sinds 1990 het opgesteld elektrisch vermogen aan warmtekrachtkoppeling met gasturbines en motoren in Vlaanderen. Sinds 2002 werd deze inventaris uitgebreid met stoomturbines, en werden ook het thermisch vermogen, en waar mogelijk, de energieproductiecijfers mee opgenomen. Een evolutie van het opgesteld vermogen wordt getoond in figuur 2.1. Uit de inventarisatie blijkt verder dat momenteel (begin 2004) in Vlaanderen een geïnstalleerd vermogen te vinden was van 151 MW aan motoren, 592 MW aan gasturbines, en 377 MW¹ aan al dan niet netgekoppelde stoomturbines. Bij niet-netgekoppelde stoomturbines gaat het meestal om tegendrukstoomturbines waarvan de draaiende beweging niet via een alternator in elektriciteit wordt omgezet, maar direct wordt gebruikt om bijvoorbeeld een compressor aan te drijven.

Bekijken we de kwalitatieve warmtekrachtinstallaties, dus de installaties die een relatieve primaire-energiebesparing realiseren van minstens vijf procent ten opzichte van de best beschikbare

¹ Hierbij werd de elektriciteitscentrale van Mol buiten beschouwing gelaten. Deze centrale is voorzien van een aftap om een lokale warmtevraag te dekken, en kan als dusdanig als WKK beschouwd worden. Deze aftap is echter zo beperkt, dat men deze centrale meestal niet mee opneemt in de statistieken, om vertekening van de situatie te voorkomen

technieken voor gescheiden productie, dan zien we dat het merendeel van de motoren, gasturbines en niet-netgekoppelde stoomturbines aan de kwaliteitseis voldoet. De netgekoppelde stoomturbines halen hier de minst goede resultaten. De opgestelde elektrische vermogens aan kwalitatieve warmtekrachtkoppeling bedragen ongeveer 135 MW voor motoren, 570 MW voor gasturbines en 218 MW voor stoomturbines. Gemiddeld halen al deze kwalitatieve WKK's een relatieve primaire-energiebesparing van ongeveer 15%.



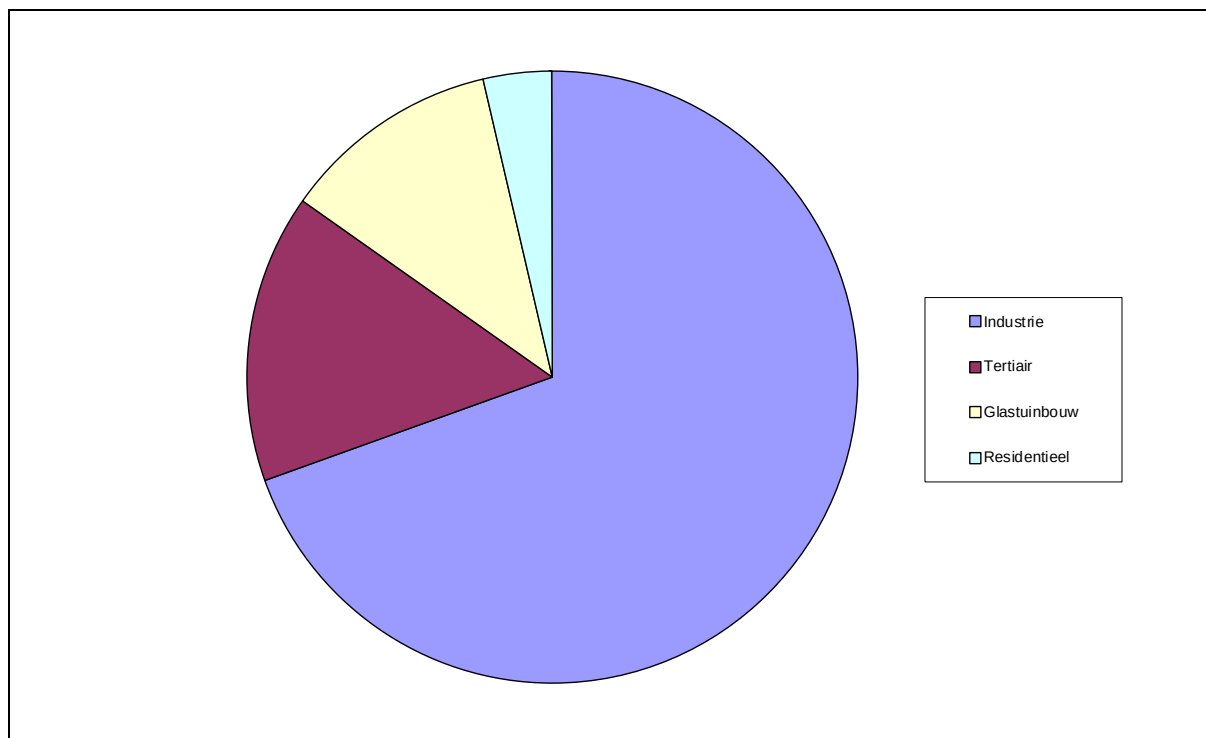
Figuur 2.1: Evolutie van het opgesteld vermogen aan warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen

In 1997 werd door VITO, in samenwerking met Institut Wallon, ook het energetisch potentieel van warmtekrachtkoppeling in België bepaald. Laborelec en Electrabel maakten op basis van dit energetisch potentieel en een marktbevraging een raming van het economisch potentieel. Dit ligt een flink stuk lager dan het energetisch potentieel, omdat een deel daarvan niet gerealiseerd wordt omwille van allerlei barrières. De resultaten van deze studie voor Vlaanderen worden weergegeven in Tabel 2.1. Een invulling van het volledig economisch potentieel met kwalitatieve warmtekrachtkoppeling tegen 2012, hetgeen precies de doelstelling is van de Vlaamse Overheid, kan ertoe leiden dat ongeveer 20% van de in Vlaanderen verbruikte elektriciteit met Vlaamse WKK's kan opgewekt worden. Dit cijfer hangt natuurlijk ook af van de evolutie van het elektriciteitsverbruik. Een lichte jaarlijkse toename van het elektriciteitsverbruik wordt hierbij als realistisch aanzien.

Tabel 2.1: Opsplitsing van het potentieel aan warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen naar technologie

Toegepaste technologie	2003(kwalitatief)	2005	2012
Gasturbines	570	738	1207
Motoren	135	285	340
Stoomturbines netgekoppeld	90	155	185
Stoomturbines niet netgekoppeld	128	100	100
Totaal	923	1278	1832

Van dit potentieel situeert het overgrote deel zich in de industrie, zoals blijkt uit Figuur 2.2. Ook de tertiaire sector en de (glas-)tuinbouw nemen een aanzienlijk deel voor hun rekening, terwijl het aandeel van de residentiële sector erg beperkt blijft. Binnen de industriële sector liggen de meeste opportuniteiten bij de chemie (41%), de voeding (15%), de raffinaderijen (11%) en de papier- en kartonindustrie (8%). Voor wat de tertiaire sector betreft, spreken we vooral over toepassingen in kantoren (41%), ziekenhuizen (21%) en scholen (12%). Het potentieel in de tuinbouw situeert zich voor driekwart in de groententeelt, waarbij vooral de tomatenteelt interessante mogelijkheden biedt; het andere kwart ligt in de sierteelt (kasplanten en snijbloemen). Voor de tuinbouw is het voorts vermeldenswaardig dat de rookgassen van de warmtekrachtinstallatie ook in de serre kunnen gebracht worden, en op die manier gebruikt worden als CO₂-bemesting voor de planten. Hierbij is dan echter wel een rookgasreiniging nodig, om de rookgassen te ontdoen van andere stoffen, die schadelijk zijn voor de planten.

**Figuur 2.2: Opsplitsing van het potentieel aan warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen naar sector**

3 HEDENDAAGSE TECHNOLOGIEËN VOOR WARMTEKRACHTKOPPELING

3.1 Definities

Vooraleer over te gaan tot de beschrijving van de verschillende technologieën die gebruikt worden voor warmtekrachtkoppeling, is het noodzakelijk enkele parameters te definiëren, die de thermodynamische prestaties van een warmtekrachtinstallatie aangeven, en de vergelijking van een aantal alternatieve technologieën te vergemakkelijken. In de literatuur is een zeer grote verscheidenheid aan dergelijke parameters weer te vinden. Hierna worden enkele hiervan toegelicht.

3.1.1 Rendementsbepalingen

Mechanisch rendement van de krachtbron (vb gasturbine, dieselmotor, stoomturbine):

$$\eta_m = \frac{P_s}{H_f} = \frac{P_s}{w_f \cdot H_u} \quad (3.1)$$

P_s : asvermogen van de krachtbron (Watt)

H_f : Brandstofvermogen verbruikt in het systeem : $H_f = w_f \cdot H_u$ (3.2)

w_f : massadebiet van de brandstof (kg/s)

H_u : onderste verbrandingswaarde van de brandstof (Joule/kg)

Elektrisch rendement:

$$\eta_e = \frac{P_e}{H_f} = \frac{P_e}{w_f \cdot H_u} \quad (3.3)$$

P_e : het netto elektrisch vermogen geleverd door het systeem (Watt). Met “netto” vermogen bedoelt men het bruto vermogen van de generator verminderd met het vereiste vermogen voor de hulpapparatuur en hulpsystemen

Thermisch rendement:

$$\eta_h = \frac{P_q}{H_f} = \frac{P_q}{w_f \cdot H_u} \quad (3.4)$$

P_q : Het nuttig thermisch vermogen geleverd door het warmtekrachtkoppeling systeem(Watt)

Totale brandstofbenutting van de WKK:

$$\eta_{WKK} = \eta_e + \eta_h = \frac{P_e + P_q}{w_f \cdot H_u} \quad (3.5)$$

Het begrip ‘totale brandstofbenutting’ wordt tot op heden algemeen gebruikt. Echter, in sommige gevallen kan een vergelijking tussen twee systemen gebaseerd op de brandstofbenutting misleidend zijn. Warmte heeft immers, zoals reeds vermeld, een lagere kwaliteit dan elektriciteit, en deze kwaliteit neemt af naarmate de temperatuur waarop deze

warmte beschikbaar is lager wordt. Zo bezit stoom een merkelijk hogere kwaliteit dan warm water. Ten gevolge hiervan kan men stellen dat het niet erg passend is om warmte en elektriciteit zomaar op te tellen, zoals gebeurt in (3.5). Om systemen op een thermodynamisch meer accurate manier te evalueren, en een eerlijker vergelijking te maken, moet men zich echter baseren op exergetische rendementen, zoals hierna gedefinieerd. Exergie is het deel van de energie dat in eender welke andere vorm van energie kan omgezet worden. Alle mechanische energie is exergie, terwijl warmte slechts een fractie $1 - T_0/T$ exergie bevat. Deze factor, die een bovengrens vastlegt van hoeveel warmte maximaal in arbeid kan omgezet worden, noemen we de Carnotfactor. De fractie energie die geen exergie is, noemen we anergie. Deze kan niet meer in exergie omgezet worden, en is dus duidelijk van mindere kwaliteit dan exergie².

Totaal exergetisch rendement:

$$\zeta_{WKK} = \frac{P_e + P_q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{E_f} \quad (3.6)$$

met:

E_f : exergieflux van de brandstof:

$$E_f = w_f \cdot \varepsilon_f \quad (3.7)$$

ε_f : specifieke exergie (exergie per massa-eenheid) van de brandstof.

Tenslotte kunnen we ook nog aangeven wat de verhouding is tussen de geproduceerde hoeveelheid warmte en de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit van een warmtekrachtinstallatie.

Kracht-warmte verhouding:

$$PHR = \frac{P_e}{P_q} \quad (3.8)$$

Het dient opgemerkt te worden dat de kracht-warmteverhouding één van de belangrijkste karakteristieken is bij de keuze van een warmtekrachtkoppeliningsinstallatie voor een bepaalde toepassing.

3.1.2 Bepalingen omtrent de brandstofbesparing

3.1.2.1 Hypothesen

Wanneer men energiebesparing wil kwantificeren voor WKK technologieën, is het nodig een referentietechnologie te definiëren voor de gescheiden productie van enerzijds elektriciteit en anderzijds warmte. Deze referentietechnologieën voor de productie van elektriciteit en warmte verschillen merkelijk van land tot land, maar het is logisch dat men zich hiervoor steeds baseert op de best beschikbare technologieën in het land in kwestie.

Voor de centrale elektriciteitsproductie in België kan een aardgasgestookte gecombineerde cyclus (een combinatie van een gasturbine en een stoomturbine, waarbij de stoom geproduceerd wordt door benutting van de warmte van de uitlaatgassen van de gasturbine) als best beschikbare

² Meer informatie over exergie en exergetische analyses is te vinden in de gespecialiseerde literatuur, zoals Kotas (1995), Bejan et al. (1996).

technologie aangenomen worden. Op dit ogenblik is een elektrisch rendement van 55% realistisch en haalbaar.

Voor WKK toepassingen, met installatie en verbruik van elektriciteit en warmte dicht bij de verbruiker, mag men aannemen dat de transportverliezen op het hoogspanningsnet en de distributienetten ongeveer 5% bedragen, zodat men een referentie rendement voor elektriciteit (η_{eR}) op de plaats van de verbruiker van 50% mag aannemen.

De referentietechnologie voor warmteproductie zijn hoogwaardige stoomketels of verwarmingstoestellen. Het rendement van deze installaties hangt af van het warmtemedium (stoom, water,...) en van de temperatuur waarop de warmte gevraagd wordt. Typische waarden voor het thermisch referentierendement (η_{qR}) situeren zich rond 85-90%.

3.1.2.2 Tijdsaspecten

In de hiervoor vermelde definities werden elektrisch, thermisch en brandstofvermogen gebruikt, dus energie per tijdseenheid, hetgeen resulteert in waarden voor de rendementsbepalingen die slechts op een bepaald ogenblik of bij een gegeven belasting gelden. Alle voorgaande uitdrukkingen zijn echter ook geldig als het vermogen wordt vervangen door energie per vooraf gedefinieerde tijdsperiode. Op deze manier worden eigenlijk geïntegreerde waarden voor de rendementen bekomen, die de prestaties van het systeem over de beschouwde tijdsperiode weergeven. Bijvoorbeeld, (3.5) kan herschreven worden als:

$$\eta_{WKK,a} = \frac{E + Q}{F} \quad (3.5)_a$$

met:

- E : de elektrische energie geproduceerd door de WKK-installatie gedurende een jaar,
- Q : de thermische energie, of warmte, geproduceerd door de WKK gedurende een jaar,
- F : de brandstofenergie verbruikt door de WKK gedurende een jaar.

Aldus geeft (3.5)_a de totale brandstofbenutting van de warmtekrachtkoppeliningsinstallatie op jaarbasis.

De prestaties van een systeem hangen af van de belasting en de omgevingsvoorwaarden. Anderzijds wordt de verbruiksgraad van de geproduceerde energievormen beïnvloed door de initiële keuze (ontwerp) van het systeem, de uitbatingsvorm en de koppeling van de productie en het gebruik van de nuttige energievormen. Omwille hiervan zijn geïntegreerde waarden van de rendementen over een tijdsperiode, bijvoorbeeld een jaar, vaak belangrijker dan de ogenblikkelijke waarden, zeker wanneer we de energiebesparing van een systeem willen bepalen, omdat ze beter de werkelijke prestatie van het systeem weergeven. Daarnaast zijn er ook wettelijke aspecten, die de geïntegreerde waarden van de indices belangrijk maken.

3.1.2.3 Brandstofbesparing van een WKK

Veronderstellen we dat E, Q en F respectievelijk de geproduceerde elektrische energie, de geproduceerde thermische energie of warmte en de verbruikte brandstofenergie gedurende een jaar voor een gegeven warmtekrachtinstallatie zijn. Indien men dezelfde hoeveelheden elektrische en thermische energie wil produceren via de best beschikbare technologieën voor gescheiden productie, namelijk de referentiecentrale (met referentierendement η_{eR}) en referentieketel (met referentierendement η_{qR}), dan zou hiervoor een hoeveelheid brandstof F_{ref} nodig zijn, met:

$$F_{ref} = \frac{E}{\eta_{eR}} + \frac{Q}{\eta_{qR}} \quad (3.9)$$

De brandstofbesparing of primaire-energiebesparing FES, gerealiseerd door deze hoeveelheden elektrische en thermische energie te produceren in een warmtekrachtkoppelingsinstallatie, kan bijgevolg geschreven worden als:

$$FES = F_{ref} - F \quad (3.10)$$

Of:

$$FES = \frac{E}{\eta_{eR}} + \frac{Q}{\eta_{qR}} - F \quad (3.11)$$

Definiëren we bovendien η_e en η_q als het elektrisch respectievelijk het thermisch rendement van de warmtekrachtkoppelingsinstallatie op jaarbasis, dan kunnen we schrijven:

$$FES = E \cdot \left(\frac{1}{\eta_{eR}} + \frac{\eta_q}{\eta_e \cdot \eta_{qR}} - \frac{1}{\eta_e} \right) \quad (3.12)$$

Om verschillende installaties of technologieën te kunnen vergelijken, kunnen we bovendien de relatieve brandstofbesparing of de relatieve primaire energiebesparing FESR definiëren als volgt:

$$FESR = \frac{F_{ref} - F}{F_{ref}} \quad (3.13)$$

Of anders geschreven:

$$FESR = 1 - \frac{F}{\frac{E}{\eta_{eR}} + \frac{Q}{\eta_{qR}}} \quad (3.14)$$

$$FESR = 1 - \frac{1}{\left(\frac{\eta_e}{\eta_{eR}} + \frac{\eta_q}{\eta_{qR}} \right)} \quad (3.15)$$

Of ook:

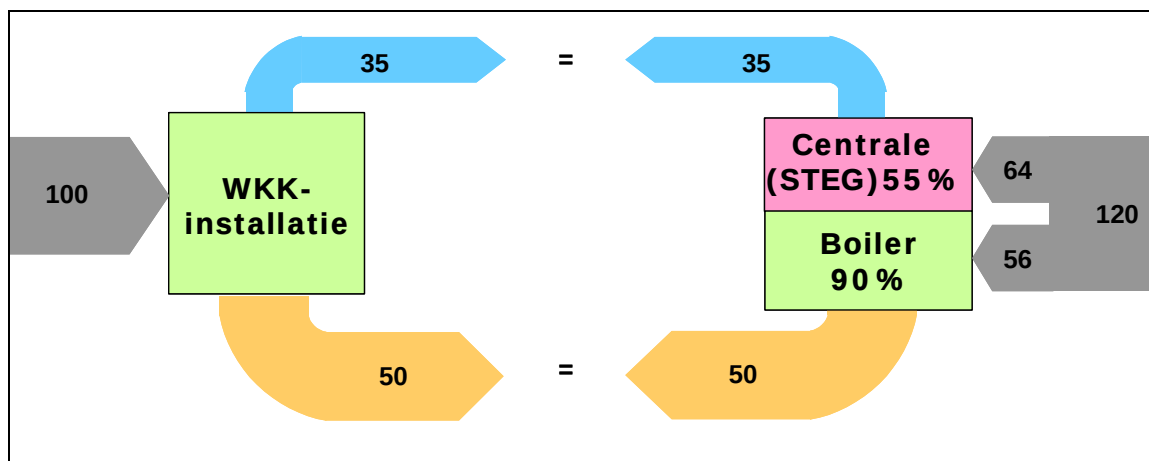
$$FESR = 1 - \frac{\frac{\eta_e}{\eta_q} + 1}{\left(\eta_e + \eta_q \right) \left(\frac{\eta_e}{\eta_q \cdot \eta_{eR}} + \frac{1}{\eta_{qR}} \right)} \quad (3.16)$$

$$FESR = 1 - \frac{PHR + 1}{\left(\eta_{WKK} \right) \left(\frac{PHR}{\eta_{eR}} + \frac{1}{\eta_{qR}} \right)} \quad (3.17)$$

Voorbeeld:

Een warmtekrachtkoppelingsinstallatie heeft een elektrisch respectievelijk thermisch rendement van 35% en 50%. Als referentie-installaties beschouwen we een STEG-centrale met een

elektrisch rendement van 55% en een boiler met rendement 90%. Figuur 3.1 illustreert de relatieve primaire energiebesparing, die volgens (2.15) 16,7% bedraagt.



Figuur 3.1: Voorbeeld van de primaire energiebesparing bij het gebruik van warmtekrachtkoppeling (links) ten opzichte van gescheiden productie (rechts)

3.2 Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met stoomturbines

Een systeem met stoomturbine bestaat uit drie grote delen: een warmtebron, een stoomturbine en een warmteafvoer. Het systeem werkt volgens de Rankine cyclus, in zijn basisvorm of in zijn aangepaste vorm met heroververhitting en/of met voorverwarming van voedingswater. Het grootste deel van de installaties sinds begin 1900 is gebaseerd op deze systemen.

De meest voorkomende warmtebron is een boiler. Hierin kunnen alle types brandstof of bepaalde combinaties van brandstoffen gebruikt worden, en wordt oververhitte stoom geproduceerd. In plaats van boilers kunnen ook nucleaire reactoren gebruikt worden. Aan de andere kant kan er ook hernieuwbare energie gebruikt worden, zoals biomassa of geconcentreerde zonnestraling. Zelfs afvalproducten kunnen verbrand worden op voorwaarde dat de boiler voorzien is van gepaste toestellen om polluerende emissies binnen de normen te beperken.

De werkingssomstandigheden kunnen in een ruim gebied variëren. Voor warmtekrachtkoppelings-toepassingen kan de stoomdruk variëren van enkele bar tot ongeveer 100 bar; in de sector van nutsbedrijven (bedrijven die elektriciteit, gas, ... leveren) kunnen ook hogere drukken gebruikt worden. De stoomtemperatuur kan gaan van enkele graden oververhitting tot ongeveer 450 °C en in de nutsbedrijvensector tot ongeveer 500 °C. Het gebruikelijk uitgaand vermogen bedraagt 0.5 tot 100 MW, maar een hoger vermogen is ook mogelijk.

Stoomturbinesystemen zijn zeer betrouwbaar, tot 95%, hebben een hoge beschikbaarheid (90-95%) en een lange levenscyclus (25-35 jaar). De installatieperiode is echter eerder lang: 12-18 maanden voor kleinere eenheden, tot 3 jaar voor grote systemen.

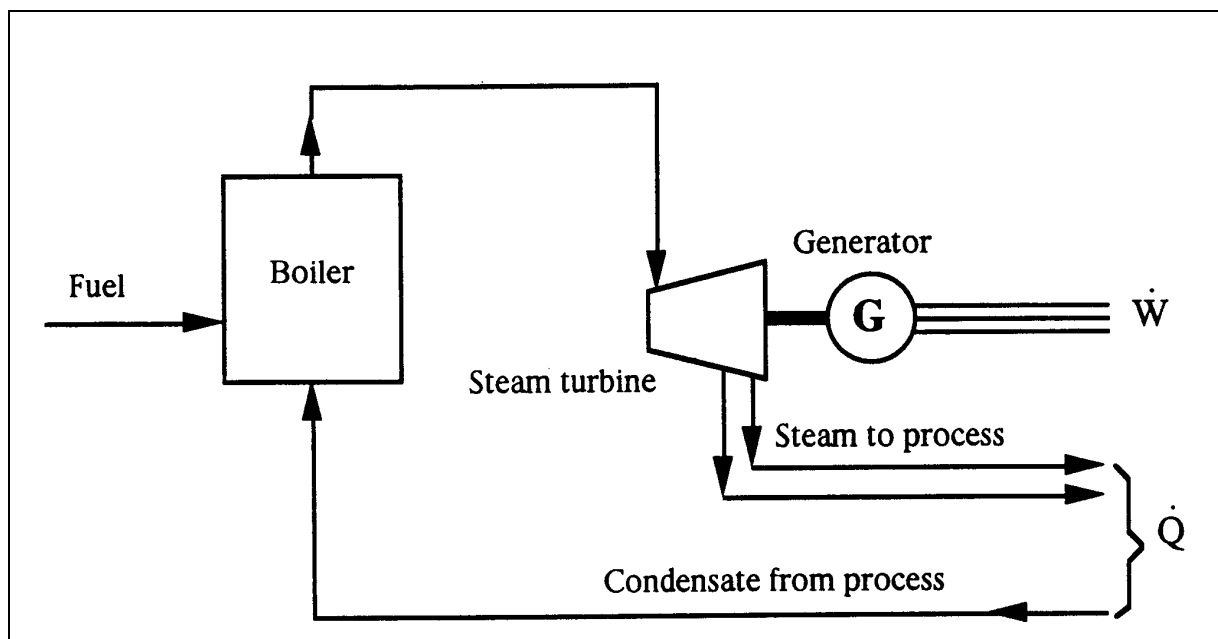
3.2.1 Basisconfiguraties van warmtekrachtkoppelinginstallaties met stoomturbines

Er zijn verschillende configuraties van warmtekrachtkoppelinginstallaties met stoomturbines, die hierna kort beschreven worden. Het schema is vereenvoudigd tot de basisconfiguraties zonder

details te tonen; dus eventuele heroververhitting, voorverwarming van voedingswater en hulpsystemen zijn niet getekend.

3.2.1.1 Installaties met tegendrukstoomturbines

Dit is de eenvoudigste configuratie. De stoom verlaat de turbine op een druk die hoger is of minstens gelijk aan de atmosferedruk, afhankelijk van de warmtebehoefte. Daarom wordt de term tegendruk gebruikt. Het is ook mogelijk om stoom uit de stoomturbine af te tappen op een druk en temperatuur passend bij de warmtevraag (figuur 3.2). Na de turbine wordt de (lage-druk)stoom toegevoerd aan de thermische belasting, waar de stoom warmte afgeeft en condenseert. Het condensaat gaat terug naar het systeem met een debiet dat lager kan zijn dan het stoomdebiet, als een hoeveelheid stoom wordt gebruikt in het proces of als er verliezen zijn in de buizen. Toevoegwater houdt de massabalans in evenwicht.



Figuur 3.2: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met tegendrukstoomturbine

Het tegendruksysteem heeft volgende voordelen:

- Gemakkelijke configuratie met weinig componenten
- De kosten voor dure lage druk trappen in de turbine worden vermeden
- Een lage investeringskost
- Verminderde of zelfs helemaal geen nood aan koelwater
- Een hoog rendement omdat er geen warmteverlies naar de omgeving is in een condensator

Er zijn echter ook nadelen:

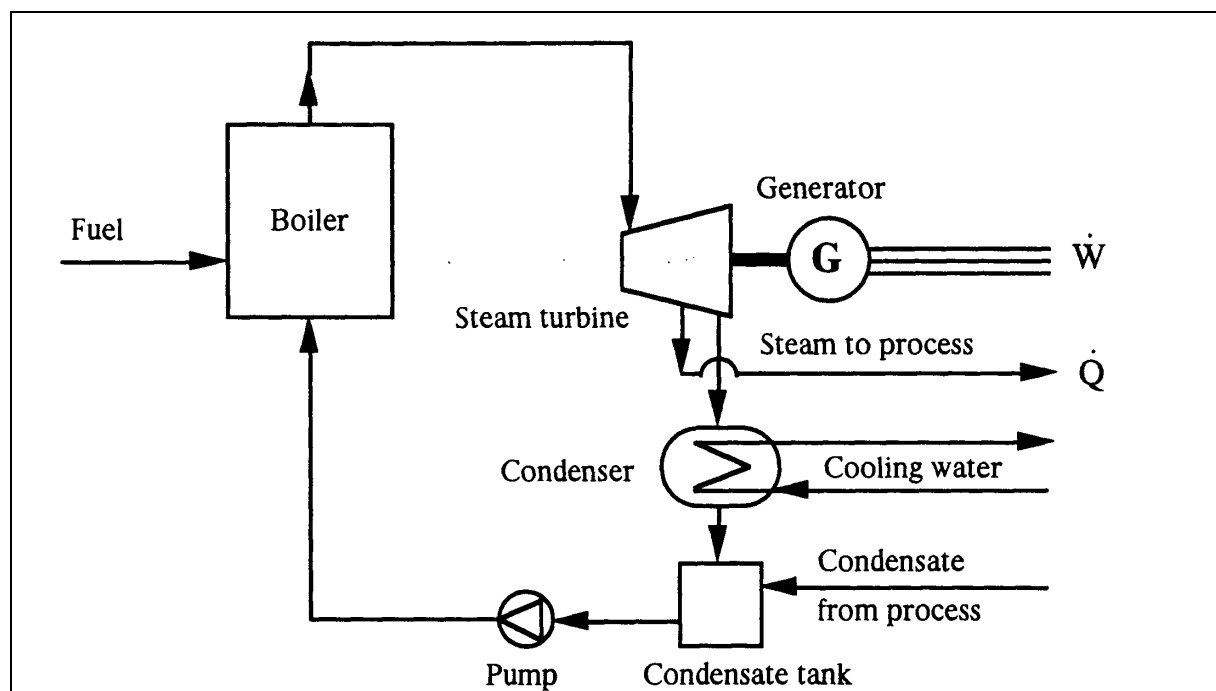
- De stoomturbine is groter voor hetzelfde vermogen, omdat ze werkt met een lager enthalpie-verschil in de stoom
- Het massadebiet van de stoom door de turbine hangt af van de warmtevraag. Zodoende is de geproduceerde elektriciteit afhankelijk van die warmtevraag, wat zorgt voor weinig of geen flexibiliteit. Daarom is hier een dusdanige verbinding met het elektriciteitsnet nodig, om zowel het elektriciteitsoverschot te verkopen, als elektriciteit aan te kopen bij een

tekort. Hogere elektriciteitsproductie is mogelijk door overtollige stoom rechtstreeks af te blazen in de atmosfeer. Dit is echter heel onefficiënt, want er wordt behandeld water verspild, en de economische en energetische prestaties zijn laag.

Een manier om een beetje flexibiliteit in te voeren is het aftappen van stoom om voedingswater voor te verwarmen. De outputwarmte wordt dan verminderd met de condensatiewarmte van de afgetapte stoom, terwijl het mechanisch vermogen minder daalt, omdat de afgetapte stoom nog steeds arbeid levert tijdens zijn onvolledige expansie. De totale brandstofbenuttigingsgraad blijft bijna onveranderd.

3.2.1.2 Installaties met condenserende stoomturbines

In dit systeem wordt stoom voor de warmtebehoefte afgetapt van één of meerdere tussenstappen tijdens de expansie, op een gepaste temperatuur en druk (figuur 3.3). De overblijvende stoom wordt verder ontspannen tot de condensordruk, die 0,05 bar kan bedragen, met een corresponderende condensatietemperatuur van 33 °C. Het is onwaarschijnlijk om bij zo een lage temperatuur nog een nuttige toepassing te vinden voor de overblijvende warmte en daarom wordt de warmte geloosd naar de omgeving.



Figuur 3.3: Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met condenserende stoomturbine

Afgetapte stoom kan ook gebruikt worden voor voorverwarming van voedingswater, waardoor het rendement van de rankine-cyclus wordt verbeterd, of voor het aandrijven van hulpdiensten.

In vergelijking met het tegendruksysteem heeft het condenserende systeem een hogere investeringskost en algemeen een lagere totale brandstofbenuttigingsgraad. Het kan echter een elektrisch vermogen leveren, dat tot zekere hoogte onafhankelijk is van de thermische belasting, door een gepaste regeling van het stoomdebiet door de turbine.

3.2.2 Thermodynamische prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met stoomturbines

3.2.2.1 Rendement en kracht-warmteverhouding (PHR) van installaties met stoomturbines

Het totale energetische rendement (totale brandstofbenuttigingsgraad) is relatief hoog (60-85%) en vermindert niet erg veel bij deellast. Het elektrisch rendement is echter laag (waarden in de omgeving van 15-20% zijn vrij normaal), wat een lage kracht-warmteverhouding ($PHR = 0.1-0.5$) tot gevolg heeft. Algemeen is het elektrisch rendement des te lager, naarmate de vereiste temperatuur van de processtoom hoger is. Het elektrisch rendement kan in bepaalde mate verhoogd worden, door bij de turbine-inlaat een hogere stoomdruk en stoomtemperatuur te gebruiken.

3.2.2.1.1 Tegendrukturbine

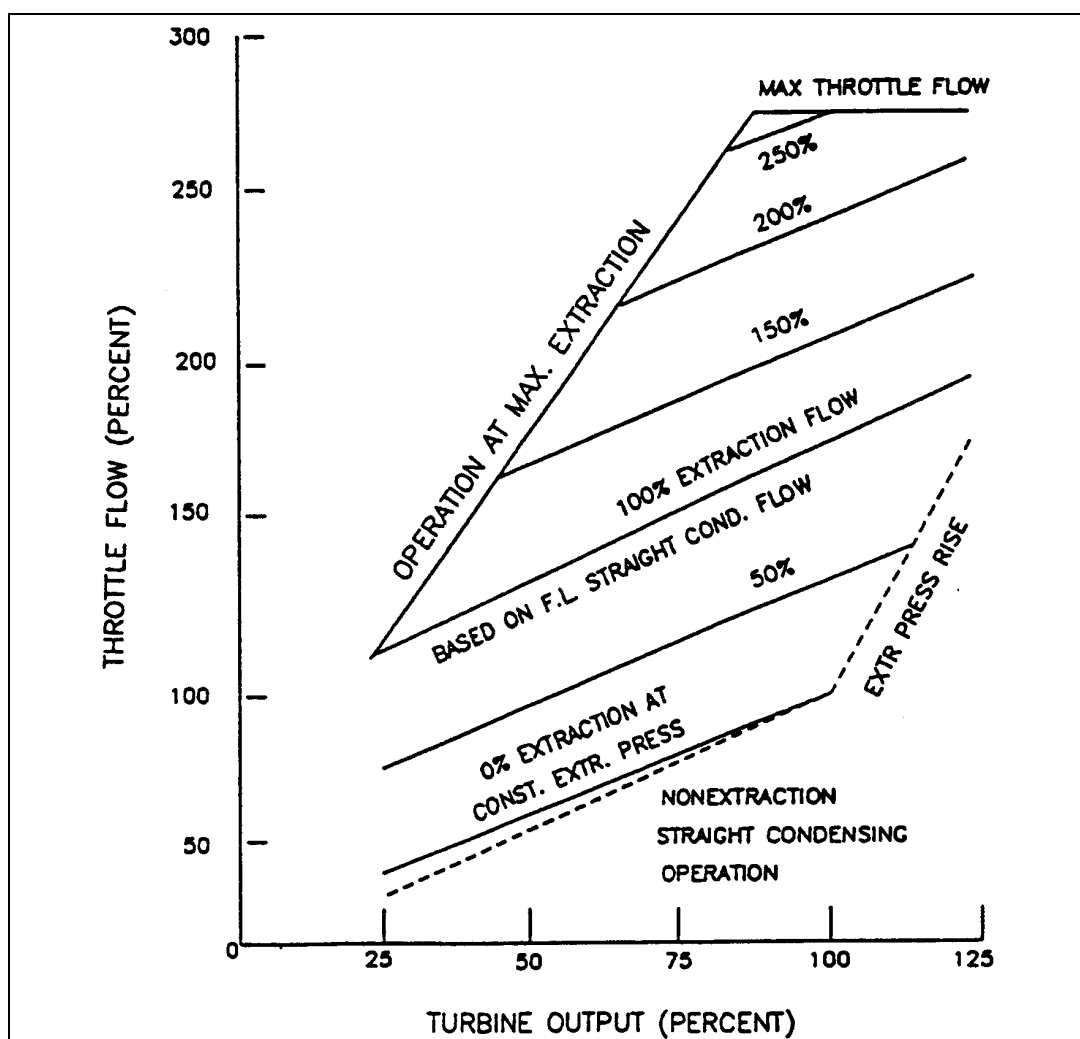
Als alle thermische energie van de stoom gebruikt wordt, en het condensaat dus terugkomt in de kring zonder bijkomende (nood)koeling en zonder dat warmte verloren gaat naar de omgeving, kan de totale brandstofbenuttigingsgraad 85% bedragen. Aangezien de opgewekte elektrische energie evenredig is met het stoomdebiet naar het thermisch proces, is de waarde van de kracht-warmteverhouding (PHR) ongeveer constant bij variabele last.

3.2.2.1.2 Condenserende stoomturbine

De afgegeven warmte in de condensor zorgt voor een lagere totale brandstofbenuttigingsgraad. Het grote voordeel bij deze configuratie is dat het elektrisch en het thermisch vermogen, binnen bepaalde grenzen, onafhankelijk van elkaar kunnen veranderd worden, waardoor de kracht-warmteverhouding (PHR) dus kan aangepast worden.

3.2.2.2 Deellastwerking van stoomturbines

Een optimale werking van een stoomturbine wordt doorgaans bereikt bij ongeveer 95% van het nominaal vermogen. Aangezien de meeste turbines in warmtekrachtkoppelingsinstallaties meertrappige machines zijn, ontworpen voor een specifieke toepassing, met mogelijkheid tot condensereren en aftappen, zijn de deellastkarakteristieken uniek voor elke turbine. De fabrikant voorziet een prestatiediagram, zoals afgebeeld in figuur 3.4. Het diagram in figuur 3.4 is voor een condenserende turbine met aftap en geeft de relatie tussen het inlaatdebiet (stoomdebiet bij de inlaat van de turbine) en het afgegeven elektrisch en thermisch vermogen van de turbine. Het thermisch vermogen is bepaald door het aftapdebiet, zoals aangegeven in het diagram.



Figuur 3.4: Prestatiediagram van stoomturbines (Orlando 1996)

3.3 Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gasturbines

Gasturbines in een enkelvoudige of gecombineerde cyclus zijn de meest gebruikte technologie in recente warmtekrachtkoppelingsinstallaties van gemiddeld tot hoog vermogen. Het afgegeven elektrisch vermogen varieert van enkele MW tot meerdere honderden MW. Aan de andere kant van het spectrum mikken recent onderzoek en recente ontwikkelingen op het bouwen van microturbines, die een vermogen produceren van enkele tientallen kW, en die verder in een aparte paragraaf worden toegelicht.

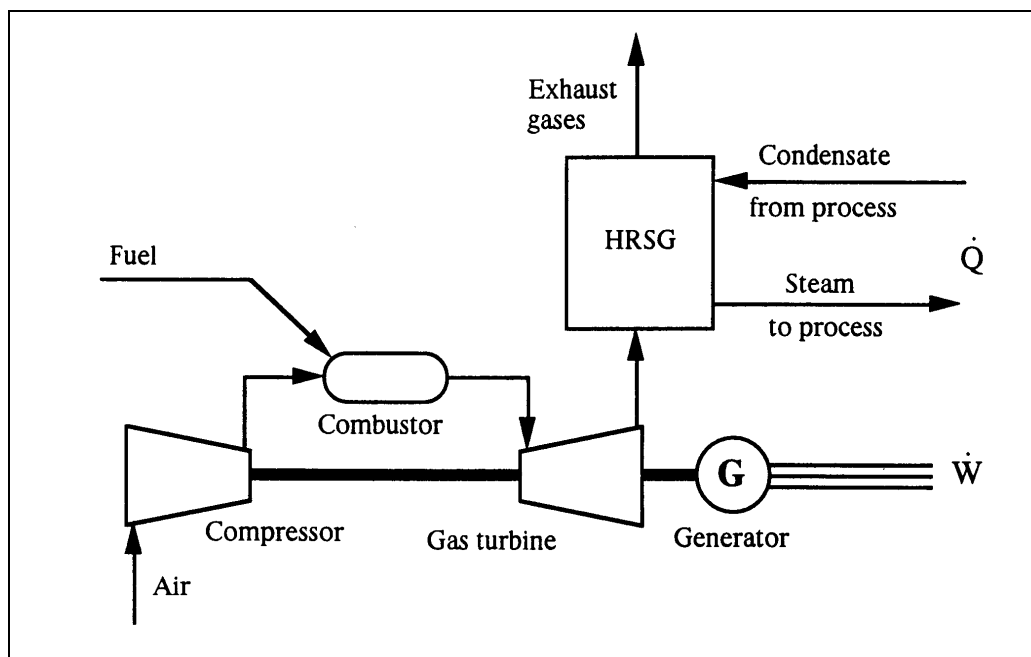
Gasturbines zijn ontwikkeld als heavy-duty eenheden voor industriële toepassingen of toepassingen in nutsvoorziening enerzijds, en als lichte, compacte en efficiënte vliegtuigmotoren anderzijds. Deze laatste motoren zijn aangepast voor stationaire toepassingen en worden in dat geval aëroderivatives genoemd. Ze kunnen sneller opstarten en sneller reageren op een veranderende belasting. Beide systemen van gasturbines zijn met succes toegepast in warmtekrachtkoppelingsinstallaties, met als voornaamste voordelen de lage installatiekost, hoge beschikbaarheid, snel en goedkoop onderhoud, mogelijkheid tot gebruik van verschillende brandstoffen, hoge kwaliteit van warmte die gemakkelijk kan herwonnen worden en hoge rendementen bij grote afmetingen. Verder zijn de wijdverspreide toepassingen ook te danken aan de commerciële beschikbaarheid van volledige gasturbine-packages.

3.3.1 Gasturbinecycli

Een gasturbine kan in open of gesloten cyclus werken.

3.3.1.1 Warmtekraftkoppelingsinstallaties met gasturbines met open cyclus

Het grootste deel van de huidige gasturbines, in eender welke toepassing, werkt volgens de open Brayton cyclus (ook wel Joule cyclus genoemd, wanneer irreversibele processen worden verwaarloosd) (Figuur 3.5): een compressor haalt lucht uit de atmosfeer en brengt die lucht op hogere druk naar de verbrandingskamer. Door die drukverhoging is ook de luchttemperatuur verhoogd. Oudere en kleinere eenheden werken met een drukverhouding van ongeveer 15:1, terwijl nieuwe en grotere eenheden een drukverhouding van 30:1 benaderen.



Figuur 3.5: Warmtekraftkoppelingsinstallatie met gasturbine in open cyclus

De samengedrukte lucht wordt via een diffusor naar de verbrandingskamer gevoerd, waar brandstof geïnjecteerd en op constante druk verbrand wordt. De diffusor vermindert de lichtsnelheid tot een gepaste waarde voor de verbrandingskamer. Er is een drukval over de verbrandingskamer van ongeveer 1-2%. Verbranding vindt plaats met een grote luchtvermaat. De uitlaatgassen verlaten de verbrandingskamer op hoge temperatuur en met zuurstofconcentraties van 15-16%. De hoogste temperatuur treedt op bij de uitlaat; hoe hoger de uitlaattemperatuur is, hoe hoger het cycluserendement. De maximale waarde wordt bepaald door de temperatuur die het turbinemateriaal kan verdragen en de efficiëntie van bladkoeling; met de huidige technologie is dat ongeveer 1300°C.

De uitlaatgassen, op hoge temperatuur en druk, komen binnen in de gasturbine, waar ze mechanische arbeid leveren om de compressor en de last (bv. een elektrische generator) aan te drijven. De uitlaatgassen verlaten dan de turbine op een aanzienlijke temperatuur (450-600°C), waardoor warmterecuperatie op hoge temperatuur mogelijk is. Die recuperatie vindt plaats d.m.v. een warmterecuperatie boiler op enkele druk of op dubbele druk, voor efficiëntere recuperatie van warmte. Drie druktrappen zijn ook mogelijk, maar dit komt niet veel voor, omdat het systeem complexer en duurder wordt, wat niet altijd gerechtvaardigd is.

De geproduceerde stoom kan van hoge kwaliteit zijn (i.e. hoge temperatuur en druk), waardoor het interessant is om het niet alleen voor thermische processen te gebruiken, maar ook voor het aandrijven van een stoomturbine om zo extra vermogen te leveren. In dat geval spreekt men van een gecombineerde cyclus, die verder wordt beschreven in Hoofdstuk 3.4.

In plaats van stoom te produceren, kunnen de uitlaatgassen ook rechtstreeks gebruikt worden in thermische processen, zoals voor verwarming tot hoge temperaturen of voor drogen.

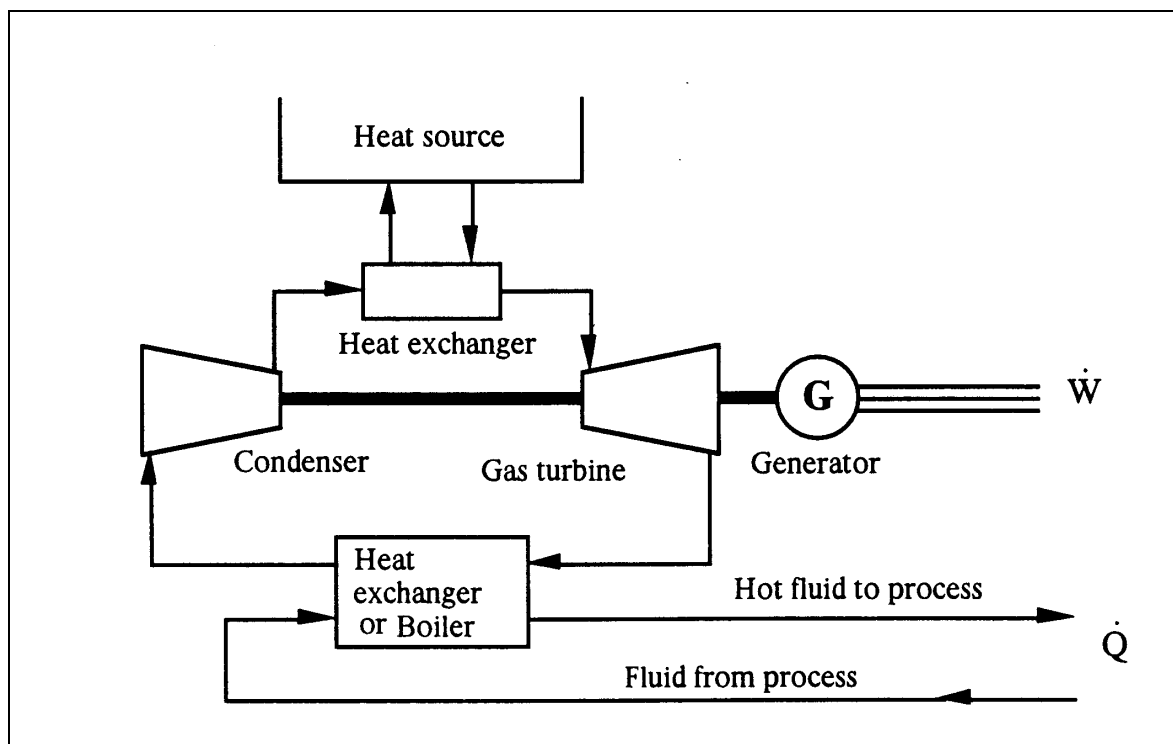
In elk van de voornoemde toepassingen is het mogelijk om de energie-inhoud en de temperatuur van de uitlaatgassen te laten toenemen door extra naverbranding. Daarom worden branders in de uitlaatgasboiler geplaatst, die extra brandstof gebruiken. Meestal is hierbij geen extra lucht nodig, omdat de luchtinhoud van de uitlaatgassen, zoals reeds vermeld, voldoende hoog is.

Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gasturbines met open cyclus hebben een elektrisch vermogen van 2 MW tot 100 MW, alhoewel waarden erbuiten mogelijk zijn. Een grote verscheidenheid aan brandstoffen is mogelijk: aardgas, lichte petroleum distillaten (bv. benzine, dieselolie), produkten verkregen uit koolvergassing. Er wordt onderzoek gedaan naar het gebruik van zwaardere petroleum distillaten, gemengd met lichtere. Ook niet-commerciële gassen, geproduceerd bij katalytisch kraken van koolwaterstoffen in raffinaderijen, worden als brandstof in gasturbines gebruikt. Er moet echter rekening mee worden gehouden dat de turbinebladen rechtstreeks in contact komen met de uitlaatgassen. Uitlaatgassen mogen dus geen componenten bevatten die oorzaak kunnen zijn van corrosie (zoals chemische samenstellingen van natrium, kalium, calcium, vanadium, zwavel) of erosie (vaste deeltjes vanaf een bepaalde grootte). Om dit te vermijden, kan het nodig zijn de brandstof of het uitlaatgas te behandelen voor die de turbine mag binnentreden.

De installatie-tijd voor een warmtekrachtkoppelingsinstallatie met gasturbine met een vermogen tot 7MW_e is ongeveer 9-14 maanden, en kan tot 2 jaar bedragen voor grotere eenheden. De betrouwbaarheid en jaarlijks gemiddelde beschikbaarheid van gasturbines op aardgas, zijn vergelijkbaar met die van stoomturbinesystemen. Bij eenheden waarbij vloeibare brandstof of gasvormige bijprodukten van chemische processen worden verbrand, kan een snellere inspectie of sneller onderhoud nodig zijn, wat leidt tot een lagere beschikbaarheid. De levensduur van een gasturbine is ongeveer 15-20 jaar, maar kan drastisch lager worden door brandstof van lage kwaliteit of slecht onderhoud.

3.3.1.2 Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gasturbines met gesloten cyclus

In het gesloten cyclus-systeem (figuur 3.6), circuleert het arbeidsfluidum (doorgaans helium of lucht) in een gesloten circuit. Het wordt opgewarmd in een warmtewisselaar vóór het de turbine binnenkomt en wordt afgekoeld na de turbine, waarbij het nuttige warmte afgeeft. Op die manier blijft het arbeidsmedium pollutievrij en kan het geen corrosie of erosie veroorzaken.



Figuur 3.6: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met gasturbine in gesloten cyclus

De warmtebron kan een externe verbranding zijn van om het even welke brandstof, zelfs van stadsafval of industrieel afval. Ook nucleaire energie of zonne-energie kan gebruikt worden.

Systemen van dit type, met een vermogen van 2-50 MW_e komen in Japan en Europa, maar zijn erg beperkt in aantal.

Na het opdoen van enige ervaring, verwacht men dat de betrouwbaarheid van systemen met gesloten cyclus minstens gelijk zal zijn aan die van systemen met open cyclus, terwijl de beschikbaarheid, door het propere arbeidsmedium, hoger wordt verwacht.

3.3.2 Thermodynamische prestaties van warmtekrachtinstallaties met gasturbines

3.3.2.1 Rendement en PHR bij nominaal vermogen

Het nominale elektrische rendement (i.e. het rendement bij nominaal vermogen) van kleine of middelgrote gasturbine systemen is doorgaans van de orde 25-35%. Grotere, recent gebouwde eenheden halen elektrische rendementen van 40-42% dankzij de hoge temperatuur van de uitlaatgassen bij de inlaat van de turbine (1100-1300°C). De totale brandstofbenuttigingsgraad bedraagt typisch 60-80%. De kracht-warmteverhouding (PHR) bedraagt 0.5-0.8.

Een belangrijk deel – vaak meer dan 50% - van het afgegeven turbinevermogen wordt gebruikt om de compressor aan te drijven, waardoor het relatief lage elektrische rendement (bv. in vergelijking met een zuigermotor met evenwaardig vermogen). Bij hoge drukverhoudingen kan tussenkoeling van de lucht bij een tussenstap van de compressie worden toegepast, waardoor de nodige compressiearbeid afneemt. Een belangrijke stijging van elektrisch rendement wordt ook verkregen door luchtvoorverwarming met uitlaatgassen in een zogenaamde recuperator. In dat geval daalt de recupereerbare warmte in de uitlaatgassen na de luchtvoorverwarmer, waardoor de

kracht-warmteverhouding (PHR) stijgt. In het geval van warmtekrachtkoppeling en ook voor gecombineerde gas-stoom cycli is de toevoeging van een luchtvoorverwarmer daarom niet gerechtvaardigd.

De maximale recupereerbare warmte is afhankelijk van de minimale aanvaardbare temperatuur in de uitlaatgassen. Als de brandstof zwavel bevat, mag de uitlaatgastemperatuur niet lager worden dan 140-165°C, om de vorming van zwavelzuur bij zijn dauwpunt te vermijden. Als de brandstof praktisch vrij van zwavel is, zoals bij aardgas, kan de uitlaatgastemperatuur tot 90-100°C dalen.

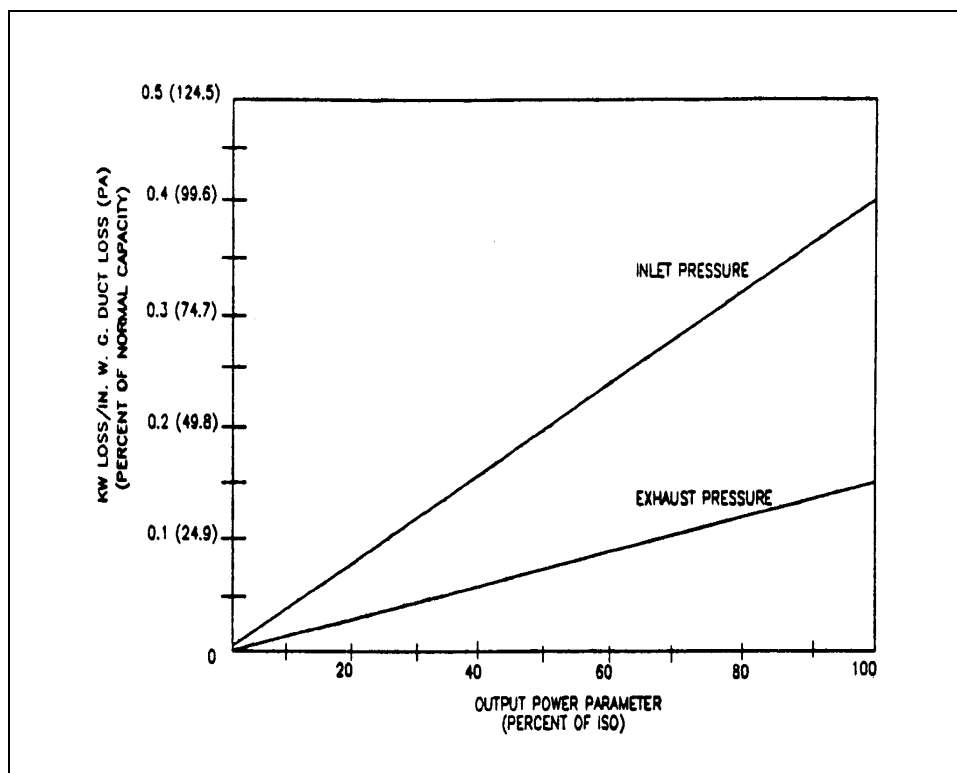
3.3.2.2 Invloed van omgevingsomstandigheden en deellast op vermogensoutput en rendement van installaties met gasturbines

Lucht komt de compressor binnenvan op omgevingstoestand. De temperatuur en dichtheid van de lucht bepalen de hoeveelheid arbeid die nodig is voor compressie, de hoeveelheid brandstof die kan verbrand worden en de nodige brandstof om een bepaalde turbine inlaat temperatuur te bereiken. Zodoende worden ook het netto afgegeven vermogen, het rendement, het uitlaatgasdebiet en de uitlaattemperatuur van de gassen (en dus ook de recupereerbare warmte) in belangrijke mate beïnvloed door de omgevingscondities.

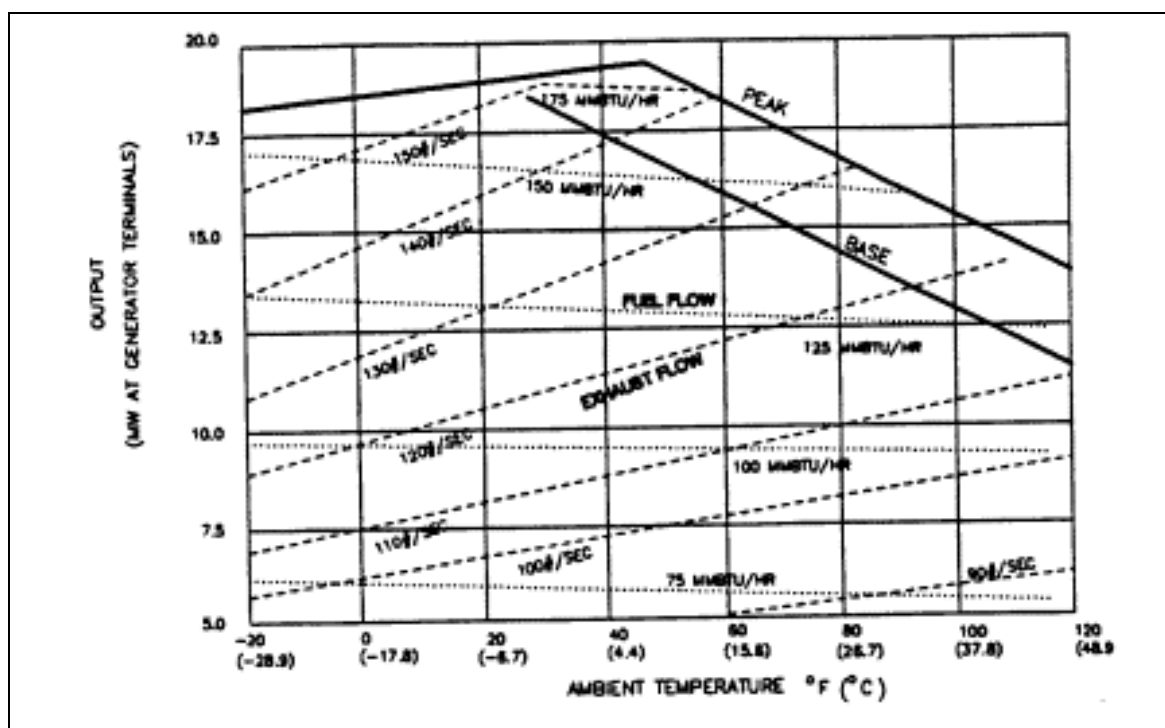
Fabrikanten vermelden doorgaans de capaciteit (vermogensoutput) en prestaties van een gasturbine bij ISO standaard condities: 15°C, 60% relatieve vochtigheid, op zeeniveau. Verder zijn de prestaties gespecificeerd zonder drukverliezen in de in- en uitlaatleiding. Het effect van deze verliezen voor typische turbines met één as (single shaft) is getoond in Figuur 3.7

De capaciteit van een turbine vermindert wanneer de omgevingstemperatuur of de hoogte stijgt. Ze kan verminderen met 2-4% bij een hoogtestijging van 300m. Deellast heeft een sterke invloed op het rendement: bij lagere belasting zal het elektrisch rendement lager zijn. Figuur 3.8 geeft een voorbeeld van een prestatiediagram dat de relatie weergeeft tussen omgevingstemperatuur, capaciteit, de nodige energie uit de brandstof en de belasting. In plaats van dit diagram, kan men ook gebruik maken van de grafieken zoals die in Figuren 3.9-3.11. Zoals bij stoomturbines is het nodig om bij de fabrikant het prestatiediagram of de grafieken op te vragen voor elke gasturbine apart.

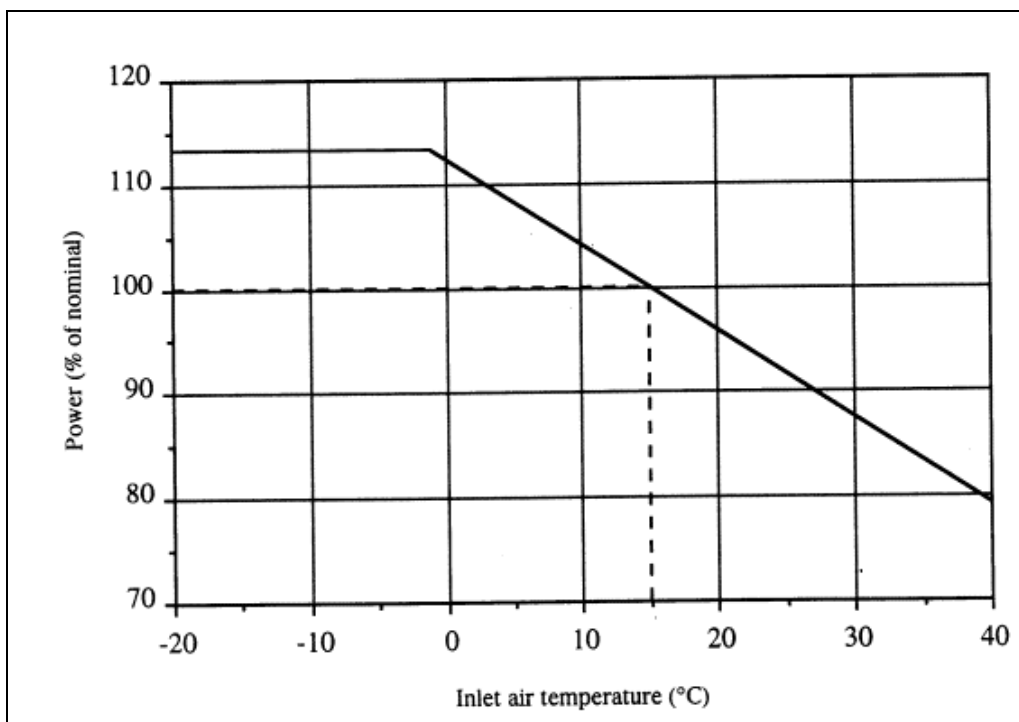
Als een gasturbine voor lange tijd in een omgeving op hoge temperatuur moet werken, kan het economisch voordelig zijn om de inlaatlucht voor te koelen. Mechanische, absorptie- of verdampingskoelers kunnen gebruikt worden; de finale keuze zal bepaald worden door een haalbaarheidstudie. Het is interessant te weten dat absorptiekoelers voor een groot deel kunnen aangedreven worden met de warmte van uitlaatgassen.



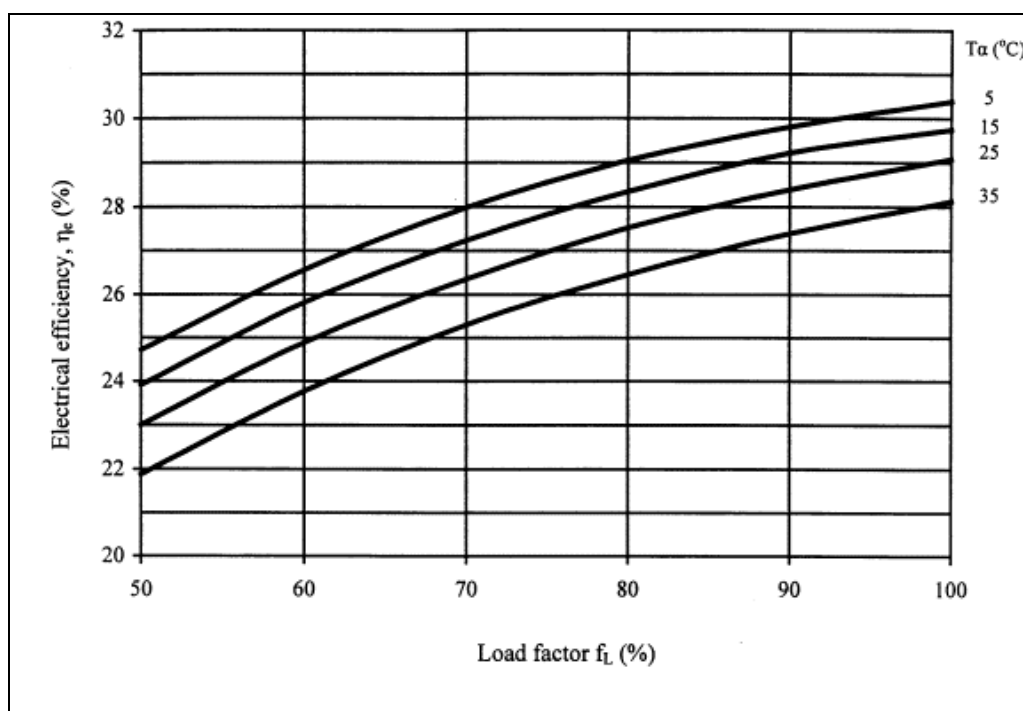
Figuur 3.7: Effect van de drukverliezen van de gasstroming bij in- en uitlaat op de capaciteit van de turbine (Orlando 1996)



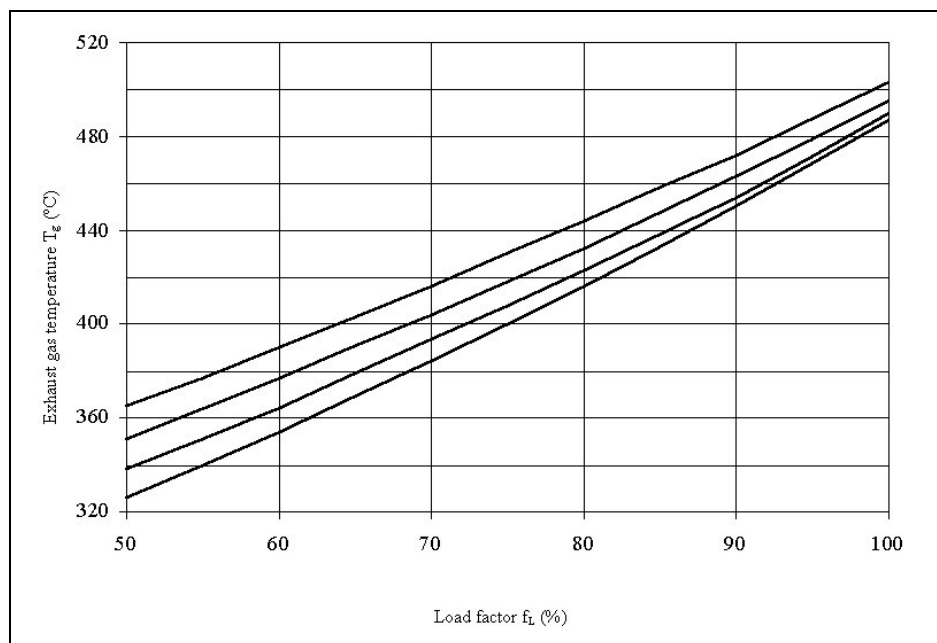
Figuur 3.8: Prestatiediagram voor gasturbines



Figuur 3.9: Effect van de inlaattemperatuur op het vermogen van een gasturbine



Figuur 3.10: Effect van de last en de inlaattemperatuur van de lucht op het elektrisch rendement van een gasturbine systeem



Figuur 3.11: Effect van de last en de inlaattemperatuur op de uitlaattemperatuur van het gas uit de turbine (Parameter van inlaattemperatuur T_a varieert van 5 tot 35°C)

3.4 Warmtekrachtinstallaties met zuigermotoren met inwendige verbranding

Zuigermotoren met inwendige verbranding hebben hoge rendementen, zelfs bij kleine uitvoeringen. Ze zijn te verkrijgen in verschillende maten en in groot vermogensgebied (75kW-50 MW). Ze kunnen werken op een groot aantal vloeibare en gasvormige brandstoffen en hebben een hoge beschikbaarheid (80-90%). Deze eigenschappen hebben ervoor gezorgd dat ze de eerste keuze zijn in warmtekrachtkoppelinginstallaties, in de commerciële sector en ook in de industriële sector, wanneer middelhoge spanning is vereist. Nadelen van alle inwendige verbrandingsmotoren zijn de polluerende emissies van NOx en SOx, hoog lawaai niveau en, hoge onderhoudskosten, zodat de keuze voor WKK toepassingen in bevolkte centra kritisch moet bekeken worden.

3.4.1 Types van warmtekrachtkoppelinginstallaties met zuigermotoren met inwendige verbranding

Een manier om de systemen te klasseren is gebaseerd op de inwendige verbrandingscyclus: Otto cyclus of Diesel cyclus. In een Ottomotor wordt een mengsel van lucht en brandstof samengeperst in elke cilinder en wordt de verbranding ingezet door een vonk, die extern wordt opgewekt. In een Dieselmotor wordt alleen lucht samengeperst en ontsteekt de brandstof, die op het einde van de compressieslag in de cilinder wordt geïnjecteerd, spontaan door de hoge temperatuur van de samengeperste lucht.

Ottomotoren kunnen met een groot aantal verschillende brandstoffen werken, zoals benzine, aardgas, propaan, biogas van waterzuiveringsinstallaties, stortgas (methaan). Ze worden vaak 'gasmotoren' genoemd, als ze werken met een gasvormige brandstof. Dieselmotoren werken op hogere temperaturen en drukken, en daarom worden zwaardere brandstoffen gebruikt: diesel olie, fuel olie en residuele fuel bij grote tweetakmotoren.

Een andere classificatie van warmtekrachtkoppeliningsinstallaties is gebaseerd op de grootte van de motor:

- Kleinere eenheden met een gasmotor (15-1000kW) of een Dieselmotor (75-1000kW)
- Middelgrote eenheden (1-6 MW) met een gasmotor of een Dieselmotor
- Grote eenheden (hoger dan 6 MW) met een Dieselmotor

De volgende types van gasmotoren zijn commercieel verkrijgbaar:

- Benzinemotoren van auto's, geconverteerd tot een gasmotor. Dit zijn doorgaans kleine motoren (15-30 kW), licht en met een hoge verhouding van vermogen tot gewicht. De conversie heeft maar een kleine invloed op het rendement, maar het vermindert het vermogen met zowat 18%. Massaproductie zorgt voor een lage kostprijs, maar de levensduur is relatief kort (10000-30000 uren).
- Dieselmotoren van auto's, geconverteerd tot gasmotor. Het vermogen is ongeveer 200 kW. Conversie is nodig aan de zuigers, cilinderkoppen en het kleppensysteem, omdat nu de verbranding niet alleen wordt ingezet door de compressie maar ook door een vonk. Die conversie heeft geen vermogenvermindering tot gevolg, omdat het mogelijk is om de luchtvermaat goed te regelen.
- Stationaire motoren geconverteerd tot gasmotor of origineel ontworpen en gemaakt als gasmotor. Dit zijn heavy duty motoren, gebouwd voor industriële of maritieme toepassingen. Het geleverd vermogen kan tot 3000 kW gaan. De robuustheid verhoogt de installatiekosten, maar vermindert het onderhoud en verhoogt de levensduur (15-20 jaar). Ze kunnen continu op vollast werken.
- Stationaire motoren met twee brandstoffen. Dit zijn Dieselmotoren met een vermogen tot 6000 kW. De hoofdbrandstof is aardgas dat echter niet wordt ontstoken door een vonk, maar door de injectie van Diesel op het einde van de compressieslag. Van de totale brandstofenergie die nodig is, wordt er 90% geleverd door het gas en zowat 10% door de Dieselolie. De motoren kunnen werken met de dubbele brandstof of met alleen dieselolie, wat natuurlijk de installatie- en onderhoudskosten verhoogt.

Wat de brandstoffen voor gasmotoren betreft, zijn biogas van waterzuiveringsinstallaties en methaangas van afvalstorten heel belangrijk, niet alleen wat grondstofverbruik aangaat, maar ook wat betreft milieubescherming. Beide brandstoffen zijn geschikt voor gasmotoren, vermits de klopvaste methaan en de hoge CO₂ hoeveelheid een methaangehalte van meer dan 130 geven. Een andere manier om de energie in afval te gebruiken is de toepassing van pyrolyse (het door warmte opsplitsen van substanties). Het resulterende pyrolyse-gas kan gebruikt worden in een gasmotor.

Eén van de meest belangrijke eigenschappen van het gas in een gasmotor is zijn klopvastheid. Die wordt uitgedrukt d.m.v. het methaangehalte. Het erg klopvaste methaan heeft een methaangehalte van 100. Butaan, daarentegen heeft een methaangehalte van 10, terwijl waterstof met een methaangehalte van 0 onderaan de schaal ligt (Tabel 3.1).

Dieselmotoren worden onderverdeeld in hoge snelheids-, gemiddelde snelheids-, en lage snelheidsmotoren. Men spreekt soms ook van snellopende en traaglopende motoren. Tabel 2 geeft de snelheid en het vermogen voor elk type, maar er dient opgemerkt te worden dat men het niet te strikt mag nemen met de limieten.

Tabel 3.1: Methaangehalte van gasvormige brandstoffen

Brandstof		Methaangehalte
Naam	Samenstelling	
Waterstof	H ₂	0
Methaan	CH ₄	100
Ethyleen	C ₂ H ₄	15
Ethaan	C ₂ H ₆	43.7
Propyleen	C ₃ H ₆	18.6
Propaan	C ₃ H ₈	33
Butaan	C ₄ H ₁₀	10
Koolstofmonoxide	CO	75
Aardgas (Typisch)	CH ₄ 88.5 % C ₂ H ₆ 4.7 % C ₃ H ₈ 1.6 % C ₄ H ₁₀ 0.2 % N ₂ 5.0 %	72-98
Biogas van waterzuiveringsinstallaties	CH ₄ 65 % CO ₂ 35 %	134
Stortgas	CH ₄ 50 % CO ₂ 40 % N ₂ 10 %	136

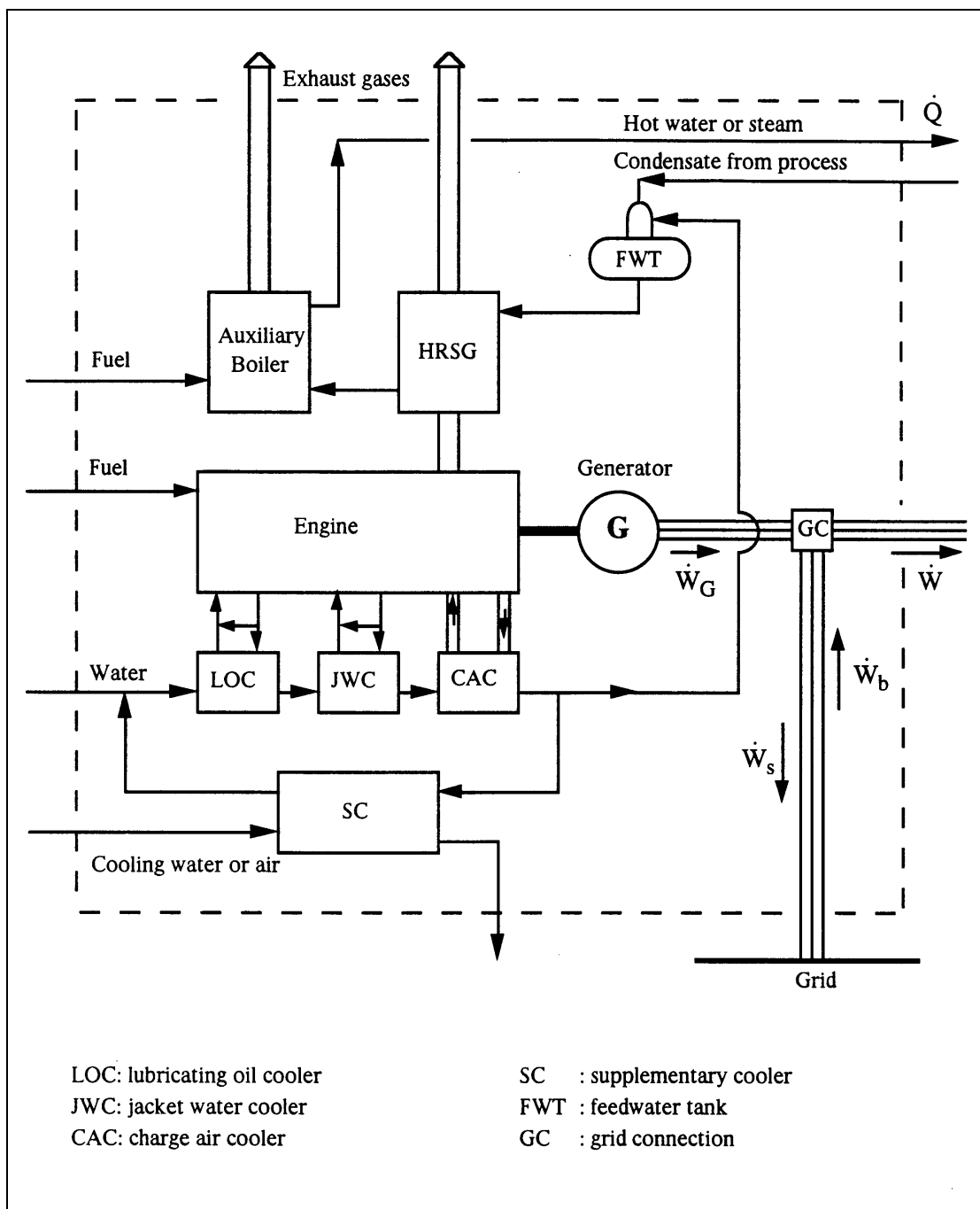
Tabel 3.2: Snelheid en vermogen van Dieselmotoren

Type	Snelheid (tpm)	Vermogen (kW)
Snellopend	1200 – 3600	75 – 1500
Middel hoge snelheid	500 – 1200	500 – 15000
Traaglopend	100 – 180	2000 – 50000

Zoals bij gasturbines, kunnen de uitlaatgassen van zuigermotoren met inwendige verbranding rechtstreeks in een thermisch proces worden gebruikt, of onrechtstreeks, d.m.v. een recuperatieboiler. De temperatuur van de gassen ligt tussen 300 en 400°C, i.e. belangrijk lager dan die bij gasturbines. Daarom kan bijkomende verwarming vaak nodig zijn bij deze motoren. Dat kan gedaan worden door extra verbranding in de boiler (aanvoer van lucht is hier noodzakelijk, omdat er slechts een kleine zuurstofhoeveelheid in de uitlaatgassen zit) of in een hulpboiler. Bij grote motoren kan een gecombineerde cyclus economisch haalbaar zijn (zie verder)

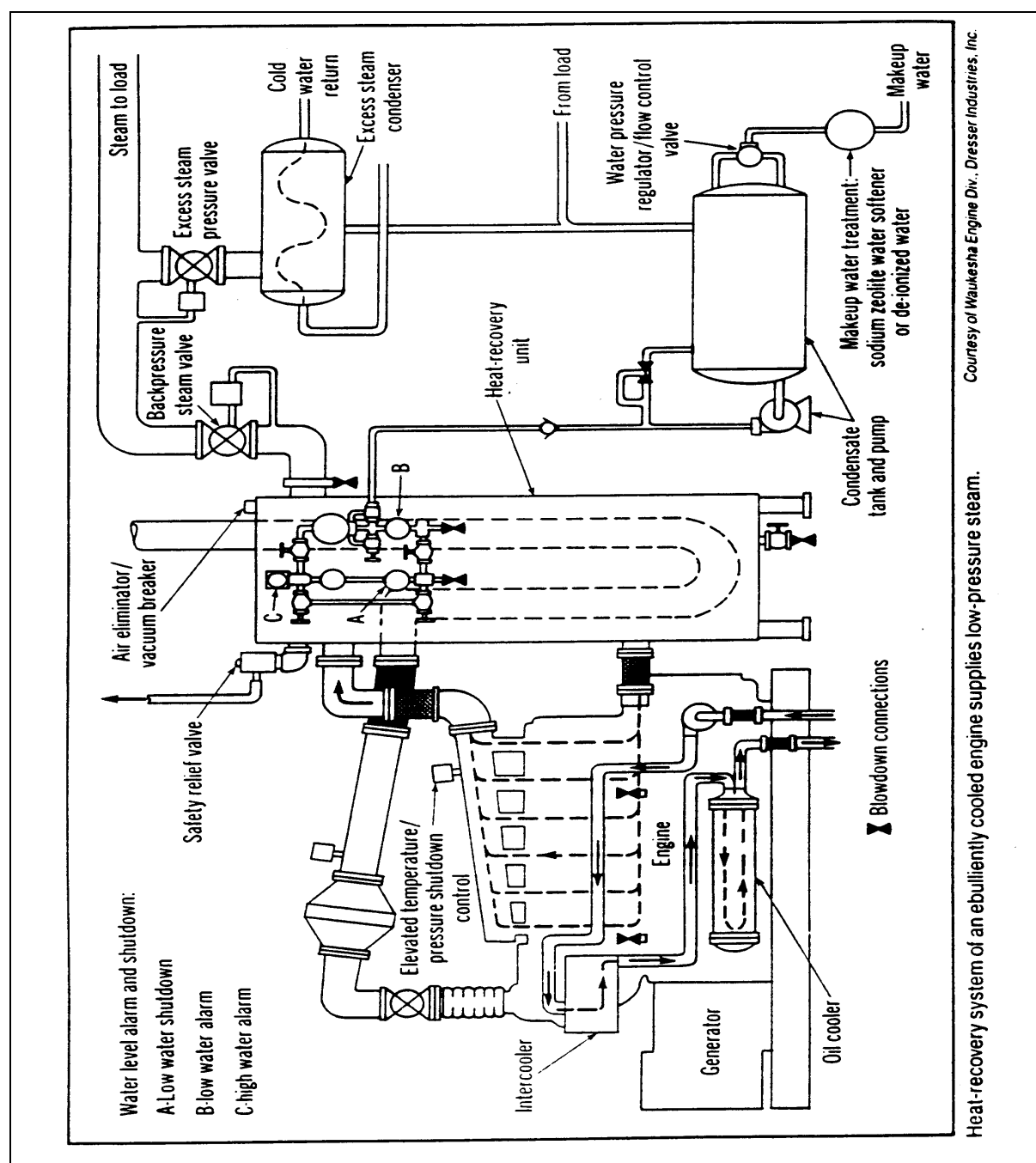
Figuur 3.12 laat een schema zien van zo'n systeem, maar dat is zeker niet de enig mogelijke configuratie (zeker niet wat betreft de schikking van de warmtewisselaars). De motor drijft de generator aan. Vier warmtewisselaars recupereren warmte uit vloeistoffen die nodig zijn voor de werking van de motor: smeeroeliekoeler, mantelwaterkoeling (gesloten circuit van de motor), opslaatluchtkoeler (of turbokoeler) en de uitlaatgaswarmtewisselaar (of boiler). De gerecupereerde warmte produceert warm water en stoom, zoals in Figuur 3.12, maar het kan ook gebruikt worden in andere thermische processen. Bij kleine motoren kan het zijn dat de warmte niet

voldoende is om stoom te produceren. In dat geval wordt alleen warm water geleverd. Aan de andere kant is er bij een motor met natuurlijke luchtaanzuiging geen turbokoeler aanwezig.



Figuur 3.12: Werkschema van een warmtekrachtkoppelingsinstallatie met een zuigermotor met inwendige verbranding

Met de warmterecuperatie van de drie warmtewisselaars wordt het water opgewarmd tot 75-80°C. Het voorverwarmde water komt dan binnen in de warmtewisselaar met de uitlaatgassen waar het verwarmd wordt tot 85-95°C of verdampt. Middelgrote motoren produceren doorgaans verzadigde stoom van 180-200°C, terwijl grote eenheden oververhitte stoom kunnen leveren op een druk van 15-20 bar en een temperatuur van 250-350°C. De minimale temperatuur van de uitlaatgassen bij het verlaten van de warmtewisselaar bedraagt 160-170°C voor brandstoffen die zwavel bevatten, zoals bv. Dieselolie, of 90-100°C voor zwavelvrije brandstoffen zoals aardgas.



Figuur 3.13: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met een tweefasig gekoelde motor (Waukesha)

Een speciaal type van cilinderkoeling is verdampingskoeling of twee-fasen koeling. In een tweefasig gekoelde motor komt het koelmiddel (bv. water) als een samengedrukte vloeistof op zijn kookpunt, binnen in de motor. Het neemt warmte op van de motor en ondergaat een faseverandering (verdamping). Niet al het koelmiddel verandert van fase. Warmteoverdracht van de motor naar het koelmiddel gebeurt daardoor op constante temperatuur, waardoor er minder thermische spanningen in de motor optreden. Het koelmiddel uit de motor, een mengsel van vloeistof en damp, heeft een lagere dichtheid dan het koelmiddel dat de motor binnenkomt en zal dus naar de bovenkant van de motor stijgen. Nadat het de motor heeft verlaten, komt het mengsel in een stoomafscheider, waar stoom van het mengsel wordt gescheiden om gebruikt te

worden in het thermisch proces. Een systeem met twee-fasen koeling wordt getoond in Figuur 3.13. Als alternatief voor twee-fasen koeling, kan een systeem met gedwongen circulatie worden gebruikt, dat werkt op een hogere druk dan normaal, op een temperatuur van 120-130°C en dat lagedrukstoom kan produceren.

Drukverhoging van de aangezogen lucht verhoogt het vermogen van een motor, voor gelijkblijvende grootte. Dit wordt normaal bekomen d.m.v. een turbo-oplader (meer dan één in grotere motoren): een gasturbine wordt aangedreven door de uitlaatgassen en drijft een luchtcompressor aan. De luchttemperatuur aan de uitlaat van de compressor is hoog (120-140°C) en de dichtheid is laag. Opdat de massa lucht (en dus ook de massa brandstof en bijgevolg ook het vermogen van de motor) zou toenemen, is het nodig om de lucht te koelen voor hij in de cilinders stroomt. Er zijn twee typische temperatuurniveau's voor lucht aan de uitgang van de koeler: lage temperatuur (ongeveer 45°C) en hoge temperatuur (ongeveer 90°C).

Lage temperatuur zorgt voor hoger vermogen maar de gerecupereerde warmte is van beperkt nut, omdat het water aan de uitgang van de koeler een lage temperatuur (30-35°C) heeft. Er kan voor dat temperatuurniveau gekozen worden, als het nodig is om voedingswater voor te verwarmen dat binnenkomt aan 10-25°C. Als water echter binnenkomt op bv. 60-70°C, zoals dat het geval is bij het centrale verwarming systeem van gebouwen, kan het hoge temperatuurniveau te verkiezen zijn, omdat dat de totale brandstofbenuttigingsgraad van de warmtekrachtkoppelingsinstallatie verhoogt met 3-5%. Het temperatuurniveau heeft ook een invloed op de relatieve positie van de luchtkoeler t.o.v. van de andere koelers in het watercircuit. Dit is één van de redenen waarom de opstelling uit Figuur 3.12 niet de enige mogelijkheid is.

3.4.2 Thermodynamische prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met zuigermotoren met inwendige verbranding

3.4.2.1 Rendement en KVV bij nominaal vermogen

Kleine en middelgrote motoren hebben een elektrisch rendement van 35-45%, terwijl moderne grote eenheden (tientallen MW) rendementen bereiken tot 50%. De totale brandstofbenuttigingsgraad van de warmtekrachtkoppelingsinstallatie ligt in het gebied 70-85%. De kracht-warmteverhouding ligt tussen 0.8 en 2.4, de hoogste verhouding, dus, van de drie systemen die tot nu toe werden vermeld.

3.4.2.2 Invloed van omgevingsomstandigheden, brandstofkwaliteit en deellast op de vermogens-output en het rendement

Zuigermotoren met inwendige verbranding zijn minder gevoelig dan gasturbines aan verandering van omgevingscondities of belasting.

Het vermogen bij motoren met natuurlijke aanzuiging vermindert met zowat 3% bij een hoogtestijging van 300m. Voor motoren met luchtcompressie hangt het effect van de hoogte af van het ontwerp van de fabrikant. In sommige gevallen wordt een vermogenvermindering van 2% voor een hoogtestijging van 300m vermeld, in andere gevallen wordt geen vermindering gemerkt tot hoogtes van 1500m.

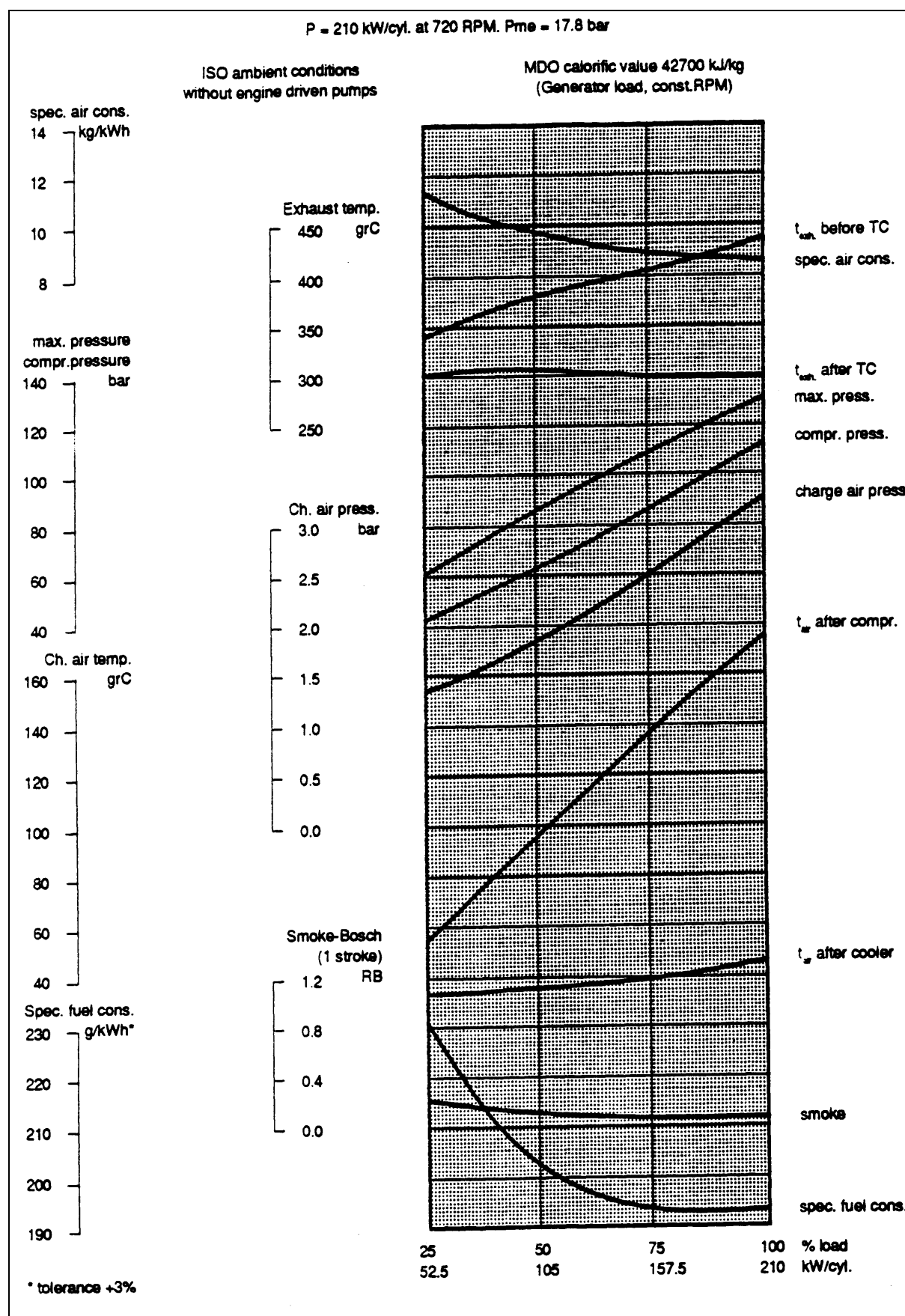
Het afgegeven vermogen vermindert met zowat 1% bij elke stijging van de omgevingstemperatuur met 5.5°C. Het gebruik van opgewarmde lucht moet worden vermeden.

De motorspecificaties gelden voor een zekere verbrandingswaarde van de brandstof. Voor hetzelfde type brandstof is het afgegeven vermogen in een eerste benadering in verhouding met de verbrandingswaarde.

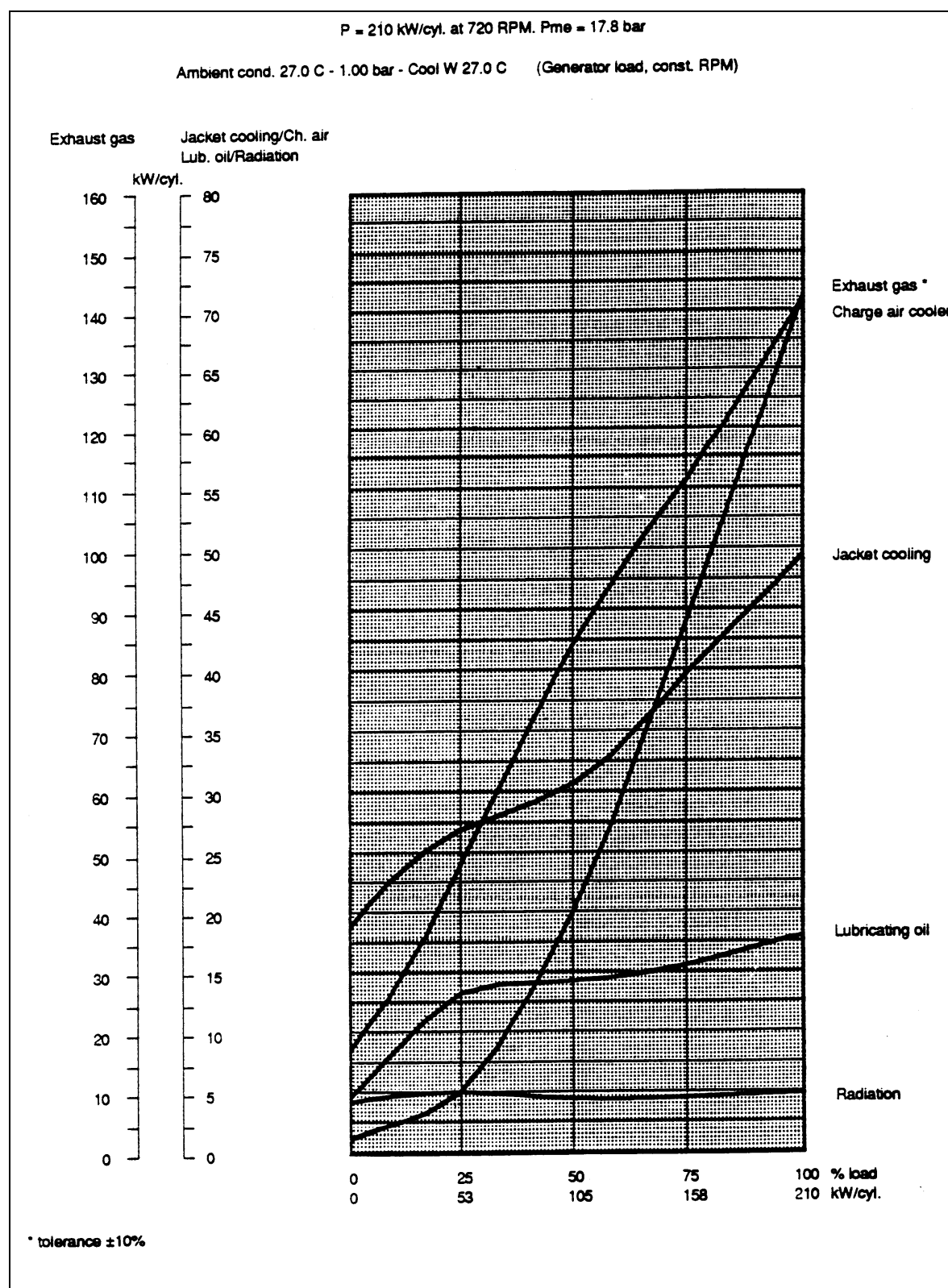
Zuigermotoren met inwendige verbranding behouden hetzelfde rendement in een groot gebied van aangelegde lasten. Fabrikanten geven prestaties bij deellast weer d.m.v. tabellen of grafieken. Voorbeelden worden gegeven in Tabel 3.3 en volgende figuren.

Tabel 3.3: Voorbeelden van prestaties bij deellast voor warmtekrachtkoppelingen met een gasmotor

Nominaal asvermogen	kW	827			1500		
Last	%	100	75	50	100	75	50
Elektrisch vermogen	kW_e	803	601	398	1464	1092	724
Thermisch vermogen	kW_{th}	1018	800	578	1536	1245	935
Warmtebronnen:							
Oplaadluchtkoeler	%	5.9	3.2	0.2	7.4	5.1	2.7
Koeler voor smeeroilie	%	4.4	4.9	6.0	5.2	6.0	7.6
Mantelwaterkoeler	%	13.8	17.3	21.0	8.8	10.9	12.7
Uitlaatgassen	%	25.0	24.6	24.2	22.2	23.4	24.7
Thermisch rendement	%	49.1	50.0	51.4	43.6	45.4	47.7
Elektrisch rendement	%	37.6	37.6	35.3	41.5	39.8	36.9
Totale brandstofbenutting	%	86.7	87.6	86.7	85.1	85.2	84.6
Watertemperatuur:							
voeding	°C	90	87	83	90	86	82
terug	°C	70	70	70	70	70	70
Data zijn geldig onder volgende voorwaarden: Brandstof: aardgas met een onderste verbrandingswaarde $H_u=34.200 \text{ kJ/Nm}^3$ Maximum watertemperatuur in koeler 90°C Koeling van de uitlaatgassen tot 120°C Bruikbare warmte voorzien onder de vorm van warm water. Onzekerheid op de waarden van het thermisch vermogen $\pm 8\%$.							



Figuur 3.14: Prestatiecurve van de zuigermotor met inwendige verbranding



Figuur 3.15: Warmtebalans van de zuigermotor met inwendige verbranding

3.5 Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met gecombineerde cyclus

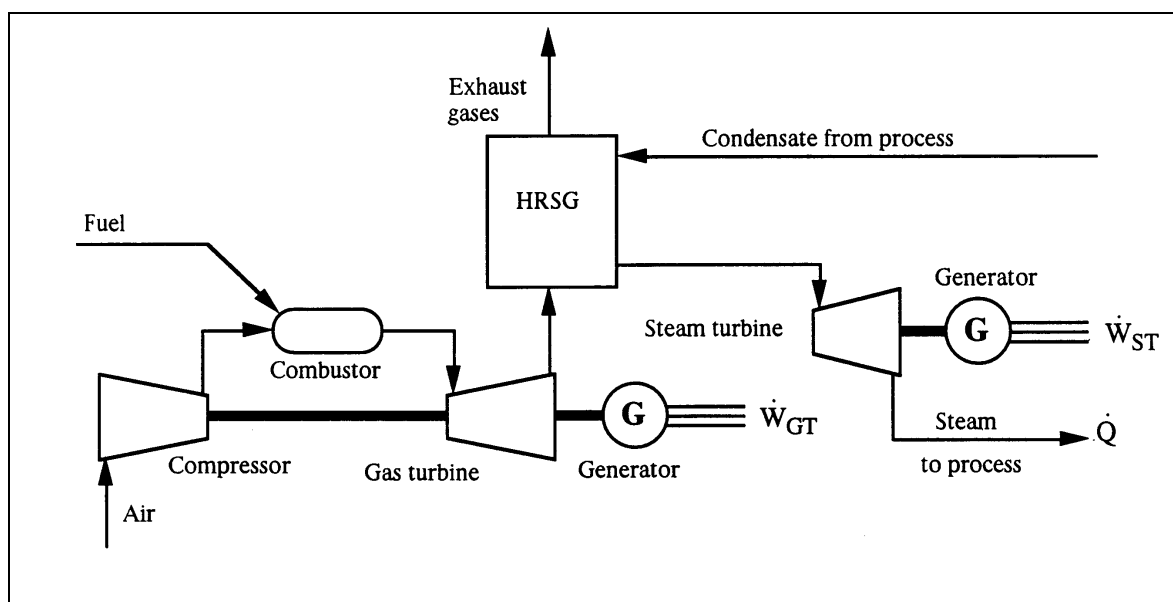
De term "gecombineerde cyclus" wordt gebruikt voor systemen die bestaan uit twee thermodynamische cycli, die gekoppeld worden door een arbeidsfluidum en werken op

verschillende temperatuurniveau's. De hoge temperatuurscyclus geeft warmte af die gerecupereerd en gebruikt wordt door de lage temperatuurscyclus om bijkomende elektrische (of mechanische) energie te leveren en op die manier het elektrisch rendement te verhogen.

3.5.1 Installaties met gecombineerde Joule-Rankine cyclus

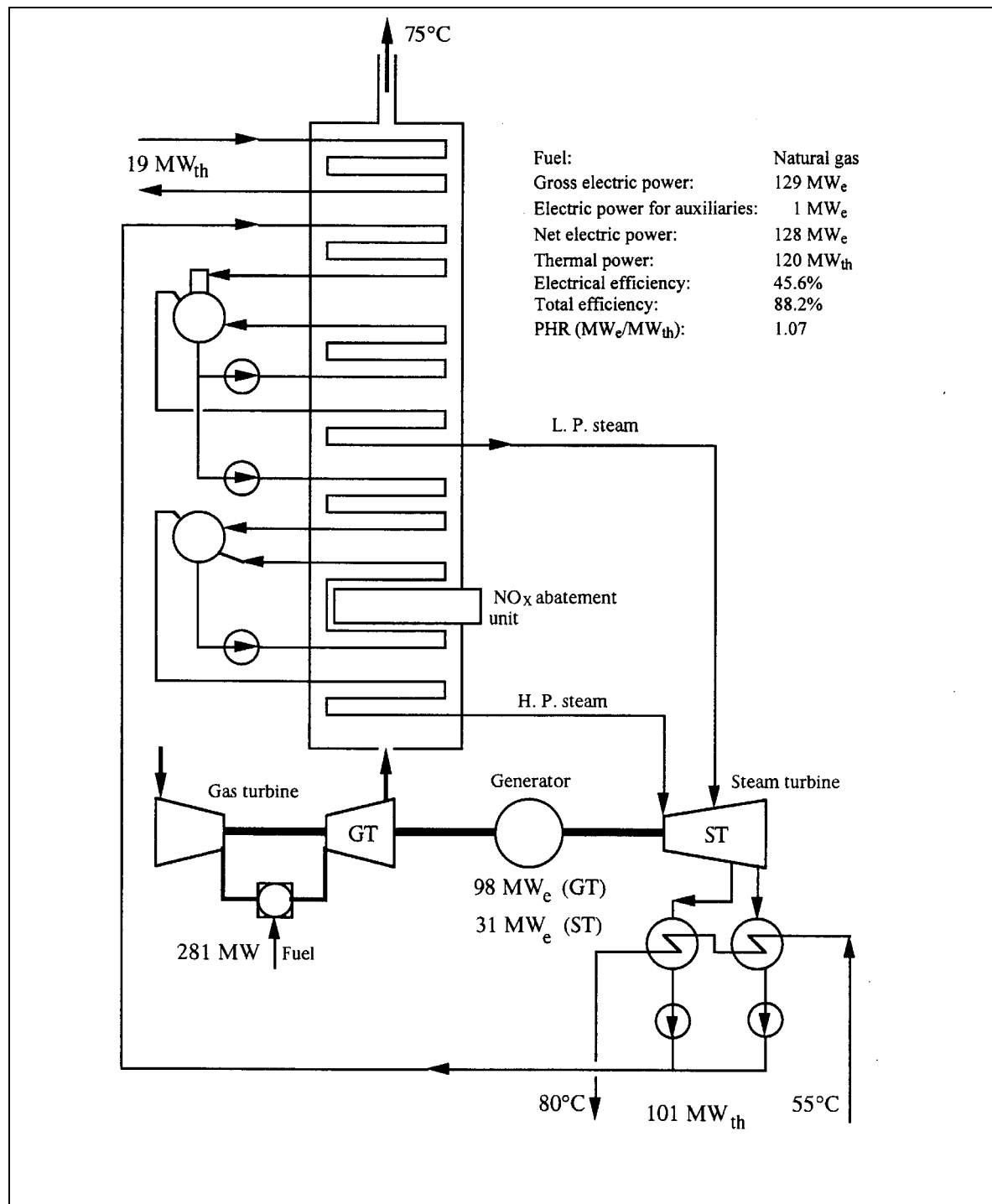
De meest gebruikte gecombineerde systemen zijn die met een gas- en stoomturbine (gecombineerde Joule – Rankine cyclus). Ze zijn zo talrijk t.o.v. andere systemen dat men bij de term "gecombineerde cyclus", zonder verdere specificaties, gewoon de gecombineerde Joule-Rankine cyclus onderstelt. Een vereenvoudigd schema met alleen de belangrijkste onderdelen is gegeven in Figuur 3.16, terwijl Figuur 3.17 in meer detail een systeem met dubbele druk boiler illustreert en zijn prestatiekenmerken geeft. Dubbele druk en drievoudige druk boilers verbeteren de warmterecuperatie en verbeteren het rendement, maar maken het systeem complexer; ze worden gebruikt in grotere systemen.

In Figuur 3.16 wordt een tegendrukstoomturbine getoond. Dit is natuurlijk niet de enig mogelijke configuratie. Een condenserende turbine is ook mogelijk, terwijl stoomaftappen ook kunnen voorkomen, zowel bij een tegendrukturbine als een condenserende turbine.



Figuur 3.16: Joule-Rankine gecombineerde cyclus met tegendruk stoomturbine

De maximaal mogelijke stoomtemperatuur, zonder bijstoken, is zowat 25-40°C lager dan de temperatuur van de uitlaatgassen aan de uitlaat van de gasturbine, terwijl de stoomdruk tot 80 bar kan gaan. Als hogere temperatuur of druk vereist zijn, wordt een boiler gebruikt met branders, die extra brandstof verbranden. Normaal gezien is er geen extra lucht nodig, omdat de uitlaatgassen al zuurstof bevatten aan een concentratie van 15-16%. Door middel van het bijstoken kan de stoomtemperatuur tot 540°C oplopen en kan de stoomdruk 100 bar overschrijden. Bijstoken verhoogt niet alleen de capaciteit van het systeem maar verbetert ook het rendement bij deellast.



Figuur 3.17: ASEA STAL gecombineerde cyclus met een condenserende stoomturbine/stoom-turbine met aftap (IEA, 1988)

Oorspronkelijk werden gecombineerde systemen ontworpen voor gemiddeld of hoog vermogen (20-400 MW). De laatste jaren is men ook begonnen met het bouwen van kleinere systemen (4-15 MW), waarbij er een tendens is om de vermogenlimiet verder te verlagen. De vermogensdichtheid (i.e. vermogen per eenheid van volume) van een gecombineerde cyclus is hoger dan die van een enkele gasturbine- (Joule) of stoomturbinecyclus (Rankine). Wat de gebruikte brandstoffen betreft, gelden diegene die vermeld werden voor gasturbines (Hoofdstuk 3.3).

De installatietijd bedraagt 2-3 jaar. Het is belangrijk om op te merken dat de installatie kan geschieden in twee fases: het gasturbinesysteem wordt eerst geïnstalleerd en kan operationeel zijn in 12-18 maanden. Terwijl de gasturbine werkt, wordt het stoomturbinesysteem geïnstalleerd.

De betrouwbaarheid van (Joule-Rankine) systemen met gecombineerde cyclus is 80-85%, de gemiddelde jaarlijkse beschikbaarheid is 77-85%, terwijl de economische levensduur 15-25 jaar bedraagt.

Het elektrisch rendement ligt in het gebied 35-45%, de totale brandstofbenutting bedraagt 70-88% en de kracht-warmteverhouding is 0.6-2.0. Het elektrisch rendement kan verder worden verhoogd; hedendaagse systemen met gecombineerde cyclus die alleen elektrische energie (geen warmte) produceren kunnen rendementen halen die 60% benaderen. Deze systemen worden echter niet als warmtekrachtkoppelingseenheid gezien.

3.5.2 Installaties met gecombineerde Diesel-Rankine cyclus

Het is ook mogelijk om een Dieselmotor met een Rankinecyclus te combineren. De opstelling is gelijkaardig met die uit Figuur 3.16 of Figuur 3.17, met dat verschil dat de gasturbine eenheid (compressor-verbrandingskamer-gasturbine) vervangen wordt door een Dieselmotor. Motoren van gemiddeld tot hoog vermogen maken het toevoegen van een Rankine cyclus economisch haalbaar.

Bijstoken in de boiler is ook hier mogelijk. Vermits de zuurstofinhoud in de uitlaatgassen van een Dieselmotor laag is, is hier wel toevoeging van lucht nodig in de verbrandingskamer van de boiler.

3.6 Warmtekrachtkoppelingseenheden met brandstofcellen

Een brandstofcel is een systeem dat via een elektrochemisch proces waterstof en zuurstof omzet in elektrische energie zonder tussenstappen van verbranding en mechanische arbeid, met water als bijproduct..

De rechtstreekse omzetting van chemische energie van een brandstof in elektrische energie d.m.v. een waterstof-zuurstofcel werd voor de eerste keer uitgevoerd door Sir William Grove in 1839. Vanaf dan werd de ontwikkeling van brandstofcellen één van de meest ingewikkelde technologische problemen. Systematisch onderzoek tijdens de laatste 30-40 jaar wierp zijn vruchten af en diverse pilootprojecten werden gebouwd. De brandstofcellen worden nog steeds gezien als een groeiende en beloftevolle technologie, zowel voor elektriciteitsopwekking als voor warmtekrachtkoppeling. Toch zijn ze op dit ogenblik nog niet doorgebroken. Er zijn wel verschillende types brandstofcellen verkrijgbaar, maar deze zijn erg duur. De beschrijving hieronder is gebaseerd op de toestand anno 2004, maar de toestand kan snel veranderen.

3.6.1 Fundamenteel werkingsprincipe van brandstofcellen

Een brandstofcel werkt fundamenteel als volgt (Figuur 3.18): elke cel bezit 2 elektroden, een positieve kathode en een negatieve anode. De elektrochemische reacties die elektriciteit produceren vinden plaats aan de elektroden. Elke cel bezit een elektrolyt dat selectief geladen deeltjes (ionen) doorlaat van de ene naar de andere elektrode, maar ondoordringbaar is voor

elektronen. Elke elektrode bevat tevens een katalysator dewelke de reacties aan de elektrodes versnelt.

Er bestaan verschillende soorten brandstofcellen die hoofdzakelijk gecatalogeerd worden volgens het type elektrolyt dat gebruikt wordt. De werking ervan kan geïllustreerd worden aan de hand van figuur 20 voor een brandstofcel van het type PEFC (Proton Exchange Fuel Cell) dat een vast polymeer membraan (Nafion b.v.) als elektrolyt bevat, en alleen permeabel is voor protonen.

Aan de anodezijde diffuseert waterstof doorheen de poreuze anode tot aan het elektrolyt waar onder invloed van een platina katalysator de waterstofmolecule zich splitst in twee protonen en twee elektronen. De anodereactie is dus:



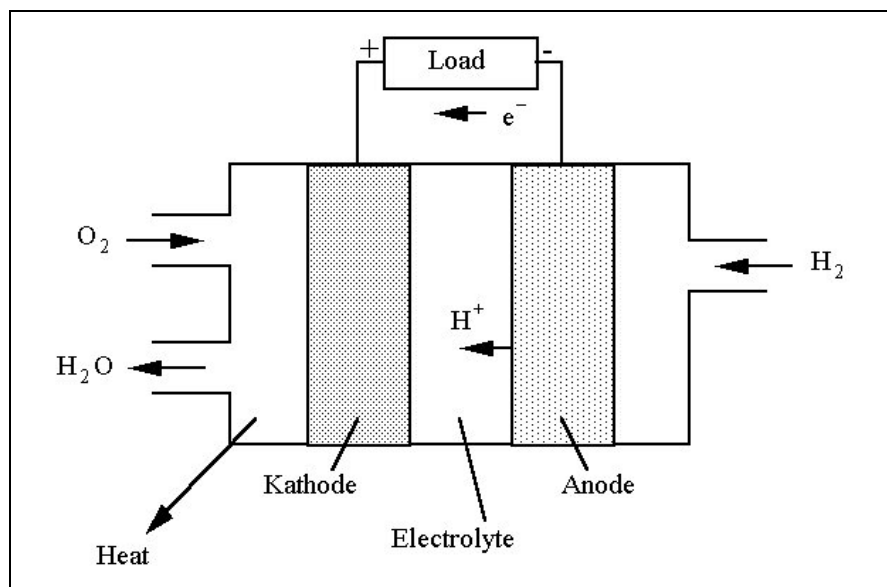
De vrije elektronen, worden via de anode over een extern circuit naar de kathode geleid onder invloed van een elektrochemisch potentieel over de elektrodes. Zodoende kunnen zij als nuttige elektrische stroom gebruikt worden. Anderzijds migreren de protonen door het elektrolyt naar de kathode. Aan de kathode recombineren de zuurstof, de protonen en de elektronen tot water, volgens volgende reactie:



Zodoende is de totale reactie de volgende:



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



Figuur 3.18: Basisprincipe van een waterstof-zuurstof brandstofcel

De vereiste waterstof wordt meestal geproduceerd uit koolwaterstoffen, doorgaans uit aardgas, d.m.v. "reforming", een proces dat zowel binnen (interne reforming) als buiten de brandstofcel (externe reforming) kan plaatsvinden, afhankelijk van het type brandstofcel (zie verder). Daar het omvormingsproces van waterstof uit diverse koolwaterstoffen spontaan verloopt boven een

temperatuur van 600°C, kunnen slechts de hoge temperatuur brandstofcellen gebruik maken van spontane interne reforming. Waterstof kan ook gevormd worden door elektrolyse van water. In verschillende types van brandstofcellen kan koolstofmonoxide gebruikt worden als brandstof in plaats van waterstof, zoals verder eveneens wordt besproken.

De vereiste zuurstof wordt meestal uit de lucht genomen die aan de anodekant wordt toegevoerd.

Een enkele cel produceert een elektrische spanning die iets lager is dan 1 Volt. Het gepaste aantal cellen in serie produceert dan de vereiste spanning, terwijl met een parallelle opstelling het vereiste vermogen wordt geproduceerd. Op die manier wordt een opeenstapeling van cellen (stack) gemaakt. Hierdoor is de ganse opstelling zeer modulair en kunnen brandstofcellen gebruikt worden in een zeer brede gamma van vermogens (van microwatt tot megawatt). Er wordt een gelijkstroom opgewekt; een (doorgaans statische) inverter wordt dan gebruikt om die gelijkstroom om te zetten in wisselstroom met de gepaste spanning en frequentie.

3.6.2 Types brandstofcellen

Verschillende onderverdelingen van brandstofcellen worden gebruikt in de literatuur. De meest duidelijke is deze op basis van het type elektrolyt. (Zie tabel 3.4)

Tabel 3: Voornaamste karakteristieken van de verschillende types brandstofcellen

Type	AFC	PEFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	KOH	Vast ion geleidend membraan	Vloeibaar H_3PO_4	Li_2CO_3 en K_2CO_3	Ceramiek $Y_2O_3ZrO_2$
werkingstemperatuur	60-90°C	80°C	200°C	650°C	800-1000°C
celrendement	45-60%	30-60%	35-40%	45-60%	45-65%
Max.Elekt.Vermogen	20kW	250kW	200kW	1MW	300 kW
Toepassingen	Onderzeeërs ruimtevaart	Transport Klein stationair	WKK	WKK	WKK

3.6.2.1 Alkaline Fuel Cells (AFC)

Kaliumhydroxide (KOH), de meest geleidende van alle alkaline hydroxiden, is hier het elektrolyt, met een concentratie van ongeveer 30%. Zuivere waterstof is de brandstof en zuivere zuurstof of lucht is het oxidans. AFC's werken op een temperatuur van 60-90°C. Daarom worden ze lage temperatuur brandstofcellen genoemd. De werkdruk bedraagt in sommige gevallen een paar atmosfeer, maar meestal is het gewoon de atmosferedruk.

AFC's werden gebruikt in de Apollo-missie van de NASA. Ze worden vandaag vervangen door de PEFC brandstofcellen. Immers de AFC vergt uiterst zuivere waterstof en zuurstof om de katalysator en het elektrolyt niet te beschadigen. Onderzoek en ontwikkeling van AFC brandstofcellen is op dit ogenblik zeer beperkt.

3.6.2.2 Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC)

Deze zijn ook gekend als Polymer Electrolyte Membranes (PEM). Het elektrolyt bestaat hier uit een vast membraan van polymeer, dat gespannen wordt tussen twee poreuze elektroden, met platina als katalysator. De werkingstemperatuur bedraagt ongeveer 80°C en de werkdruk is 1-8 atm. PEFC eenheden met een vermogen tot 1 kW zijn verkrijgbaar op de markt. Prototypes van PEM voor industriële toepassingen (250 kWe) zijn thans in een testfase.

Omwille van de lage werkingstemperatuur, en dus de snelle vermogenaanpassing, is dit type de voornaamste kandidaat voor transportdoeleinden (Auto's, bussen), maar de lage werkingstemperatuur vereist externe reforming voor de productie van waterstof uit aardgas. De trend tegenwoordig is het opslaan van waterstof aan boord van het voertuig onder diverse vormen (Vloeibaar, hoge druk, metaalhydriden)

3.6.2.3 Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)

PAFC's zijn op dit moment de meest geavanceerde brandstofcellen voor toepassing op aarde. Ingepakte eenheden van 200 kW_e zijn commercieel verkrijgbaar voor elektriciteitsopwekking of warmtekrachtkoppeling.

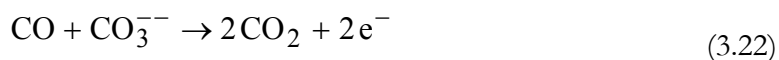
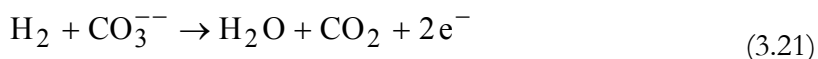
Fosforzuur (H₃PO₄) is het elektrolyt. Waterstof wordt geproduceerd door een externe omvormer uit brandstoffen als aardgas of methanol. Lucht is het oxidant. De werkingstemperatuur bedraagt zowat 200°C, wat PAFC's aantrekkelijk maakt voor warmtekrachtkoppelingssystemen, vooral in de tertiaire sector.

Dit type brandstofcel werd vooral gebruikt om de technologische haalbaarheid van brandstofcellen voor WKK doeleinden te demonstreren. Er zijn momenteel meer dan 200 eenheden operationeel. Omwille van de hoge kostprijs, zonder vooruitzicht op lagere systeemkost, is de economische haalbaarheid in de toekomst uitgesloten, en besloten de voornaamste constructeurs de productie ervan te stoppen voor WKK doeleinden.

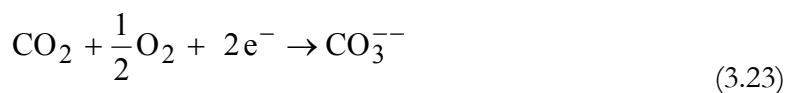
3.6.2.4 Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)

Gesmolten alkali koolstof mengsel, vastgehouden in een poreuze lithium aluminaat matrix, wordt gebruikt als elektrolyt. Het eutectische mengsel bevat 68% Li₂CO₃ en 32% K₂CO₃, dat bij de werkingstemperatuur van 600-700°C in vloeibare fase is. De brandstof bestaat uit een gasvormig mengsel van H₂, CO en CO₂, dat bekomen wordt uit de reforming van koolwaterstoffen als aardgas, of door vergassing van kolen. De hoge temperatuur maakt interne reforming mogelijk. Voor de reforming wordt de warmte gebruikt die door de brandstofcel zelf wordt vrijgegeven. De volgende reacties vinden plaats:

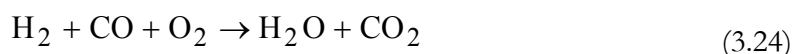
Anode:



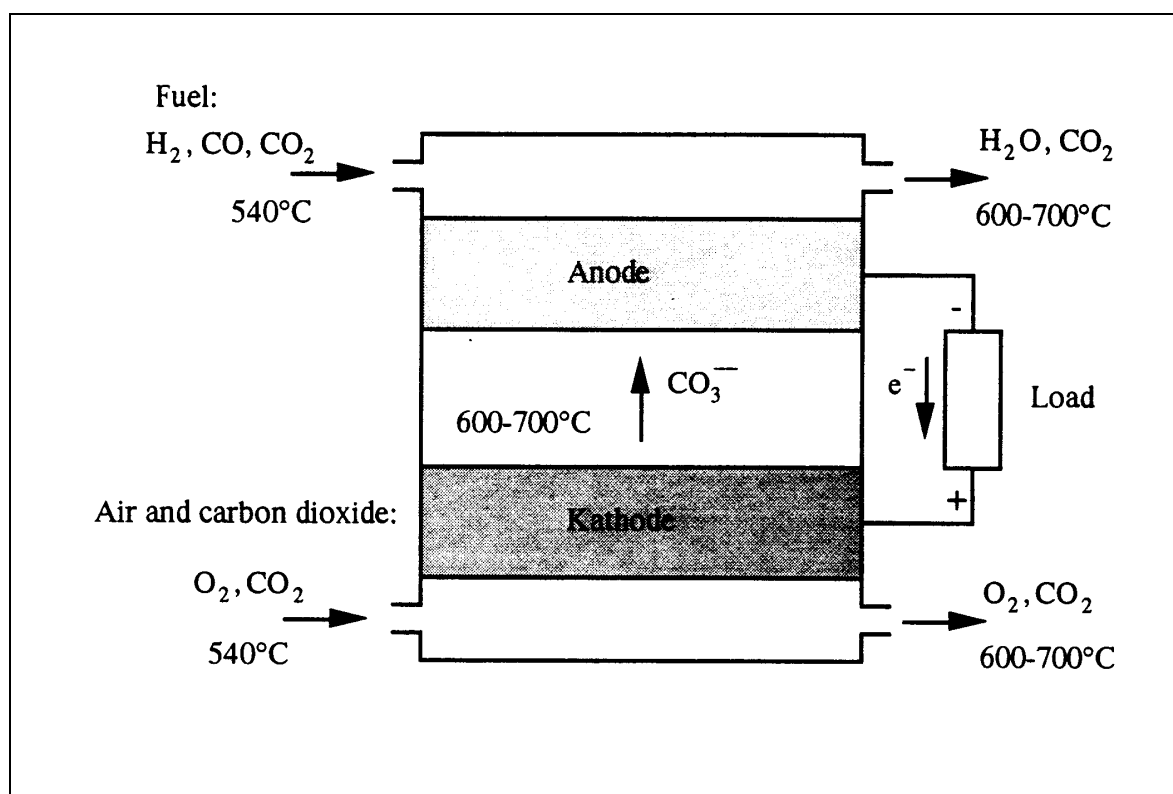
Kathode:



Totale reactie:



Koolstofatomen worden getransporteerd door het elektrolyt. Opdat de ionenstroom in stand wordt gehouden, wordt constant koolstofdioxide toegevoegd met lucht met molaire fractie O₂/CO₂ gelijk aan 1/2. De noodzaak hiervan maakt het systeem en het proces complexer. Er is echter geen nood aan externe reforming: als bvb. aardgas gebruikt wordt als brandstof, worden katalysatoren in de voedingspijpen toegevoegd, die de voorverwarmde (door warmte die vrijkomt uit het systeem) brandstof reformeren.



Figuur 3.19: Basisprincipe van een MCFC

MCFC's hebben goede vooruitzichten wat betreft middelgrote en grote toepassingen (orde van MW) in de industrie en de nutssector. Rendementen van hoger dan 50% worden verwacht. De beschikbare warmte, op hoge temperatuur, kan gebruikt worden in een thermisch proces (warmtekrachtkoppeling) of voor extra elektriciteitsproductie via een Rankine-cyclus. Experimentele eenheden van 250 kWe zijn verkrijgbaar, maar de MCFC technologie is nog steeds in een ontwikkelingsfase.

3.6.2.5 Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

De SOFC is een systeem dat volledig in vaste toestand is, dat gebruik maakt van $\text{Y}_2\text{O}_3\text{ZrO}_2$, een keramisch materiaal, als elektrolytische laag. Het werkt op 800-1000°C. Zuivere waterstof of waterstof uit koolwaterstoffen (bv aardgas) wordt gebruikt als brandstof, en het wordt geproduceerd door interne reforming van koolwaterstoffen of door vergassing van kolen.

Als zuivere waterstof de brandstof is, zijn de reacties als volgt:

Anode:



Kathode:

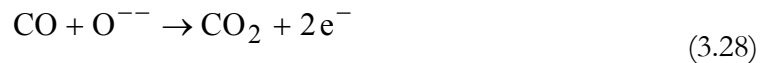


Totale reactie:



Als een mengsel van H_2 en CO wordt gebruikt, vinden volgende interne reforming reacties plaats:

Anode:



Kathode:

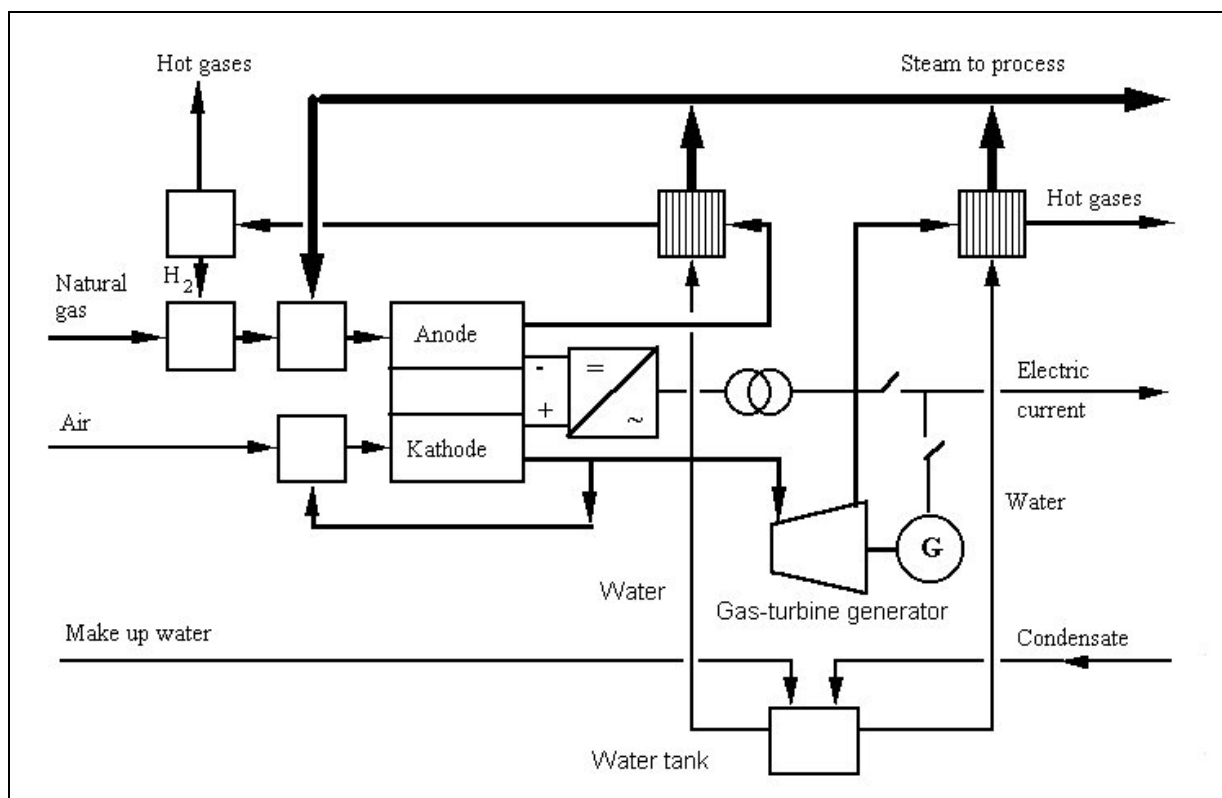


Totale reactie:

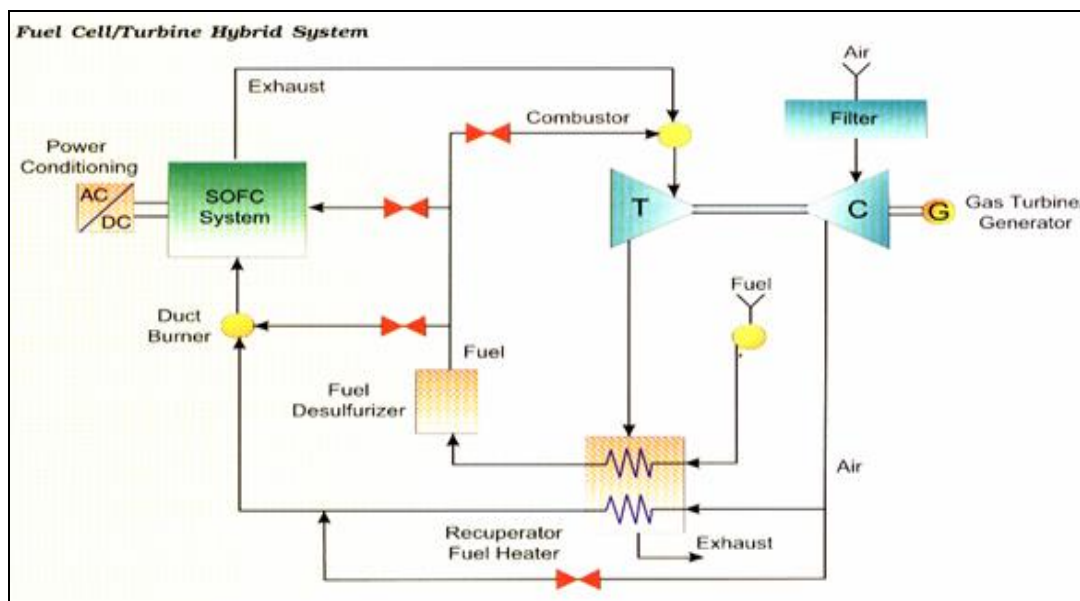


In het geval van een SOFC, is er geen recirculatie van de CO_2 van de anode naar de kathode.

Ook SOFC's geven goeie vooruitzichten voor de middelgrote en grote toepassingen (orde van MW) in de industrie en de nutssector met rendementen die hoger liggen dan 50%. Het systeem levert restwarmte van hoge kwaliteit, die ideaal is voor warmtekrachtkoppeling of extra elektriciteitsproductie. Het wordt overwogen om eenheden met een vermogen van enkele MW te gebruiken in combinatie met een gasturbine - stoomturbine gecombineerde cyclus: hete gassen die de cellen verlaten, drijven een gasturbine aan. Na het verlaten van de gasturbine, passeren de gassen door een boiler die stoom produceert voor thermische processen of extra vermogen in een stoomturbine. Conceptuele toepassingen van dit type worden getoond in Figuur 3.20 en Figuur 3.21.



Figuur 3.20: Warmtekrachtkoppelingsinstallatie met SOFC voor toepassing in de tertiaire sector



Figuur 3.21: Hybride concept van een SOFC brandstofcel op druk met een gasturbine (Concept Westinghouse).

3.6.3 Thermodynamische prestaties van brandstofcellen

Het rendement van elektriciteitscentrales op een thermodynamische cyclus, heeft een maximale waarde, die gelijk is aan het Carnotrendement. Deze limiet is bvb. voor een Rankine cyclus met een maximale stoomtemperatuur van 540°C en werkend op een omgevingstemperatuur van 25°C, gelijk aan 63.3%. Brandstofcellen zetten de chemische energie van de brandstof rechtstreeks om in elektriciteit, zonder interventie van een vermogencyclus. Daarom is het Carnotrendement niet toepasbaar en kan het rendement theoretisch zeer hoge waarden bedragen..

In de praktijk zijn er verschillende verliezen in de componenten van het brandstofcelsysteem, zoals de brandstofreformer, de opeenstapeling van cellen, de invertor en de hulptoestellen, die het globale systeemrendement verlagen.. Het elektrisch rendement van PAFC's die commercieel verkrijgbaar zijn, is 37-45% en het hangt af van de kwaliteit van de brandstof en de werkingomstandigheden. Bij 50% van het nominaal vermogen is het rendement gelijk aan, en soms zelfs hoger dan, dat bij vollast. De totale brandstofbenuttingsgraad van de warmtekrachtkoppelinginstallatie bereikt 85-90%, de kracht-warmteverhouding ligt in het gebied 0.8-1.0.

Als de technologie zich verder ontwikkelt, in het bijzonder voor de MCFC's en de SOFC's, worden elektrische rendementen verwacht van meer dan 50%. Geïntegreerd met een gecombineerde cyclus met gas- en stoomturbine, wordt verwacht dat MCFC's een elektrisch rendement zullen halen van 55-60%, en voor systemen met SOFC's wordt zelfs een elektrisch rendement van 60-65% verwacht.

3.6.4 Toekomstperspectieven van brandstofcellen

Het veelbelovende vooruitzicht van brandstofcellen als efficiënt middel om elektriciteit te produceren, door oxidatie van brandstof, werd reeds van bij het begin ingezien. De belangrijkste voordelen zijn de volgende:

- Hoog elektrisch rendement ook bij deellast.
- Modulaire constructie, wat het eenvoudig maakt om eenheden te bouwen die een bepaald gewenst vermogen moeten leveren, en dus een potentieel economisch voordeel bij productie op grote schaal van identieke cellen.
- Brandstof flexibiliteit: Afhankelijk van het type brandstofcel, kunnen diverse koolwaterstoffen gebruikt worden als brandstof (Diesel, benzine, aardgas, biogas...)
- Lage vervuilende emissies van SO_x (Zwavel moet uit de brandstof geëlimineerd worden om de katalysator niet te vergiftigen) en NO_x (daar er geen verbrandingsproces met lucht plaats grijpt). De uitstoot van broeikasgassen (bij koolwaterstoffen als brandstof) is ook lager, omwille van het hoger elektrisch rendement.
- Omwille van het gebrek aan bewegende delen, belooft de brandstofcel een grote duurzaamheid en betrouwbaarheid, met zeer lage geluidshinder die enkel afkomstig is van de draaiende onderdelen van de hulpdiensten (compressor, pompen, turbine, enz)

De lage emissie en het lage geluidsniveau maken brandstofcellen zeer geschikt voor toepassingen in de residentiële en tertiaire sector (huizen, kantoor, hospitalen, hotels, etc.). De belangrijkste nadelen zijn de hoge installatiekosten en de relatief korte levensduur. Onderzoek en ontwikkeling om verschillende technologische problemen op te lossen worden voortgezet. Aan de andere kant wordt verwacht dat de installatiekosten zal dalen door het gebruik van goedkopere materialen en massaproductie. Op dit ogenblik vormt de kostprijs van een brandstofcel (boven de €5000/kWe) de grootste belemmering voor de doorbraak ervan en zijn staatssubsidies onontbeerlijk om deze drempel weg te werken.

3.7 Warmtekrachtkoppelingsinstallaties met Stirlingmotoren

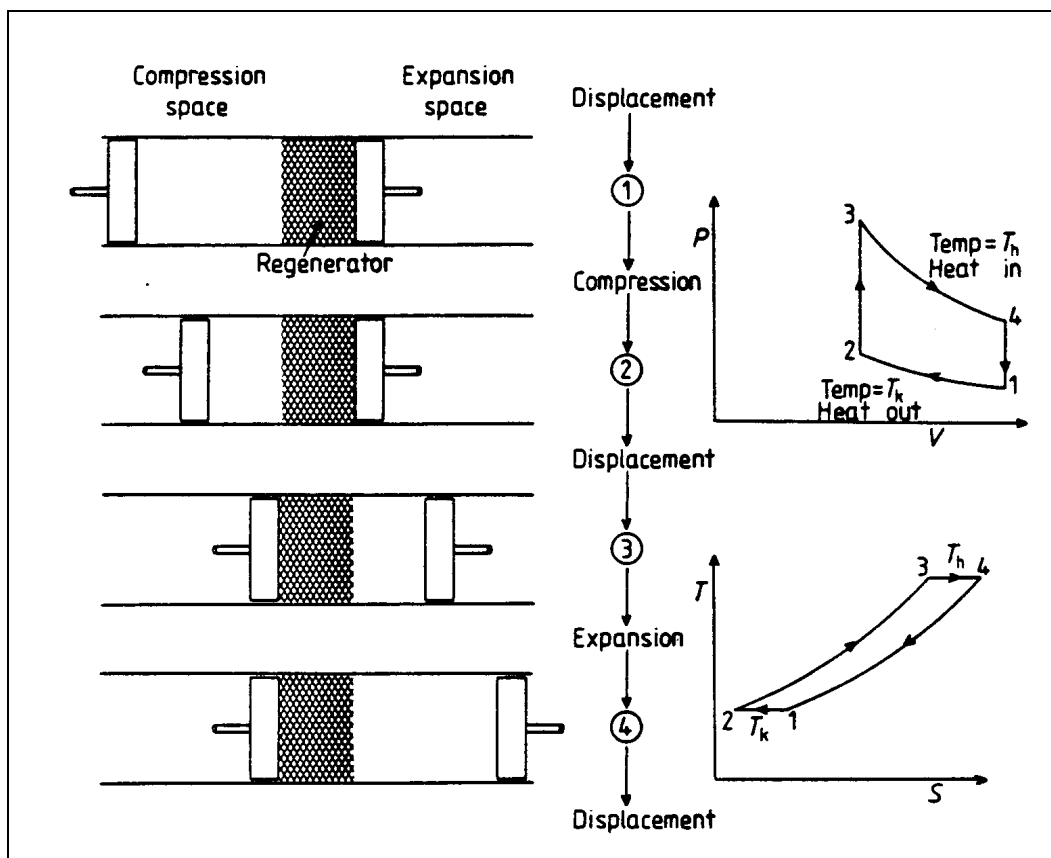
Warmtekrachtkoppeling is ook mogelijk met Stirlingmotoren. Deze technologie is nog niet volledig ontwikkeld en wordt nog niet vaak toegepast, maar er is een stijgende interesse, omwille van een aantal voordelen: het vooruitzicht van een hoog rendement, goede prestaties bij deellast, flexibiliteit wat de brandstof betreft, lage emissie, weinig trillingen en lawaaihinder.

3.7.1 Basisprincipes van Stirlingmotoren

Robert Stirling, een Schotse predikant, kreeg een patent voor de eerste Stirlingmotor in 1816. Het was één van de meest verbazingwekkende uitvindingen van zijn soort, ver vooruit op alle wetenschappelijke kennis van toen. Wat dat betreft, is het de moeite waard om te vermelden dat Sadi Carnot zijn "Reflections on the motive power of fire" publiceerde in 1824, en dat Joule de equivalentie van mechanische energie en warmte poneerde, en zo de basis legde voor de Eerste Wet van de Thermodynamica, in 1849.

De ideale Stirling cyclus, die reversibel is, kan beschreven worden m.b.v. Figuur 2.22. De posities van de zuigers worden getoond bij de vier uiterste punten in de cyclus, als die voorgesteld wordt in het druk-volumediagram of het temperatuur-entropiediagram. Proces 1-2 is een isotherme compressie, tijdens dewelke warmte wordt onttrokken uit de motor op de temperatuur van de koudebron. Proces 3-4 is een isotherme expansie, tijdens dewelke warmte aan de motor wordt toegevoegd op de temperatuur van de warmtebron. Processen 2-3 en 4-1 zijn verplaatsingsprocessen op constant volume, waarin het arbeidsgas (meestal lucht of helium) door

de regenerator passeert. Gedurende het proces 4-1 geeft het gas zijn warmte af aan de regeneratiematrix, en tijdens het proces 2-3 neemt het gas die warmte weer op uit deze regenerator. De regenerator verhoogt het rendement van de cyclus. Het bestaat uit een fijnmazige matrix met poreus metaal, of eenvoudigweg metalen oppervlakken die een ringvormige opening omsluiten.

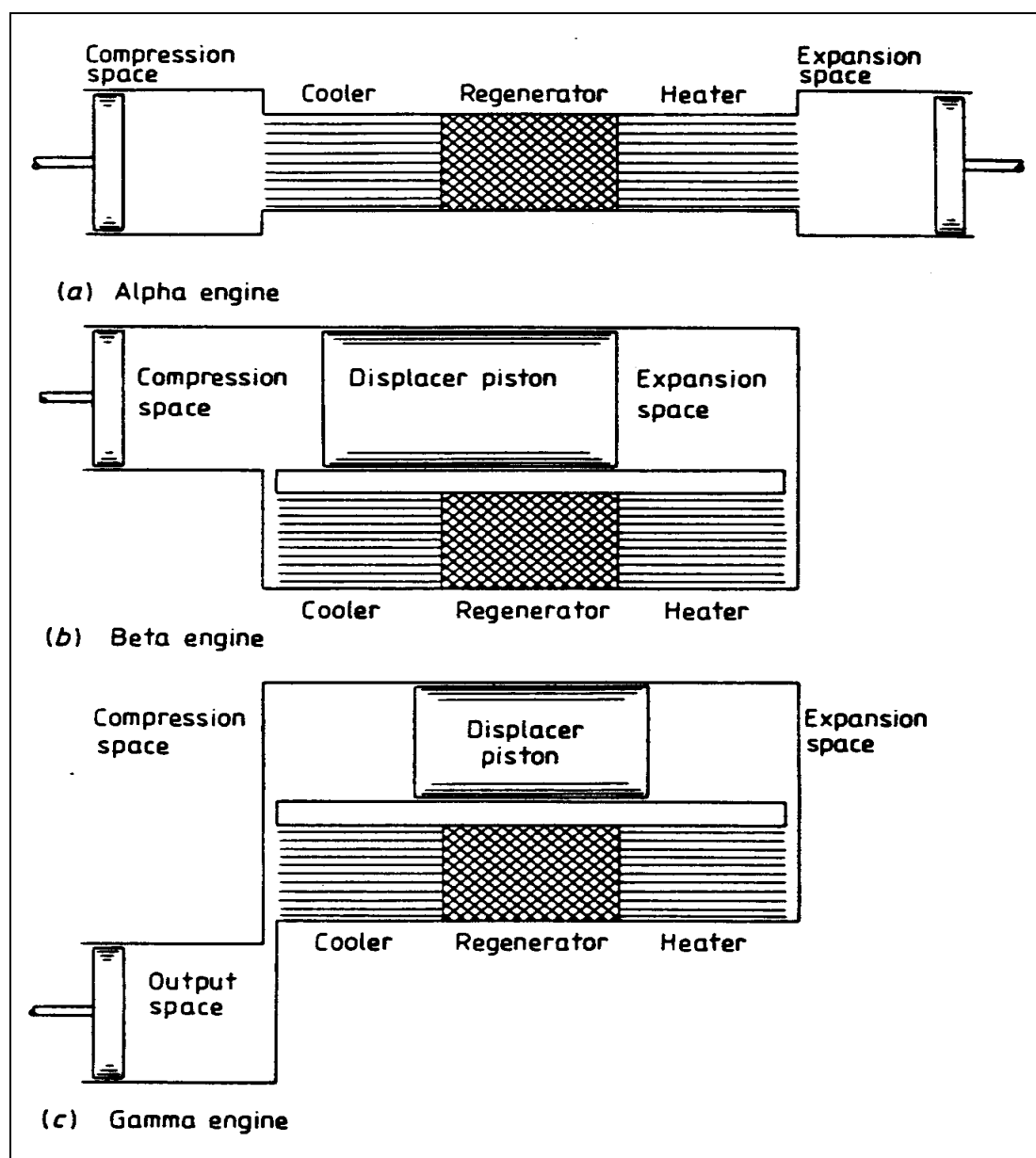


Figuur 3.22: De ideale Stirlingcyclus (Urieli en Berchowitz, 1984)

De externe warmtebron laat toe een groot aantal brandstofsoorten te gebruiken: vloeibare of gasvormige brandstoffen, kolen, producten die het resultaat zijn van het vloeibaar maken of vergassen van kolen, biomassa, stadsafval, etc. Het is mogelijk om van brandstof te veranderen tijdens de werking, zonder dat moet gestopt worden of aanpassingen aan de motor moeten worden gedaan. Nucleaire energie of zonne-energie kunnen ook als warmtebron fungeren.

3.7.2 Configuraties van Stirlingmotoren

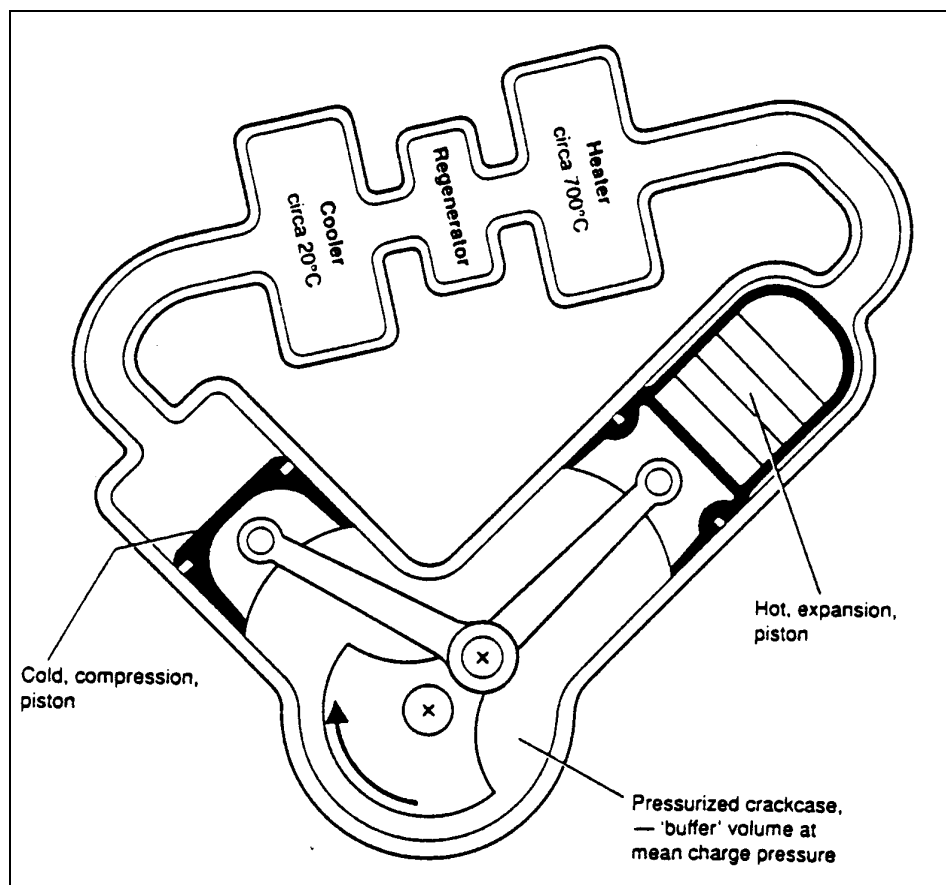
Mogelijke configuraties voor Stirlingmotoren worden doorgaans onderverdeeld in drie groepen: alfa, beta en gamma opstellingen (Figuur 3.23). Alfa motoren hebben twee zuigers in aparte cilinders, die in serie verbonden zijn met een verwarmers, regenerator en koeler. Zowel beta- als gamma-uitvoering gebruiken een opstelling waarbij een zuiger dienst doet als displacer, en dus enkel de stroming van het werkfluidum in de machine bepaalt, terwijl de andere zuiger arbeid levert en ontvangt (power piston). Bij de beta-uitvoering zitten displacer en power piston in dezelfde cilinder, terwijl in de gamma-opstelling motor aparte cilinders worden gebruikt (Figuur 3.23). Een doorsnede van een alfa-uitvoering van een Stirlingmotor wordt getoond in Figuur 3.24.



Figuur 3.23: Classificatie van Stirling motoren (Urieli en Berchowitz 1984)

Aandrijfmethoden worden ruwweg onderverdeeld in twee groepen: de kinematische aandrijving en de aandrijving met de vrije zuiger. Kinematische aandrijvingen kunnen gedefinieerd worden als een serie mechanische elementen, zoals krukken, verbindingstaven en vliegwielen, die samen bewegen en de arbeidsvolumes volgens een voorgeschreven manier laten variëren. Ze worden beschouwd als het conventionele ontwerp. Aan de andere kant zijn er de aandrijvingen met vrije zuiger, die de drukvariaties van het arbeidsgas gebruiken om zuigerelementen te verplaatsen, waarbij vermogen wordt afgegeven door bijvoorbeeld een lineaire alternator.

Alfa opstellingen worden doorgaans 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 een extreem hoog specifiek vermogen te verkrijgen.



Figuur 3.24: Stirlingmotoren van het Alfa-type (SES 1993)

De alfa-opstelling is de klassieke configuratie van een Stirlingmotor en is ook de originele opstelling. De motoren met vrije zuigers die uitgevonden en ontwikkeld werden door William Beale aan de Universiteit van Ohio in de late jaren 60 zijn van het beta-type [Lane en Beale, 1996]. Gamma-motoren hebben doorgaans een ietwat grotere dode zone dan de alfa- of beta-varianten. Dat leidt vaak tot een daling van het specifiek vermogen. Daarom worden ze enkel gebruikt wanneer het voordeel van verscheidene aparte cilinders doorweegt t.o.v. het nadeel van vermogendaling.

3.7.3 Ontwikkelingen in Stirling-technologie

Oorspronkelijk waren onderzoek en ontwikkeling gericht op automotoren met een vermogen van 3-100 kW. Daarna werden de inspanningen verlegd naar motoren met een vermogen van 1-1.5 MW met een verwachte levensduur van 20 jaar. Vermits de technologie nog in zijn ontwikkelingsfase is, zijn er geen statistische gegevens wat betreft betrouwbaarheid en beschikbaarheid, maar er wordt verwacht dat ze vergelijkbaar zijn met die van Dieselmotoren. Het arbeidsgas werkt in gesloten cyclus en neemt niet deel aan de verbranding. Zodoende worden de bewegende onderdelen van de motor niet blootgesteld aan verbrandingsprodukten. Hun slijtage is dus lager in vergelijking met een motor met interne verbranding. Er zijn echter speciale voorzieningen nodig om lekken te vermijden van het arbeidsgas op hoge temperatuur en dus verlies aan de omgeving, en ook om te vermijden dat smeerolie uit het carter zou terechtkomen aan de binnenkant van de cilinder. Eén van de technologische moeilijkheden op dit moment is de constructie van een effectieve dichting met lange levensduur.

De motor met vrije zuiger, hierboven vermeld, is ontwikkeld als oplossing voor het dichtingsprobleem. De vrije zuiger, met een lineaire alternator, kan hermetisch afgedicht worden om het arbeidsgas voor lange tijd te bevatten en het arbeidsgas zelf werkt als smeermiddel. De power piston voert een harmonische trilling uit, die een compressie-expansie van het gas tot gevolg heeft, terwijl een displacer ervoor zorgt dat het gas tussen de koude en warme warmtewisselaars wordt verplaatst. Op dit moment is het vermogen van zulke motoren beperkt tot enkele tientallen kW. De eigenschappen ervan zijn zeer geschikt voor micro-warmtekrachtkoppelingsinstallaties.

3.7.4 Prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met Stirlingmotoren

De Stirlingcyclus kan hogere rendementen bereiken dan de Joule of Rankine cyclus, omdat het dichters de Carnotcyclus benadert. Op dit ogenblik ligt het elektrische rendement in de buurt van 40% en er wordt een stijging verwacht tot het niveau van 50%. In het bijzonder hebben motoren met vrije zuiger, voor kleine warmtekrachtkoppelingsinstallaties, een elektrische rendement van 30-35%. De totale brandstofbenuttigingsgraad van een warmtekrachtkoppelingsinstallatie met Stirling-motor ligt in het bereik van 65-90% en de warmte-krachtverhouding bedraagt 0.8-1.7.

Goed ontworpen Stirling motoren hebben twee vermogenpulsen per omwenteling; bovendien is de verbranding continu. Hierdoor lopen ze heel zacht, met een trillingsniveau dat lager ligt dan dat van een zuigermotor met interne verbranding. De continue externe verbranding zorgt ook voor een lagere emissie en voor minder lawaaihinder, en maakt het mogelijk een grote verscheidenheid aan brandstoffen te verbranden.

Voor residentiële toepassingen bestaan kleine stirlingmotoren (enkele kW) die ingebouwd worden in een klassieke verwarmingsketel. De totale brandstofbenuttigingsgraad van het systeem is dan gelijk aan het rendement van een dergelijke, klassieke ketel. Elektrische rendementen zijn in dit geval laag (10-15%), zodat eerder lage kracht-warmteverhoudingen bekomen worden.

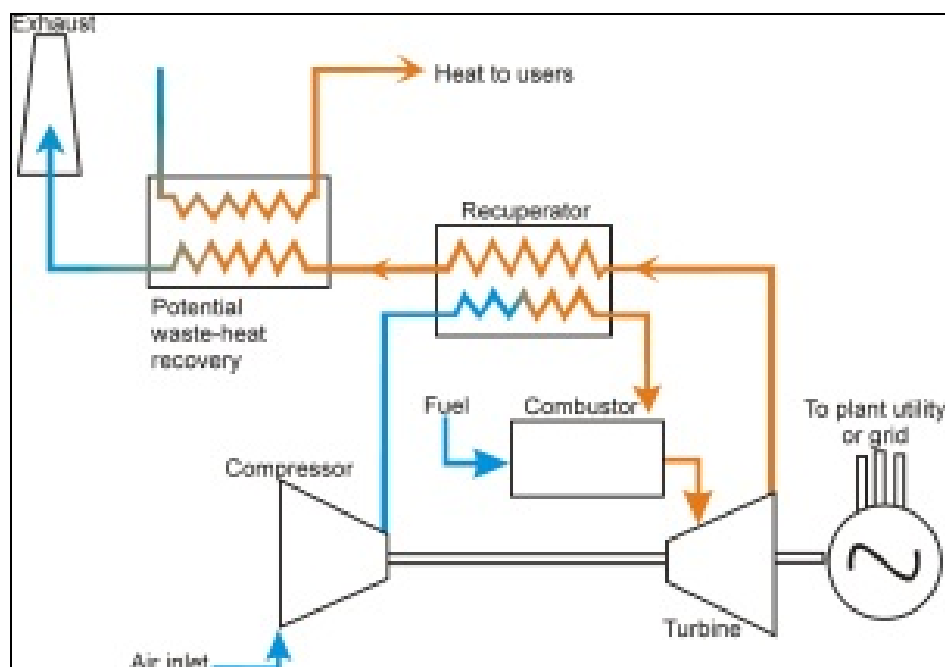
3.8 Warmtekrachtinstallaties met microturbines

Microturbines verschillen in feite weinig van de klassieke, grote gasturbine, 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 daarna verder verhit in een verbrandingskamer, waar een brandstof – meestal gas – wordt verbrand. De rookgassen die aldus ontstaan worden daarna geëxpandeerd over een turbine. Op deze manier wordt arbeid geleverd, enerzijds voor de aandrijving van de compressor en anderzijds voor de productie van elektriciteit via de alternator. Deze typische gasturbinecyclus wordt ook Brayton-cyclus genoemd.

Er zijn natuurlijk ook wel verschillpunten tussen microturbines en grote turbines. De vermogensgroottes liggen uiteraard een stuk lager: de microturbine is beschikbaar voor elektrische vermogens van 25 tot 250 kWe.

3.8.1 Werkingsprincipe van microturbines

Een microturbine beschikt, om een voldoende hoog elektrisch rendement te halen, meestal over een recuperator, waarin de gecomprimeerde lucht, alvorens naar de verbrandingskamer te stromen, wordt opgewarmd met behulp van de hete rookgassen die de turbine verlaten. Figuur 3.25 illustreert dit.



Figuur 3.25: Schematische voorstelling van een microturbine

Meestal werkt een microturbine bij zeer hoge toerentallen. Hierdoor wordt de wisselstroomgenerator meestal niet direct door de as van de turbine aangedreven, maar wordt gebruik gemaakt van een gelijkspanningsgenerator en vermogenselektronica om de gelijkspanning vervolgens om te zetten naar wisselspanning met de gewenste frequentie.

In vergelijking met de klassieke technologie in het bereik van de kleine vermogens, namelijk de kleine gasmotor, biedt de microturbine enkele interessante voordelen. Alle warmte wordt in een microturbine immers via de rookgassen beschikbaar gesteld. Dit maakt dat er slechts één warmtewisselaar nodig is, en dat het bovendien eenvoudiger wordt om de warmte te benutten. Ook wordt het mogelijk om een deel of zelfs alle warmte op te wekken onder de vorm van stoom. Een gasmotor stelt daarentegen warmte vrij op verschillende plaatsen en verschillende temperatuurniveaus. Dit maakt het benutten ervan veel complexer, en zorgt ervoor dat warmteproductie onder de vorm van stoom beperkt is. Doordat microturbines werken bij een grote luchtvermaat (meer lucht dan nodig voor de verbranding van de brandstof), is het bovendien mogelijk om na de turbine bij te stoken en aldus de warmteproductie op te drijven. Hoewel technisch niet helemaal onmogelijk, wordt dit slechts zeer zelden toegepast bij motoren.

Daarnaast scoort de microturbine op gebied van emissies ook beter dan de gasmotor met hetzelfde vermogen. Dit komt onder meer door het continue verbrandingsproces in de turbine. Hierdoor worden immers koude zones met onvolledige verbranding vermeden, wat de uitstoot van koolwaterstoffen beperkt. De grote luchtvermaat zorgt ervoor dat ook de emissies van NO_x en SO_x beperkt worden.

Een derde voordeel van de microturbine is de lage onderhoudskost, veroorzaakt door het geringe aantal bewegende onderdelen. In veel gevallen zijn naast compressor en turbine immers ook de generatoren direct op de as gekoppeld. Sommige microturbines kunnen bovendien volledig olievrij werken. Daarnaast treden ook weinig trillingen op, en is het geluidsspectrum makkelijk te dempen.

Ook de brandstofflexibiliteit is een voordeel van de microturbine. In tegenstelling tot de klassieke gasmotor, waar klopgevaar bestaat, kan de microturbine immers goed overweg met brandstoffen met een lagere of niet constante energie-inhoud. Gassen met een methaangehalte vanaf 30% kunnen door de microturbine probleemloos verbrand worden. Dit betekent dat met microturbines de stortgaswinning uit stortplaatsen langer kan geëxploiteerd worden, en dat microturbines ook in andere biogastoepassingen interessant kunnen zijn.

Ook naar investeringskost heeft de microturbine het niveau van de gasmotor (van hetzelfde vermogen) bereikt. Geen van beide technologieën is goedkoop, maar ze zijn onderling wel vergelijkbaar qua prijs.

Microturbines kunnen voornamelijk toegepast worden voor de verbranding van biogas, de exploitatie van stortplaatsen, de toepassingen met rookgasreiniging in de tuinbouw, en in bedrijven met een vraag naar stoom op relatief hoge druk. In deze gevallen kan de microturbine ook voor een ketel geschakeld worden.

3.8.2 Thermodynamische prestaties van warmtekrachtkoppelingsinstallaties met microturbines

Het elektrisch rendement, en ook de totale brandstofbenuttigingsgraad van een microturbine met recuperator ligt een fractie lager dan dat van een gasmotor van hetzelfde vermogen. Dit is zeker het geval indien een gascompressor nodig is om de brandstof te comprimeren alvorens ze in de verbrandingskamer kan gebracht worden. Zonder recuperator ligt het elektrisch rendement nog lager, terwijl de totale brandstofbenuttigingsgraad grosso modo gelijk blijft.

In vergelijking met grotere gasturbines, zoals hiervoor beschreven, ligt het elektrisch rendement beduidend lager. Algemeen neemt het elektrisch rendement van een gasturbine toe naarmate de drukverhouding en de turbine-inlaat temperatuur (TIT) hoger liggen.

Echter, een hoge drukverhouding vereist een complexere machine met meerdere compressiestappen, hetgeen vermeden dient te worden bij de microturbine. Bovendien wordt de relatieve invloed van lekken bij hoge drukverhoudingen in kleine machines erg groot. Daarom kiest men in microturbines voor een lagere drukverhouding, wat resulteert in een lager rendement. Ook de TIT, wat de hoogste temperatuur in de cyclus is, ligt bij een microturbine lager dan bij een grote turbine. Om de hoge waarden van de grotere turbines (1100-1300°C) te halen, is immers een complexe schoepenkoeling nodig, dewelke praktisch bijna niet kan toegepast worden in kleine machines. Daarom bedraagt de TIT in een microturbine typisch 800°C. Dit alles verklaart het lage rendement van de microturbine zonder recuperator, dat in de orde van 15% ligt.

De microturbine is ook een relatief nieuwe technologie, waarvoor nog geen uitgebreide ervaringsgegevens in verband met degradatie en betrouwbaarheid beschikbaar zijn. Nochtans zijn de resultaten behaald met de eerste projecten in het buitenland positief.

3.9 Warmtekrachtinstallaties met Organic Rankine Cycle

Organic rankine cycle-installaties zijn in wezen slechts een variant op de klassieke stoomturbine-installaties. Zoals eerder vermeld, werken installaties met stoomturbine volgens de rankine-cyclus. In een klassieke rankinecyclus is het arbeidsmedium water, dat verdampt door warmtewisseling op hoge temperatuur (500°C of hoger).

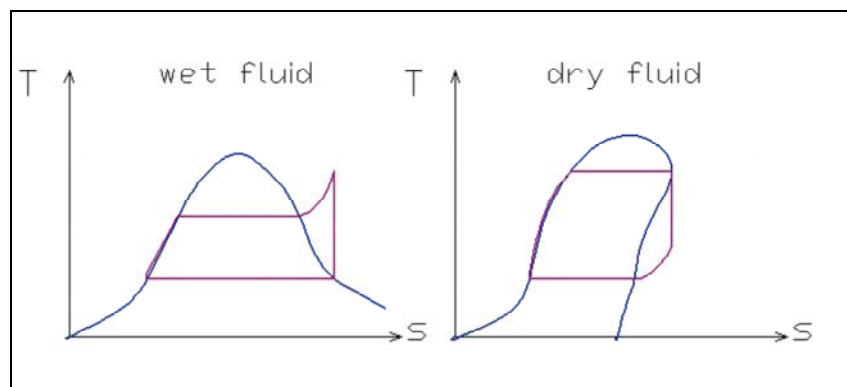
Wanneer de warmte echter beschikbaar is op lagere temperatuur (80-300°C), kunnen in plaats van water organische vloeistoffen met lage verdampingstemperatuur gebruikt worden, zoals toluen, waardoor de warmterecuperatie en de prestaties van het systeem worden verbeterd. ORC's kunnen ook gebruikt worden in geothermische toepassingen, waar alleen warmte op lage temperatuur aanwezig is. In bepaalde gevallen kan het arbeidsmedium samengesteld zijn uit twee vloeistoffen zoals bv. water en ammoniak, waardoor het cycluserendement wordt verbeterd.

Organische vloeistoffen hebben enkele nadelen in vergelijking met water:

- ze zijn duurder dan water, en vloeistofverlies kan een belangrijke extra kost betekenen.
- Vloeistoffen als toluen worden beschouwd als gevaarlijke stoffen en moeten dus ook zo behandeld worden. Veiligheidsvoorzieningen en gebruikssystemen kunnen de kosten van een ORC verhogen.
- De thermische stabiliteit van bepaalde organische vloeistoffen blijkt beperkt te zijn
- De lagere verdampingswarmte in vergelijking met water, heeft een hoger massadebiet en hogere pomparbeid tot gevolg, waardoor het rendement wat daalt.

Voordelen van organische vloeistoffen zijn daarentegen:

- ze hebben een hoger moleculair gewicht, waardoor er minder trappen nodig zijn en de turbinekosten dus lager zijn
- De helling van de lijn die in een (t,s)-diagram de overgang vormt tussen het natte-damp gebied en het dampgebied zelf, is voor de meeste organische vloeistoffen groter dan voor water. De condensatiegraad in de turbine is daardoor lager. In sommige gevallen helt ze zelfs de andere kant op, waardoor er ook bij isentrope ontspanning van verzadigde damp geen condensatie ontstaat. Figuur 3.26 illustreert dit.



Figuur 3.26: T,s-diagram van de Rankine-cyclus met water (links) en een organische vloeistof (rechts)

Het elektrische vermogen van een dergelijke installatie ligt in het gebied 2kW-10MW. Het elektrisch rendement is laag (10-30%), maar het belangrijkste is dat dit systeem extra vermogen kan genereren door warmterecuperatie en dus zonder daarvoor brandstof te verbruiken.

De installatietijd van kleinere eenheden (tot 50 kW), en zeker voor eenheden die gebruikt worden in de commercieel-residentiële sector, bedraagt 4-8 maanden, terwijl het voor grotere systemen 1-2 jaar kan duren. Er zijn geen statistische data beschikbaar wat betreft de betrouwbaarheid van een ORC. De gemiddelde jaarlijkse beschikbaarheid wordt geschat op 80-90%. De verwachte levensduur bedraagt ongeveer 20 jaar.

3.10 Samenvatting

Als referentie worden de belangrijkste technische eigenschappen van warmtekrachtkoppelingsinstallaties die in de vorige hoofdstukken werden toegelicht, gegeven in Tabel 3.5.

Tabel 3.5: Technische eigenschappen van een warmtekrachtkoppelingsinstallatie

Systeem	Elektrisch vermogen	Jaarlijks gemiddelde beschikbaarheid	Elektrisch Rendement %		Totaal rendement	KWV
	MW	%	Last 100%	Last 50%	%	—
Stoomturbine	0.5-100*	90-95	14-35	12-28	60-85	0.1-0.5
Gasturbine in open cyclus	0.1-100	90-95	25-40	18-30	60-80	0.5-0.8
Gasturbine in gesloten cyclus	0.5-100	90-95	30-35	30-35	60-80	0.5-0.8
Joule-Rankine	4-100*	77-85	35-45	25-35	70-88	0.6-2.0
Gecombineerde cyclus						
Dieselmotor	0.07-50	80-90	35-45	32-40	60-85	0.8-2.4
Zuigermotor met inwendige verbranding	0.015-2	80-85	27-40	25-35	60-80	0.5-0.7
Brandstofcellen	0.001 - 1	90-92	35-65	35-65	85-90	0.8-2.0
Stirlingmotoren	0.003-1.5	85-90 (verwacht)	35-50	34-49	60-80	0.8-1.7
Microturbines	0.03 – 0.2	80-95 (verwacht)	12-30	9-23	60-80	0.25-0.7
ORC	0.002 - 10	80-90 (verwacht)	10 - 30	8-24	60-85	0.1-0.4
* De waarde 100 MW is een gebruikelijke maximum limiet voor industriële toepassingen. Systemen van dit type kunnen ook een hogere capaciteit bezitten.						

4 KLASSIEKE TOEPASSINGEN VAN WARMTEKRACHTKOPPELING

Toepassingen van warmtekrachtkoppeling kunnen onderverdeeld worden volgens de sector waar ze voorkomen:

- de nutsvoorzieningssector
- de industriële sector
- de gebouwensector (ook de residentiële – commerciële - institutionele sector genoemd)
- de primaire sector (de land- en tuinbouw)

De mogelijkheden voor warmtekrachtkoppeling in elk van deze sectoren worden hieronder apart behandeld.

4.1 Warmtekrachtkoppeling in de nutsvoorzieningssector

Conventionele elektrische centrales kunnen ofwel gebouwd worden als ofwel omgevormd worden tot warmtekrachtinstallaties, waarvan de nuttige warmte gebruikt wordt om te voldoen aan de warmtevraag van naburige steden of stadsdelen, industrieën, serres, visserijen, waterontziltingsinstallaties (vooral op eilanden of in landen met weinig waterreserves), enz. De geografische spreiding van de warmteverbruikers (indien er meerdere zijn) en hun afstand tot de centrale zijn van cruciaal belang voor de haalbaarheid van het project.

Wanneer een stad of een stadsdeel bevoorraad wordt met warmte, spreekt men van stadsverwarming (district heating). Bij stadsverwarming zijn, naast de afstand en spreiding van de gebruikers, het thermisch vereiste vermogen en het jaarlijks aantal graaddagen belangrijke parameters voor de haalbaarheid. In de meeste gevallen overstijgt de economisch haalbare afstand voor warmtetransport de 10 km niet; in uitzonderlijke gevallen kan deze tot 30 km reiken.

In warmere klimaten kan stadskoeling gedurende de zomer, naar analogie met de vooral in de winter noodzakelijke stadsverwarming, eveneens economisch haalbaar zijn. In zo'n geval wordt de warmte geleverd door de centrale gebruikt om absorptiekoelers aan te drijven. Het is mogelijk om centrale koelers te hebben en koud water te verdelen naar de gebruikers of om meerdere lokale koelers te hebben. In het tweede geval is er geen nood aan een koud water netwerk; het warmwaternetwerk of stoomnetwerk wordt dan heel het jaar gebruikt.

Twee andere toepassingen die hier vermeld kunnen worden zijn stortgasmotoren en waterzuiveringscentrales. In beide gevallen wordt een methaangas geproduceerd, dat als brandstof kan dienen voor een WKK met gasmotor. Een alternatief voor stadsafval, in plaats van te storten, is het verbranden ervan in verbrandingsovens, waarbij de vrijgekomen warmte in stoom kan worden omgezet in een ketel, en aldus kan gebruikt worden om een stoomturbine aan te drijven. Indien het gaat om een stoomturbine met aftap of een tegendrukturbine, kan ook hier warmte nuttig worden aangewend voor diverse toepassingen, en spreken we dus van een warmtekrachtinstallatie. Echter, in het geval van waterzuiveringscentrales, is er ook warmte nodig voor de vergistingtanks waarin het biogas wordt geproduceerd.

4.2 Warmtekrachtkoppeling in de industrie

Veel industriële processen hebben warmte nodig. We kunnen een onderscheid maken volgens het temperatuurniveau van de benodigde warmte:

- Processen op lage temperatuur (lager dan 100°C), bv. Drogen van agrarische producten, verwarmen of koelen van een ruimte, sanitair warm water.
- Processen op gemiddelde temperatuur (100-300°C), bv. Processen in de pulp en papierindustrie, textielindustrie, suikerfabrieken, bepaalde chemische industrieën, enz. In deze processen wordt warmte vaak geleverd in de vorm van stoom.
- Processen van hoge temperatuur (300-700°C), bv. in bepaalde chemische industrieën.
- Processen van zeer hoge temperatuur (hoger dan 700°C), bv. in cementfabrieken, primaire metaalindustrie, glaswerk.

Een belangrijk WKK-potentieel vindt zich in volgende sectoren:

- voeding en drank,
- textiel,
- pulp en papier,
- chemie,
- petroleumraffinaderijen
- cementindustrie,
- primaire metalen,

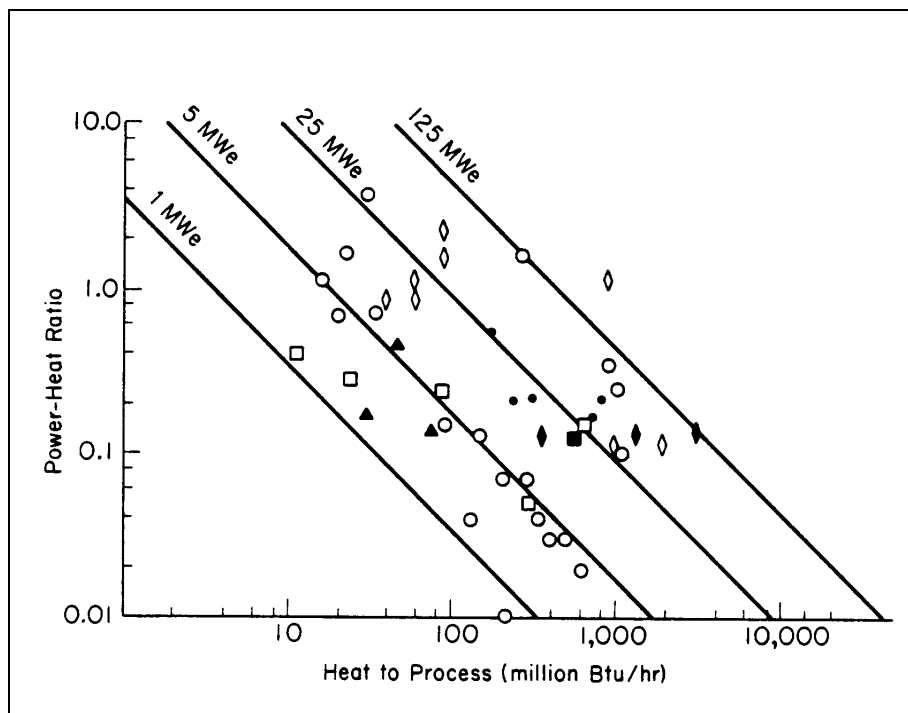
Een lager, maar niet verwaarloosbaar potentieel bevindt zich ook in de industriële sectoren 'glas en keramiek' en 'houtverwerking'.

Figuur 4.1 en Figuur 4.2 tonen de elektrische belasting, de thermische belasting, de kracht-warmteverhouding en het aantal draaiuren per jaar van warmtekrachtinstallaties voor diverse industriële sectoren in de V.S. Deze parameters geven reeds een goed beeld van de mogelijkheden en de technologiekeuze van warmtekrachtkoppeling in de diverse sectoren.

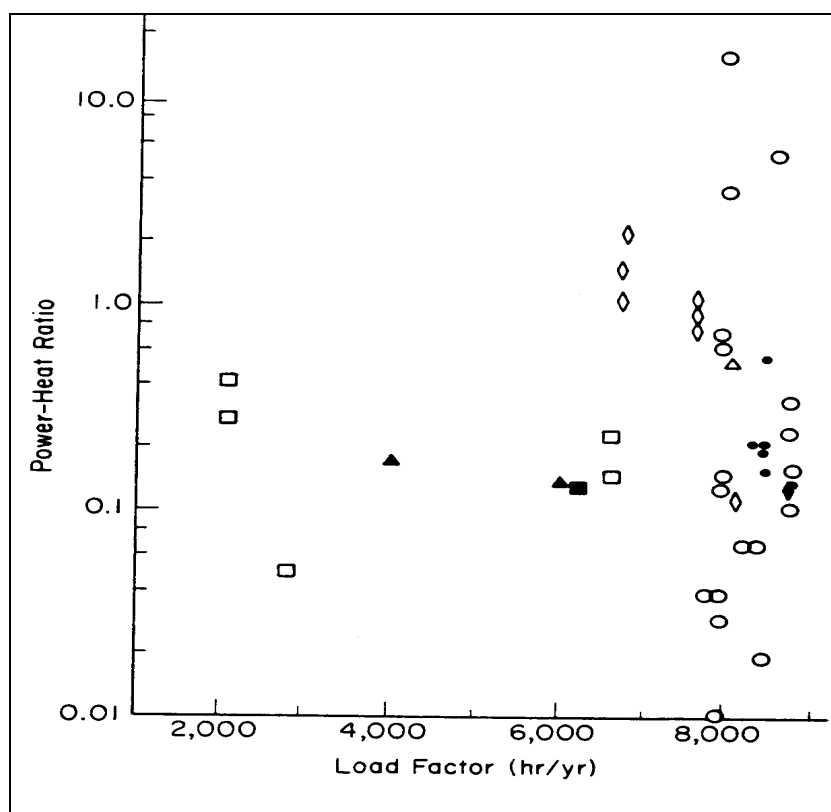
De meeste industriële sectoren met een beduidend WKK-potentieel hebben ook processen die een zodanige hoeveelheid en kwaliteit (temperatuur) aan warmte produceren of uitstoten, dat het haalbaar en aangewezen is om deze warmte te recupereren voor gebruik in andere toepassingen. Het spreekt voor zich dat men eerst de mogelijkheden voor dergelijke recuperatie dient te onderzoeken, alvorens de nog resterende vraag in te vullen met behulp van warmtekrachtkoppeling.

Anderzijds produceren bepaalde industriële processen (zoals katalytisch kraken in olie raffinaderijen) koolwaterstoffen als bijproduct, dewelke kunnen verbrand worden in daartoe geschikte WKK-installaties, en aldus op de meest efficiënte manier aangewend kunnen worden. Gezien inwendige verbranding (in gasturbines of inwendige verbrandingsmotoren) van dergelijke bijproducten niet steeds even evident is, worden deze bijproducten vaak verbrand in de bijstook van een gasturbinesysteem of in een ketel voorgeschakeld aan een stoomturbine.

De pulp- en papierindustrie heeft vaak grote hoeveelheden brandbaar afval (procesafval, schors, schilfers, bosresidu ongeschikt voor pulp,...). Ook dit kan gebruikt worden als brandstof voor een WKK, waarbij in dit geval meestal aan een WKK met stoomturbine wordt gedacht. In de staalindustrie, vormen hoogovengassen een gebruiksklare brandstof om stoom te produceren. Via een stoomturbine kan deze stoom omgezet worden in mechanische energie en warmte, voor diverse toepassingen. In de cementindustrie tenslotte, kan de warmte van de uitlaatgassen van de cementoven gerecupereerd worden en gebruikt worden om stoom te produceren voor elektriciteitsproductie of warmtekrachtkoppeling. Echter, andere energiebesparingsmaatregelen kunnen de temperatuur van het ovengas al zodanig gereduceerd hebben dat elektriciteitsproductie of warmtekrachtkoppeling niet langer economisch haalbaar is.



Figuur 4.1: Belastingskarakteristieken van industriële processen (Belding 1982)



Figuur 4.2: Kracht-warmte verhouding in functie van de werkingsduur van industriële processen (Belding 1982)

Van bijzonder belang is de toepassing van warmtekrachtkoppeling in industriezones of -parken. De elektrische en thermische behoefte van al de bedrijven gevestigd in dezelfde zone samen is veel hoger dan van elke industrie apart. Voorts is de belastingsduur langer en worden toevallige schommelingen in de warmtevraag veel meer uitgevlakt dan wanneer men elk bedrijf apart beschouwt. Tenslotte speelt ook de 'economy of scale', of het economische voordeel van grootschaligheid, een rol. Dit alles bevordert de haalbaarheid van een centraal WKK-systeem, of een WKK voor een bedrijvencluster.

4.3 Warmtekrachtkoppeling in de bouwensector

In sommige gebouwen vinden we een elektrische en thermische vraag, die qua grootte en spreiding in de tijd van die aard zijn om mogelijkheden te bieden voor warmtekrachtkoppeling. Een niet-limitatieve lijst van dergelijke gebouwen is de volgende:

- huizen en appartementsblokken
- hotels,
- ziekenhuizen,
- scholen en universiteiten,
- kantoorgebouwen,
- winkels, supermarkten, winkelcentra,
- restaurants,

- zwembaden en ontspanningscentra.

Warmte geproduceerd door warmtekrachtinstallaties kan in deze gebouwen worden gebruikt om te voldoen aan de behoefte aan sanitair warm water, voor verwarming of koeling van ruimtes, voor wasserijfaciliteiten, drogers of verwarming van het zwembadwater. Een indicatie van het elektrisch vermogen dat nodig is in de verschillende types gebouwen, wordt gegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Typische elektrisch vermogen in gebouwen.

GEBOUW	Elektrisch vermogen (kW)
Restaurant	50 – 80
Appartementsgebouwen	50 – 100
Supermarkten	90 – 120
Hotels	100 – 2000
Ziekenhuizen	300 – 1000
Winkelcentra	500 – 1500
Scholen, universiteiten	500 – 1500
Kantoorgebouwen	500 – 2000

Vanuit het standpunt van warmte- en koudevraag, kunnen drie subsectoren geïdentificeerd worden: (a) ziekenhuizen en hotels, (b) appartementsblokken, (c) kantoorgebouwen. Elk van deze drie subsectoren heeft zijn eigen vraagprofiel. Andere gebouwen (zoals universiteiten en winkels) hebben belastingsprofielen die een combinatie zijn van de profielen van de drie subsectoren. De haalbaarheidsstudie en meer nog het finaal ontwerp van een WKK moet gebaseerd zijn op de belastingsprofielen van het gebouw in kwestie; piek of gemiddelde belastingswaarden zijn niet voldoende, omdat ze kunnen leiden tot verkeerde resultaten en beslissingen.

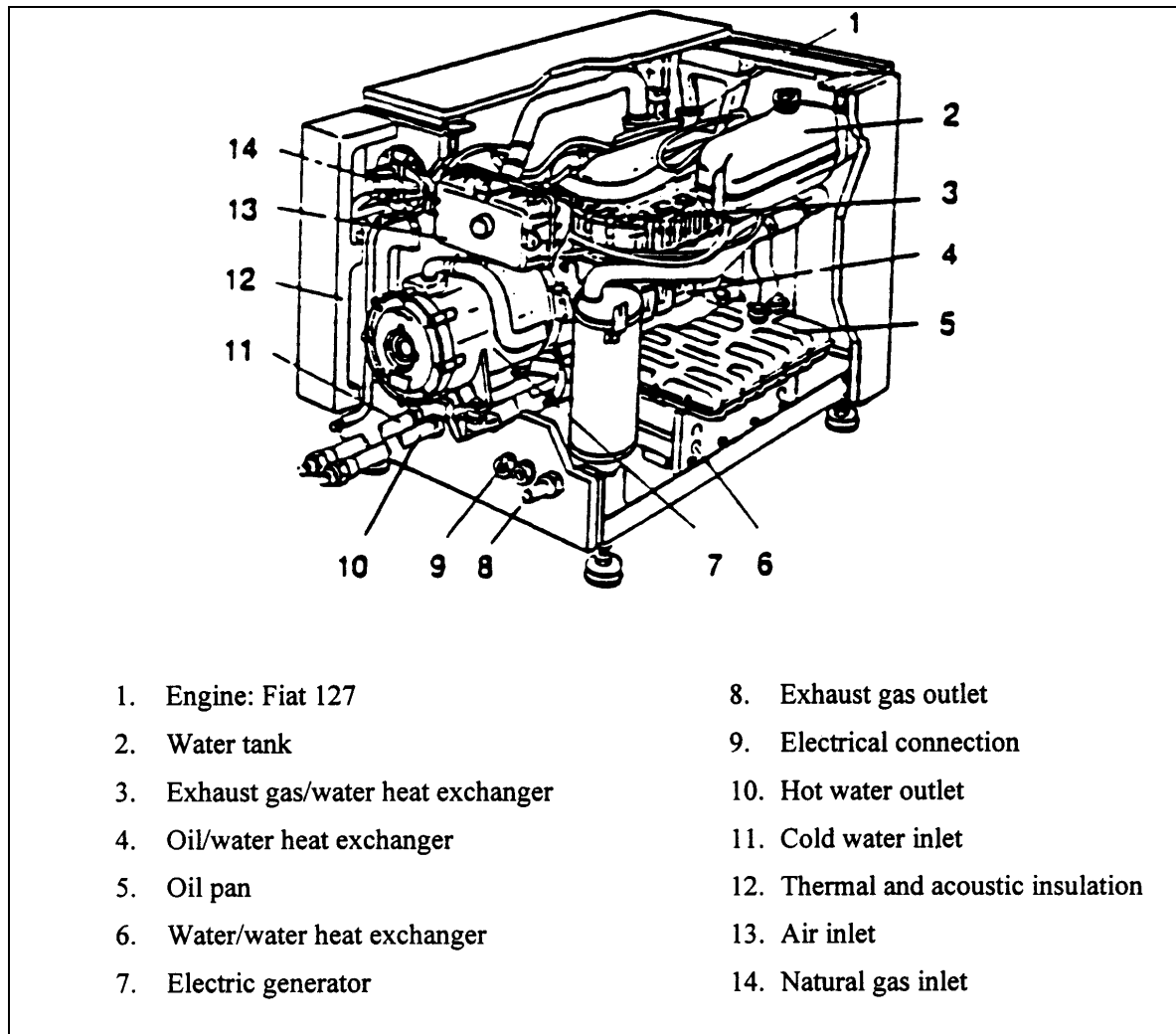
Haalbaarheidsstudies hebben aangetoond dat in koude klimaten, zoals in Noord-Europese landen, met langere winterperiodes met hoge warmtevraag, WKK economisch levensvatbaar is. In warme klimaten, zoals in Zuid-Europese landen, is koeling van ruimtes, als aanvulling op verwarming, ervan in de meeste gevallen noodzakelijk opdat de WKK economisch haalbaar zou zijn.

De beschikbaarheid van aardgas en gestandaardiseerde WKK-packages gaven een impuls aan de toepassing van warmtekrachtkoppeling in gebouwen in bepaalde Europese landen (bv. het Verenigd Koninkrijk, Nederland). Packages hebben een elektrisch vermogens in het bereik van 10-2000 kW en ze hebben de volgende voordelen:

- lage kost
- hoge vermogensdichtheid (vermogen per eenheid volume),
- snelle en gemakkelijke installatie (ze zijn klaar om aan het elektrisch net, het gasnet en het warmwaternetwerk verbonden te worden)
- automatisch bedrijf zonder de nood aan voortdurende aanwezigheid van gespecialiseerd personeel.

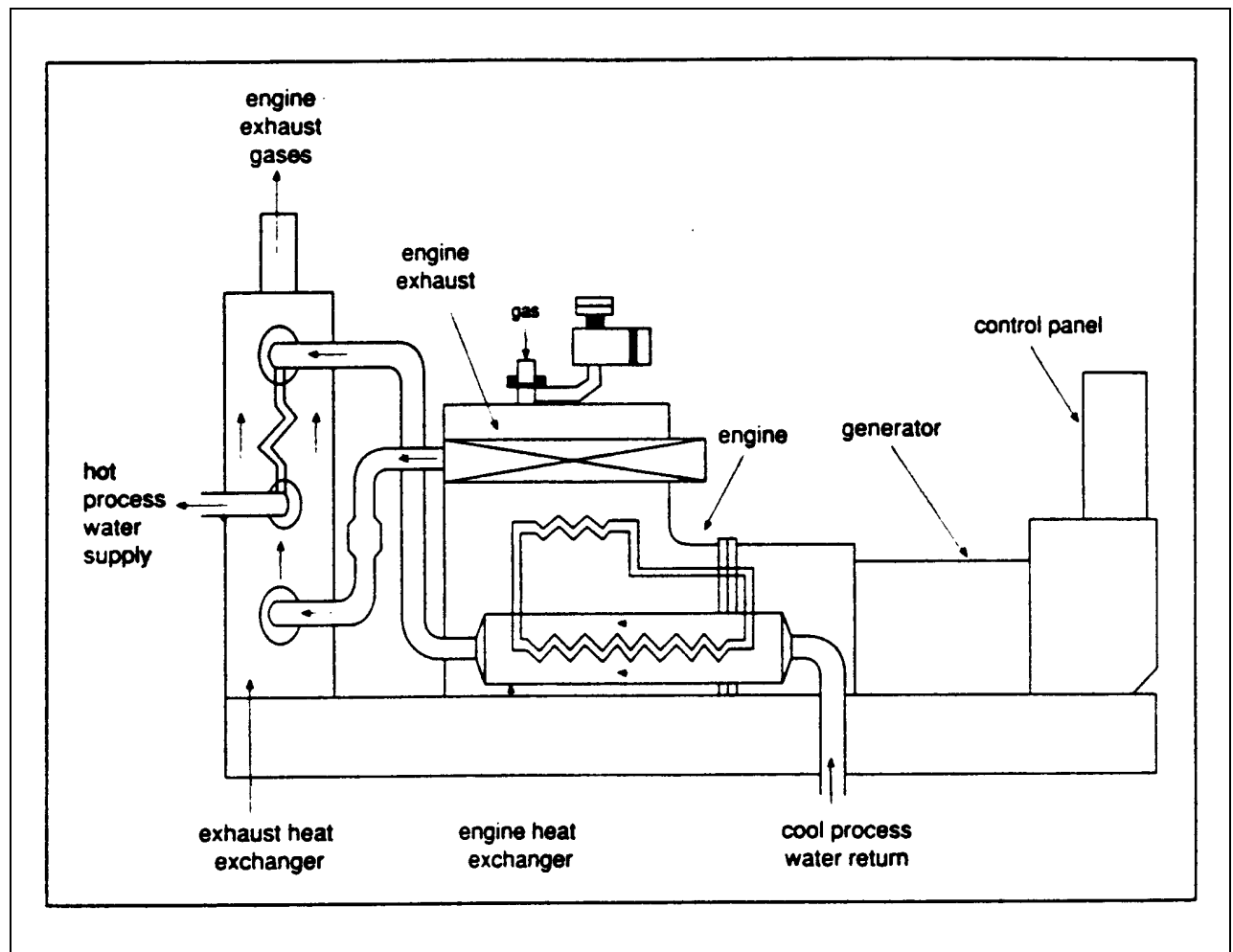
De units hebben gewoonlijk een klassieke zuigermotor. Vloeibare brandstof kan gebruikt worden, maar het meest gebruikelijke is aardgas, wat zuiver en relatief goedkoop is, en geen

opslag vereist. Figuur 4.3 illustreert een kleine unit, die bijvoorbeeld geïnstalleerd kan worden in huizen. Een voorbeeld van een grotere unit wordt weergegeven op Figuur 4.4. Om het geluid tot op een aanvaardbaar niveau te reduceren, worden akoestische omhulsels, akoestische dempers en speciaal geluidsabsorberende materialen gebruikt. Voor toepassingen met grotere vermogens, ook buiten de gebouwensector, kunnen ook packages met gasturbines gebruikt worden



Figuur 4.3: Gestandaardiseerde verpakte cogeneratie-unit Fiat TOTEM 15 kW

Monitoring vanop afstand van warmtekrachtinstallaties draagt bij tot het succes van hun toepassing in gebouwen. Microprocessoren geïnstalleerd op de unit controleren de waarden van cruciale werkingsparameters (temperaturen, drukken, snelheid, spanning, enz.). De data wordt verzonden via een aparte telefoonlijn naar een centrale computer. Wanneer de data-analyse een abnormale werking van de installatie toont, wordt de werking van de machine bijgesteld vanop afstand of ter plaatse. Indien nodig komt een onderhoudsteam naar de site. Door het continu monitoren van de installatie kan in veel gevallen ingegrepen worden vooraleer ernstige defecten of schade aan de machine optreedt ten gevolge van abnormale werking.



Figuur 4.4: Hoofdcomponenten van een kleinschalige verpakte cogeneratie-unit met zuigermotor. (Jennkens 1989)

4.4 Warmtekrachtkoppeling in de primaire sector

Warmtekrachtkoppeling is niet wijd verspreid in de primaire sector, maar zijn toepassing kan resulteren in energiebesparingen en economische voordelen in landelijke gemeenschappen. Veelbelovende landelijke toepassingen van warmtekrachtkoppeling omvatten ethanolproductie, het drogen van gewassen of hout, en het verwarmen van serres, stallen voor dieren, of huizen.

Warmtekrachtinstallaties die petroleumproducten of aardgas verbranden behoren steeds tot de mogelijkheden. Nochtans kan het van groter belang en zelfs voordeliger zijn voor de landbouwers om gebruik te maken van technologieën die de lokaal beschikbare biomassa, zoals gewassenresidus, hout, dierlijk afval, ..., gebruikt als brandstof. Meestal is een tussenstap nodig om tot een brandstof te komen. We denken hierbij aan vergassers die gewasresidu's of hout omzetten in gas met eerder lage stookwaarde, anaërobe vergisting van dierlijke resten uit slachthuizen of huiselijke en industriële organische afvalstoffen. Anaërobe vergisting heeft het voordeel een afvalprobleem op te lossen, terwijl het niet alleen biogas produceert, maar ook een nuttig bijproduct. Dit bijproduct kan bijvoorbeeld, na droging, worden gebruikt als bodembemesting.

Warmtekrachtkoppeling kan beduidende economische en brandstofbesparende voordelen hebben op boerderijen. Het laat een belangrijke economische expansie toe, met gestegen winsten en eventueel nieuwe jobs dankzij de verkoop van energieproducten, en dit door gebruik te maken van lokale middelen zonder de basisvraag voor energie te doen stijgen.

5 INPASSING EN AANSLUITING VAN WARMTEKRACHTKOPPELING

5.1 Inleiding

Ondanks de energie-efficiëntie en de ecologische verdiensten van warmtekrachtkoppeling, zijn er veel factoren die in acht moeten genomen worden wanneer men een WKK-project uitvoert. Politieke standpunten even buiten beschouwing gelaten, is het de economische levensvatbaarheid van een project die de implementatie van de technologie van warmtekrachtkoppeling aanmoedigt of ontmoedigt. De nodige kosten voor de inpassing en aansluiting zouden in dit opzicht dan ook dermate bezwarend kunnen blijken voor een WKK-project, dat de uitvoering van het project hierdoor op de helling komt te staan.

Bovendien is het zo dat, indien WKK-systemen in hun werking niet zo performant blijken als verwacht werd, dit meestal niet te wijten is aan problemen met de WKK-systemen zelf, maar de oorzaak veelal ligt bij problemen met de inpassing van het WKK-systeem in de bestaande energievoorziening.

Het is vanzelfsprekend dat de inpassing van WKK-systemen in de bestaande energievoorziening van een bedrijf steeds sterk afhankelijk is van de specifieke karakteristieken van de bestaande energievoorziening. Daarom is het onmogelijk om op alle mogelijke vragen omtrent de inpassing van WKK een antwoord te formuleren.

In dit hoofdstuk worden een aantal aspecten van de inpassing van WKK-systemen in de bestaande energievoorziening toegelicht.

In paragraaf 5.2 worden enkele aspecten van de koppeling van WKK-systemen met het elektriciteitsnet toegelicht, waarbij de meeste aandacht uitgaat naar WKK-systemen op basis van zuigermotoren, die meestal gekoppeld worden aan het distributienet.

Paragraaf 5.3 licht een aantal zaken over de warmtetechnische inpassing van WKK-systemen met zuigermotor toe; opgemerkt wordt dat in de praktijk de warmtetechnische inpassing van WKK-systemen met motor tot de meeste problemen voor WKK-projecten leidt. Voor WKK-systemen met turbines, die meestal ingepast worden in stoomnetten, stellen zich veel minder warmtetechnische inpassingsproblemen en vanwege het zeer specifieke karakter hiervan wordt er in deze paragraaf niet op ingegaan.

Paragraaf 5.4, tenslotte, werpt kort een blik op de gaszijdige aansluiting.

5.2 Elektrische inpassing

De inpassing van een WKK-systeem in een bestaand elektriciteitsnet is steeds zeer sterk afhankelijk van de karakteristieken van de te installeren WKK-installatie en van de karakteristieken van het plaatselijk elektriciteitsnet.

Het is daarom noodzakelijk om bij de inpassing van een WKK in een bestaand elektriciteitsnet goed overleg te voeren met de lokale beheerder van het elektriciteitsnet. Om inzicht in een aantal zaken te krijgen, worden in deze paragraaf enkele belangrijke aspecten kort toegelicht:

- eiland- en parallelbedrijf;

- synchrone en asynchrone generatoren;
- aandachtspunten in verband met netkoppeling.

5.2.1 Eiland- en parallelbedrijf

Bij de relatie tussen WKK en het bestaande elektriciteitsnet kunnen de volgende twee mogelijkheden onderscheiden worden:

- Eilandbedrijf
- parallelbedrijf

5.2.1.1 *Eilandbedrijf*

In geval van eilandbedrijf voedt de generator van de WKK-installatie het elektriciteitsgedeelte van de klant, zonder dat er een elektrische koppeling met het openbare elektriciteitsnet is. Dit betekent dat de volledige elektriciteitsbehoefte van de klant gedekt moet worden door de WKK-installatie. Tevens dient de warmte gerecupereerd te worden indien we van WKK willen spreken. Wat dimensionering en exploitatie van de WKK betreft heeft dit drie belangrijke consequenties:

- de WKK moet alle elektrische variaties in de belasting momentaan volgen, zodat de WKK vaak maar een beperkte tijd op nominaal vermogen kan werken;
- de WKK moet gedimensioneerd worden op de piekvraag;
- als er geen warmtebehoefte bij het bedrijf is, terwijl er wel een elektriciteitsbehoefte aanwezig is, zal de machine toch in bedrijf genomen worden en zal de geproduceerde warmte weggekoeld moeten worden; bij 'eilandbedrijf' moeten daarom vaak extra investeringen in noodkoelcapaciteit voorzien worden.

Een ander aspect is dat onder andere de spanning en frequentie van de door de WKK geleverde elektriciteit bepaald worden door de WKK zelf, en dat de karakteristieken van de geleverde elektriciteit dus momentaan kunnen variëren. Een voordeel van eilandbedrijf is dat de WKK en de gebruiker geen invloed ondervinden van storingen die optreden in het openbare elektriciteitsnet. Een ander voordeel is dat men de WKK-installatie niet moet uitrusten met synchronisatie-apparatuur voor de synchronisatie van de door de WKK geleverde elektriciteit en het openbare net. Omdat de voordelen van eilandbedrijf meestal niet opwegen tegen de nadelen, wordt zuiver eilandbedrijf zelden toegepast.

Een voorbeeld waar eilandbedrijf van een WKK-systeem soms wordt toegepast, is de rozenteelt met assimilatiebelichting. De generator van de WKK voedt hierbij de assimilatiebelichting en indien de WKK niet in bedrijf is, branden de assimilatielampen niet. Meestal wordt in een dergelijke situatie met de leverancier van de WKK-installatie een contract opgesteld, waarbij de WKK-leverancier een mobiele noodstroomvoorziening levert indien de WKK-installatie langer dan een voorafgesproken termijn niet beschikbaar is.

5.2.1.2 *Parallelbedrijf*

Bij parallelbedrijf zijn het openbare elektriciteitsnet en de WKK met elkaar verbonden: eenvoudig uitgedrukt kan men zeggen dat de WKK als het ware gekoppeld is met een oneindige elektrische buffer, die op elk moment het tekort aan elektriciteit kan leveren of het overschot aan elektriciteit kan opnemen.

Bij de dimensionering van de WKK heeft parallelbedrijf het voordeel dat men de WKK niet moet dimensioneren op de piekvraag van elektriciteit. Men kan kiezen tussen dimensioneren van de WKK op de elektriciteitsvraag of op de warmtevraag, waarbij men kan opteren voor een WKK-systeem dat zoveel mogelijk op nominaal vermogen kan werken, zodat ogenblikkelijke variaties in de elektriciteitsvraag van de klant niet meteen leiden tot deellastbedrijf van de WKK-installatie.

Om een WKK parallel aan het net te laten werken, dienen echter de volgende karakteristieken van de door de WKK geproduceerde elektriciteit en de op het net aanwezige elektriciteit gesynchroniseerd te worden:

- frequentie
- spanning
- fase
- fasevolgorde

Op het moment dat deze vier karakteristieken van de WKK en van het net volledig gelijk zijn kan de WKK-installatie parallel met het openbare net geschakeld worden: in het ideale geval is bij synchronisatie de stroom dus nul. Indien niet correct wordt gesynchroniseerd, zal bij het parallelschakelen van WKK en net een vereffeningstroom optreden die schade kan toebrengen aan de WKK-installatie.

Belangrijk is op te merken dat indien een netstoring optreedt de WKK-installatie van het openbare elektriciteitsnet moet worden losgekoppeld. Om veiligheidsredenen moet men immers vermijden dat de WKK-installatie elektriciteit levert aan netdelen waarvan men verwacht dat ze uit bedrijf zijn. Hiervoor zijn een aantal beveiligingen noodzakelijk.

5.2.2 Synchrone en asynchrone generatoren

Door de generator, die bestaat uit een ronddraaiende 'rotor' en een stilstaande 'stator', wordt mechanische energie afkomstig van de motor of turbine omgezet in elektrische energie. Er wordt bij de generatoren onderscheid gemaakt tussen 'synchrone' en 'asynchrone' generatoren.

Bij synchrone generatoren wordt de rotor van de generator bekrachtigd met gelijkstroom, waardoor in combinatie met het ronddraaien van de rotor, een magnetisch veld ontstaat. Dit magnetisch veld in de rotor veroorzaakt een stroom in de stator, waarbij het toerental van de rotor gelijk (synchroon) is met de frequentie van de statorstroom. Er is dus alleen sprake van een continue vermogensoverdracht als het rotor- en statordraaiveld even snel draaien. Indien de synchrone generator gekoppeld is aan het openbare elektriciteitsnet, dan wordt het statordraaiveld opgelegd door het openbare net en ligt hiermee de rotorsnelheid vast.

Bij asynchrone generatoren wordt het rotorveld verkregen door inductie vanuit de stator. Om een spanningsopbouw in de rotor te krijgen, moeten de frequentie van het net en het toerental van de rotor ongelijk zijn ('asynchroon'); het verschil in toerental en netfrequentie wordt aangeduid als 'rotorslip'. Bij een asynchrone generator is het rotortoerental hoger dan het synchrone toerental.

In WKK-toepassingen worden meestal synchrone generatoren voor de elektriciteitsproductie gebruikt.

Synchrone generatoren hebben het voordeel dat ze onafhankelijk van het elektriciteitsnet opgestart kunnen worden: dit maakt dat in WKK-installaties die losgekoppeld van het net werken (eilandbedrijf) synchrone generatoren gebruikt worden. De synchrone generator kan, indien gewenst, blindvermogen aan het net leveren. Wel dient, om een synchrone generator parallel aan het net te kunnen laten werken, synchronisatieapparatuur te worden voorzien.

Bij een zeer beperkt aantal situaties worden asynchrone generatoren in WKK-systemen gebruikt. In het algemeen is een asynchrone generator goedkoper dan een synchrone generator. Belangrijk is echter wel dat de asynchrone generator altijd blindvermogen opneemt; dit gevraagde blindvermogen kan de WKK uit het elektriciteitsnet opnemen, waardoor het niet mogelijk is om een WKK met asynchrone generator losgekoppeld van het net (eilandbedrijf) te gebruiken. Toepassing van asynchrone generatoren blijft eerder beperkt tot WKK met kleine vermogens.

5.2.3 Aandachtspunten inzake netkoppeling

Het verband tussen het aan te sluiten WKK-vermogen en het spanningsniveau kan als volgt globaal gekarakteriseerd worden:

- tot enkele tientallen kVA : laagspanningsnet
- van 1 MVA tot 15 MVA : distributienet (15 kV)
- groter dan 15 MVA : transportnet (30 kV, 36 kV, 70 kV of 150 kV)

Bij elke koppeling van een WKK-installatie met het openbare elektriciteitsnet moet aandacht besteed worden aan de volgende aspecten:

- capaciteit van de netelementen
- spanningshuishouding
- kortsluitstromen
- niet-synchrone inschakelingen
- onverwachte eilandwerking

5.2.3.1 Capaciteit van de netelementen

Het is vanzelfsprekend dat het net waarop een WKK-systeem aangesloten wordt de diverse vermogens moet kunnen transporteren.

Vooralsindien men een WKK-systeem op warmte dimensioneert, kan het corresponderende elektrisch vermogen van de WKK-installatie aanzienlijk hoger zijn dan de momentane elektriciteitsafname van de warmteklant, zodat het bestaande elektriciteitsnet wat capaciteit betreft niet geschikt is voor het transporteren van het in vergelijking grote elektrisch vermogen van een klant.

Een voorbeeld is een tuinbouwbedrijf op het platteland, dat wel een grote warmtevraag, maar een zeer beperkte elektriciteitsvraag heeft (enkele tientallen kW.) Indien een WKK-installatie op basis van de warmtevraag geplaatst wordt zal het elektrisch vermogen van WKK al snel een factor 10 of 20 groter zijn dan het elektriciteitsverbruik van de tuinder zelf, zodat er problemen kunnen ontstaan met de transportcapaciteit van het bestaande net. Dergelijke problemen kunnen vaak technisch opgelost worden, maar gaan natuurlijk gepaard met aanzienlijke investeringen.

Aangezien deze investeringen veroorzaakt worden door toepassing van WKK is het mogelijk dat men deze kosten geheel of gedeeltelijk door zal rekenen aan de WKK-eigenaar.

5.2.3.2 Spanningshuishouding

Elke afnemer van elektriciteit eist een aanvaardbare spanning binnen bepaalde grenzen. Het momentane spanningsniveau is natuurlijk niet overal hetzelfde, maar hangt af van de plaats van de klant in het net, van de belasting van de klant en van de regelmogelijkheden in het elektriciteitsnet.

Zo wordt bij het middenspanningsnet (15 kV) de spanning continu geregeld op de transformator waar de hoogspanning naar middenspanning omgezet wordt. Vanaf deze transformator is er geen bijregeling meer, zodat op afstand van de transformator de spanning varieert in functie van de plaats en belasting van de klant. In het laagspanningsnet heeft de transformator, die de middenspanning omzet in laagspanning, een bepaald instelpunt dat normalerwijze niet aangepast wordt. In functie van de afstand en de belasting kunnen aanzienlijke spanningsdalingen optreden.

Inpassing van een WKK-installatie resulteert in een verhoging van de spanning ter plaatse van de WKK en de onmiddellijke nabijheid ervan. In eerste instantie zou men kunnen denken dat de spanningsverhoging ten gevolge van een WKK de spanningsverlaging ten gevolge van verliezen zou kunnen compenseren. Dit dient echter voorzichtig benaderd te worden. Ten eerste is de WKK-installatie niet continu in dienst, zodat op tijdstippen dat de WKK uit bedrijf is, het spanningsniveau zal dalen. Ten tweede kan de spanningsverhoging bij naburige klanten tot problemen - of zelfs tot schade - leiden.

5.2.3.3 Kortsluitstromen

Als een kortsluiting optreedt, dan probeert men zo snel en zo selectief mogelijk het betreffende netgedeelte af te schakelen. De detectie van een kortsluiting gebeurt op basis van een abnormale stroom met behulp van meet- en beveiligingssystemen. Om selectief te kunnen zijn in het afschakelen van deelden, worden tijdsvertragingen ingebouwd (staffelplan).

De bij een kortsluiting optredende kortsluitstroom wordt bepaald door de op het net aangesloten generatoren en impedanties tussen generatoren en kortsluitpunt. De betrokken installaties moeten in staat zijn deze stroom te voeden en waar nodig af te schakelen, met andere woorden: de componenten moeten kortsluitvast zijn.

De aansluiting van een WKK-installatie betekent dat op de plaats van de aansluiting de bij een kortsluiting optredende stroom verhoogd wordt met de kortsluitstroom van de generator van de WKK-installatie.

Door deze verhoogde kortsluitstroom zullen de meetsystemen die de kortsluiting moeten detecteren zeker aangesproken worden, al gebeurt dit wel vanuit een abnormale richting indien het net een radiale opbouw heeft (zoals normaal het geval is bij midden- en laagspanningsnetten). Hierdoor loopt men het risico dat meerdere netonderdelen uitgeschakeld worden en dat men niet kan bepalen in welk netonderdeel de kortsluiting zich bevindt.

Ten gevolge van de verhoogde kortsluitstroom moet men bekijken in hoeverre de diverse netcomponenten nog kortsluitvast zijn.

Indien de te verwachten kortsluitstroom in de gegeven situatie te hoog is, moeten extra maatregelen genomen worden, zoals bijvoorbeeld:

- een generator met een lagere kortsluitstroom;
- toepassing van smoorspoelen ter demping van de kortsluitstroom;
- toepassing van apparatuur die de kortsluitstroom snel afschakelt;
- ...

5.2.3.4 Niet-synchrone inschakeling

Zoals eerder vermeld dient de WKK-installatie parallel met het net geschakeld te worden op voorwaarde dat de elektriciteitsproductie van de WKK synchroon verloopt met de elektriciteit op het net. Hiervoor wordt geautomatiseerde synchronisatieapparatuur gebruikt.

Indien parallel geschakeld wordt terwijl WKK en net niet synchroon verlopen dan volgt een kortsluiting met een vereffeningsstroom die schade toebrengt aan de WKK.

5.2.3.5 Onverwachte eilandwerking

Indien een WKK-installatie uitgerust is met een synchrone generator kan deze onafhankelijk van het net werken. Hierbij dient vermeden te worden dat er spanning op de netdelen komt, waarvan de netbeheerder verwacht dat deze spanningsloos zijn. Vooral indien aan dergelijke netten onderhoud verricht moet worden, dienen de beveiligingen goed uitgevoerd te zijn. Daarnaast kan onverwachte eilandwerking ook een te hoog spanningsniveau tot gevolg hebben, waardoor schade bij de elektriciteitsafnemers kan ontstaan.

5.3 Warmtetechnische inpassing

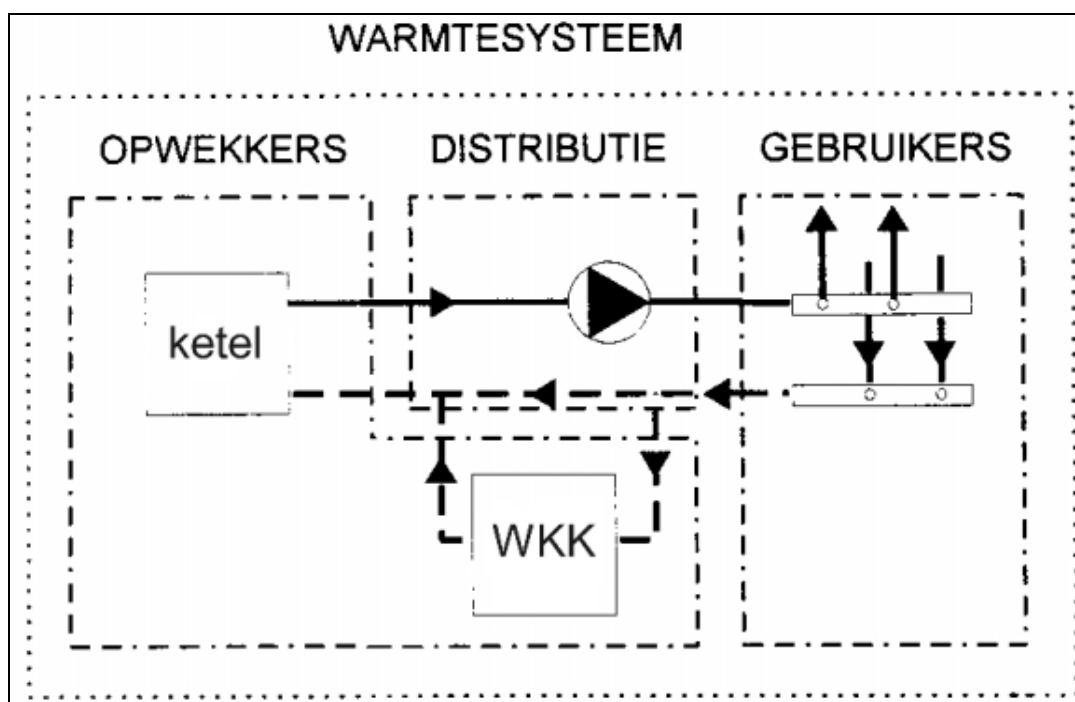
De warmtevraag bij kleinschalige toepassingen is vaak temperatuurafhankelijk, hetgeen leidt tot een schommelend belastingspatroon. Hierdoor is een adequate regeling vereist en wordt de warmtetechnische inpassing vaak een moeilijke aangelegenheid. Bij grootschalige toepassingen is de warmtevraag meestal continu in de vorm van stoom wat de inpassing relatief eenvoudig maakt.

5.3.1 Opbouw van warmtesystemen - subsystemen

Zoals schematisch voorgesteld in Figuur 5.1, bestaat een warmtesysteem klassiek uit drie subsystemen, namelijk:

- Warmteproductie
- Distributie
- Gebruikers

Figuur 5.1 toont weliswaar een typische configuratie voor gebouwenverwarming – en dus voor eerder kleinschaligere warmtekrachtkoppeling – maar toch vinden we dezelfde subsystemen terug bij grootschaligere toepassingen.



Figuur 5.1: Principe-indeling van een warmtesysteem voor gebouwenverwarming (Belcogen, 2004)

5.3.1.1 Warmteproductie

Warmteproductie kan op verschillende manieren gebeuren. Meest toegepast is de klassieke ketel of boiler. Andere vormen van warmteproductie (zonnepanelen, warmtepompen...) laten we buiten beschouwing.

Bij ruimteverwarming worden stookinstallaties meestal overgedimensioneerd, teneinde een voldoende warmteproductie te kunnen garanderen bij extreem lage buitentemperaturen. Het overdimensioneren van de ketels is een reden voor hun lage seizoensrendementen.

In industriële processen komt het daarentegen vaak voor dat de piekvraag niet zoveel hoger gelegen is dan de nominale warmtevraag. Hierdoor dienen de ketels niet zo erg overgedimensioneerd te zijn, en kunnen betere rendementen gehaald worden. Anderzijds kan het wel voorkomen dat het bedrijf kritische processen heeft, die continu warmte nodig hebben. In dit geval dienen ongeplande stops van de ketels absoluut vermeden te worden. Daarom worden vaak meerdere ketels voorzien, zodat de ene de andere kan vervangen bij uitval. Om onmiddellijke overname van de warmtevraag door een andere ketel mogelijk te maken, dient een backup-ketel warm gehouden te worden (hot standby) of eventueel zelfs op minimumbelasting te functioneren. Voor dit warmhouden of functioneren op minimumbelasting is natuurlijk ook energie nodig, hetgeen opnieuw aanleiding geeft tot lage operationele jaarrendementen.

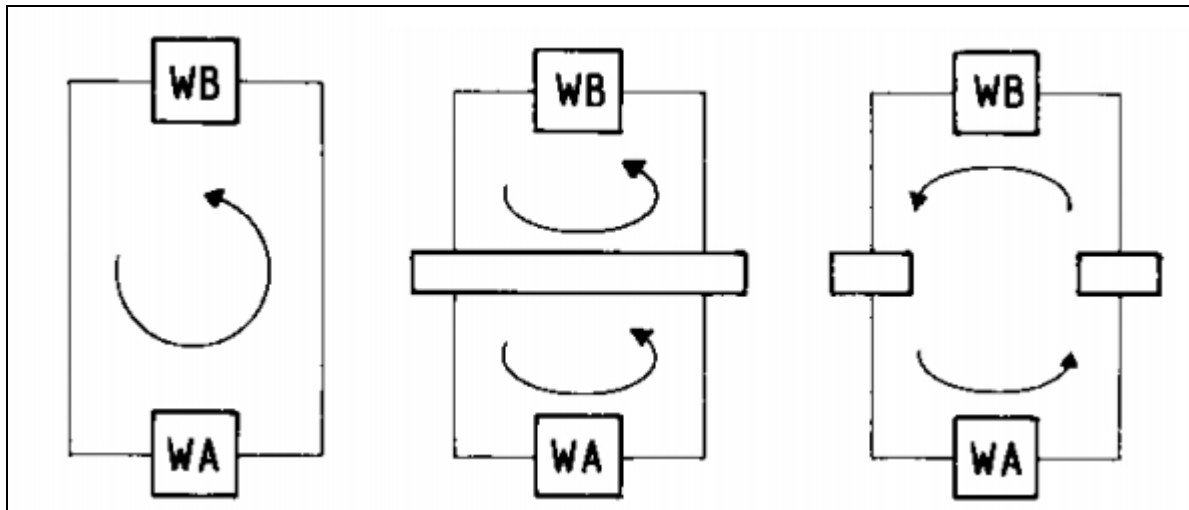
5.3.1.2 Warmtedistributie

De warmteoverdracht gebeurt aan de hand van een thermisch medium. Voor kleinschalige toepassingen is dit meestal water. In industriële toepassingen worden ook stoom en thermische olie gebruikt als medium. Ontwerp van distributienetten krijgt zelden de nodige aandacht: warmte- en drukverliezen en overtollige leidingen geven echter vaak aanleiding tot onnodig energieverbruik.

In wat volgt bekijken we distributiesystemen voor warmwatertoepassingen (gebouwenverwarming), die de verbinding verzorgen tussen de warmteopwekking en de warmtegebruiker.

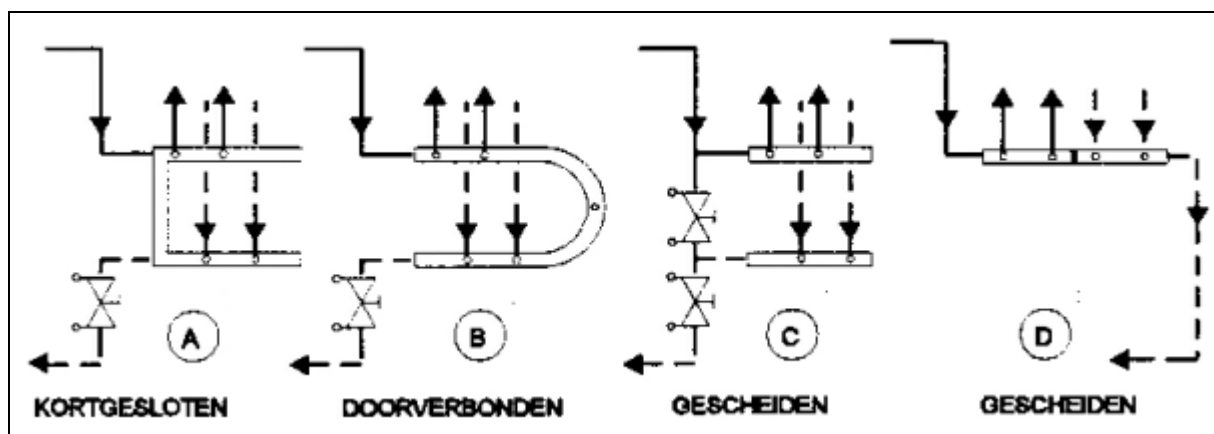
Langs productiezijde kan de koppeling op drie manieren plaatsvinden (figuur 5.2):

- Directe aansluiting (enkel circuit, vooral voor kleinere installaties)
- Open (drukloze) systemen (evenwichtsleidingen)
- Gesloten (drukgergelde) systemen



Figuur 5.2: Koppeling productie-distributie (WB: warmtebron, WA: warmteafnemer)

Langs gebruikerszijde gebeurt de koppeling aan de hand van een collector. Hier onderscheidt men de verbonden versus gescheiden systemen (figuur 5.3).



Figuur 5.3: Collectorsystemen (Belcogen, 2004)

5.3.2 Inpassing van WKK

5.3.2.1 Regeltechnische aspecten

De regeltechnische inpassing van een WKK-installatie is vooral gericht op het ontwerpen en inpassen van een regelstrategie waarin een doeltreffende afstemming plaatsvindt tussen ketel(s)

enerzijds en WKK anderzijds. Aangezien het thermisch gedrag van beide eenheden geheel verschillend is, vraagt een geïntegreerde regeling specifieke aandacht. Huidige regelingen zijn doorgaans digitaal.

Het belangrijkste aspect bij de inpassing langs warmtezijde van een WKK-systeem voor gebouwenverwarming is het gevaar van een te hoge retourtemperatuur. Dit kan zowel voorkomen bij lage als bij hoge warmtevraag. In dit laatste geval moeten we vooral oplettend zijn indien de retourtemperatuur rechtstreeks kan beïnvloed worden door de aanvoertemperatuur van de ketels. Volgende te vermijden situatie kan dan voorkomen:

1. De WKK levert onvoldoende vermogen om de warmtevraag te dekken;
2. De ketel komt in bedrijf;
3. De ketel levert op korte tijd zoveel warmte dat de retourtemperatuur stijgt zodat de WKK-eenheid uitschakelt (beveiliging);
4. Na afkoeling komt de WKK weer in bedrijf;
5. Door stilstand van de WKK kan deze niet snel genoeg voldoen aan de warmtevraag zodat de ketel weer inschakelt.

Naast het specifieke probleem van de retourtemperatuur dient er voor gezorgd te worden dat de warmtelevering van de WKK-eenheid preferent is. Bij een (te) kleine warmtevraag genieten ketels echter de voorkeur dit om deellastwerking en te hoge start/stop-frequentie van de eenheid te vermijden.

5.3.2.2 Hydraulische aspecten

5.3.2.2.1 Buffering

Indien de warmtevraag kleiner is dan het thermisch vermogen van de WKK-eenheid is de WKK doorgaans niet in bedrijf. Deellastwerking en wegkoelen van de overtollige warmte zijn technisch zeker mogelijk maar hebben elk hun specifieke nadelen:

- deellastwerking: daling van het elektrisch rendement en stijging van de specifieke onderhoudskosten
- wegkoelen: verminderde (negatieve) energiebesparing

Een mogelijke oplossing bestaat erin om de overtollige warmte tijdelijk op te slaan, te bufferen. In periodes met een beperkte warmtevraag (nacht) kan de geproduceerde warmte gebufferd worden; in periodes met een grote warmtevraag kan de warmte uit de buffer opnieuw nuttig aangewend worden. De voordelen van bufferwerking zijn ondermeer:

- de WKK dekt een groter aandeel van de warmtevraag;
- de start-stop frequentie van de WKK-eenheid wordt beperkt, wat de (technische) levensduur van de installatie ten goede komt;
- elektriciteits- en warmtevraag worden (gedeeltelijk) ontkoppeld. De WKK kan ingezet worden om te voldoen aan een hoge elektriciteitsvraag zonder noodzakelijke inzet van de noodkoeler.

Er dient rekening gehouden te worden met de optredende verliezen in het buffervat. Daarnaast is de hydraulische inpassing en regeling van een buffer complexer dan de standaardinpassing van een WKK.

5.3.2.2.2 Serie- en parallelschakeling

Bij een serieschakeling wordt de WKK voor de ketel(s) geplaatst. Het voordeel hiervan is de lage retourtemperatuur, uiteraard afhankelijk van de belasting. Er vindt echter wel steeds ketelbuffering plaats met hoge stilstandverliezen indien de ketel afgeschakeld is. Een mogelijke oplossing is het aanbrengen van een extra omloopleiding.

Bij de parallelschakeling wordt de WKK-eenheid naast (= parallel aan) de ketels geplaatst. Dit heeft als voordeel dat bij een beperkte warmtevraag die volledig gedekt kan worden door de WKK de ketel niet steeds doorlopen hoeft te worden, wat minder verliezen geeft.

5.4 Gaszijdige aansluiting

Actueel hebben de meeste warmtekrachtinstallaties aardgas als brandstof. Bij gasturbines wordt de brandstof in de verbrandingskamer ingespoten in gecomprimeerde lucht. De brandstof dient daarvoor ook op een voldoende hoge druk te staan. Deze druk bedraagt ongeveer 20 bar voor kleinere gasturbines (+/- 10 MW) tot 50 bar voor grotere gasturbines (50 MW). Wanneer het gasstation voor de WKK-installatie rechtstreeks kan aangesloten worden aan een hogedruk-gasleiding, hoeft dit geen probleem te betekenen. In het andere geval kan een gascompressor nodig zijn. Dit brengt niet alleen een extra investeringskost met zich mee, maar ook een extra verbruik van elektrische energie.

Naast aardgas wenst men in ook vaak biogassen of restgassen van industriële processen te verbranden. In warmtekrachtinstallaties met stoomturbines of stirlingmotoren is dit uiteraard geen probleem. Ook bij installaties met gasturbines kan aan dit probleem eenvoudig een oplossing worden gegeven door het verbranden van de alternatieve brandstoffen op de bijstookbranders. Toch is ook invwendige verbranding in motoren of gasturbines mogelijk. Hierbij dient echter wel bijzondere aandacht besteed te worden aan de samenstelling van de brandstof of het mengsel van de alternatieve brandstof met aardgas. Lage-emissiebranders in sommige gasturbines hebben immers een erg beperkt bereik van aanvaardbare brandstofsamenstelling of –energieinhoud bij dewelke zij goed kunnen functioneren. Soms dient daarom gekozen te worden voor klassieke branders, waarbij hogere emissies worden bekomen of waterinjectie nodig is om de emissies te reduceren.

6 TECHNISCHE DIMENSIONERING VAN WARMTEKRACHTKOPPELING

In vorige hoofdstukken werden reeds de hedendaagse technologieën en de meest frequente toepassingen van warmtekrachtkoppeling besproken. Een probleem waar men in de aanvangsfase voor komt te staan, is te bepalen welke de beste WKK-technologie en het beste systeemdesign is voor een specifieke toepassing. Dit probleem wordt behandeld in de volgende paragrafen.

Kennis van de energievraag is essentieel om tot een correcte (technische) dimensionering van een WKK-systeem te komen. Indien een WKK niet correct gedimensioneerd wordt (bijvoorbeeld door een verkeerde analyse van de energievraag), dan heeft dit ook verregaande consequenties op economisch vlak. Daarom wordt, vooraleer de procedure voor dimensionering toe te lichten, eerst even stilgestaan bij de analyse van de energievraag en het in kaart brengen ervan via profielen en belastingcurven.

De keuze voor een bepaald systeemdesign is meestal gebaseerd op een aantal criteria, vastgelegd door zowel de investeerder als de gebruiker van de installatie. Deze criteria situeren zich op gebied van economische prestatie, energie-efficiëntie, ononderbroken exploitatie of andere prestatimaatstaven. Er wordt naar gestreefd om een zo goed mogelijke globale score te bekomen voor het geheel van criteria. Bepalen hoe de beste installatie voor een gegeven toepassing eruit ziet, herleidt zich dus tot het nemen van een set van beslissingen met betrekking tot:

- Het type WKK-technologie (stoomturbine, gasturbine, zuigermotoren, gecombineerde cyclus, enz.),
- Aantal systemen en nominaal vermogen van elk,
- Aard van de uitrusting voor warmterecuperatie,
- Nood aan thermische of elektrische opslag,
- Nood aan thermische of elektrische noodvoorziening (backup)
- Wijze van inpassing van de installatie
- Werkingsmode van de installatie (zie verder)

Verder kan ook de haalbaarheid van absorptiekoeling onderzocht worden, zodat warmte nuttig kan aangewend worden op momenten dat de warmtevraag laag maar de koudevraag hoog is. Dit zal natuurlijk de belasting en daaruit volgend ook het design van het systeem beïnvloeden.

Bovendien moet men rekening houden met wettelijke en regelgevende vereisten, zoals geluidsniveau, uitstoot van broeikasgassen of andere schadelijke stoffen, totaal exploitatierendement,... die beperkingen kunnen stellen aan het design en de werkingsparameters.

6.1 Belastingcurves

6.1.1 Belastingprofielen

De elektriciteitsvraag en warmtevraag van een bedrijf of site zijn functie van de tijd. Elke gebruikte energievorm heeft zijn eigen profiel: elektriciteit, direct gebruik van uitlaatgassen, hoge

druk stoom, lage druk stoom, warm water, koud water, enz. Daarenboven treden de pieken van de verschillende belastingen normaal niet op hetzelfde tijdstip op. Een systeem selecteren op basis van gemiddelde belastingen is daarom erg gevaarlijk, en kan er in een aantal gevallen toe leiden dat de verwachte prestaties van de installatie een sterke overschatting zullen blijken van de werkelijke prestaties. In het ideale geval zou het ontwerp van een WKK moeten gebaseerd zijn op meer gedetailleerde informatie, zoals de jaarlijkse belastingscurven van de verschillende energievormen. Hierbij zwijgen we dan nog over de veranderingen van de vraag van jaar tot jaar. Tussen de twee extremen (gemiddelde waarden en zeer gedetailleerde informatie) bestaan er verschillende vereenvoudigde voorstellingen van de realiteit, die elk gebruikt kunnen worden afhankelijk van het stadium in de ontwerpprocedure. De moeilijkheid bestaat er altijd in om de pertinente data te verzamelen en deze te verwerken met het oog op het voortbrengen van min of meer accurate profielen.

6.1.1.1 Bronnen van data

Voor een nieuwe installatie is het gebruikelijk te vertrekken van informatie over andere gelijkaardige installaties, waarvoor data beschikbaar zijn. Nochtans kunnen veranderende ontwerppraktijken, moderne technologieën, procesveranderingen, energiebesparingen en toegenomen bezorgdheid om het milieu leiden tot significante reductie in energiebehoeften van nieuwe gebouwen of industrieën. Een andere informatiebron zijn de designstudies voor processen (in een industrie) en voor verwarming, ventilatie en luchtbehandeling van gebouwen. Schattingen voor gebouwen kunnen ook gebaseerd worden op parameters zoals gemiddelde consumptie per eenheidsvolume bezette ruimte, gemiddeld verbruik van warm water per bewoner, altijd gecombineerd met typische dagelijkse distributie toepasbaar in het specifiek type van gebouw. Meer ingewikkelde procedures gebruiken gespecialiseerde computersoftware voor belastingsvoorspellingen.

Voor bestaande installaties zijn meestal historische verbruiksdata beschikbaar. De meest accurate informatie wordt natuurlijk gehaald uit gedetailleerde metingen van het verbruik (door de gebruiker of zijn leverancier). Alternatieve bronnen van informatie zijn facturen van elektriciteit of brandstof en on-site data beheerssystemen. Metingen van productie kunnen ook data verschaffen die nuttig zijn voor het schatten van energiebehoeften. Voorgaande studies van energieverbruik, energiebesparingstechnieken en beheersing van de vraag kunnen uiteraard ook nuttige informatie verschaffen. Gedetailleerde metingen zijn vrijwel steeds beschikbaar voor wat betreft elektriciteit en aardgas, soms ook voor de verbruikte warmte zelf. Mits het rendement van de warmteproductie-installaties gekend is, kan men uit het brandstofverbruik echter ook het warmteverbruik met redelijke nauwkeurigheid afleiden.

Bepaalde thermische belastingen zijn gekende functies van omgevingscondities. Bijvoorbeeld, belastingen van ruimteverwarming zijn functie van de omgevingstemperatuur. Voor vele steden zijn analytische vergelijkingen opgesteld voor de berekening van de gemiddelde omgevingstemperatuur als functie van de tijd voor de 8760 uren van een jaar d.m.v. regressieanalyse van klimaatgegevens. Zodoende kunnen eenvoudige modellen opgesteld worden om de seizoensvariaties van de belasting van ruimteverwarming te bepalen.

Indien aanvaardbare data niet beschikbaar zijn, kan het nodig zijn een meetcampagne uit te voeren in samenwerking met het nutsbedrijf en/of door meetapparatuur tijdelijk te installeren, alvorens over te gaan tot de finale selectie en afmetingen van het WKK-systeem. De

meetcampagne kan ook gebruikt worden om onderscheid te maken tussen de verschillende behoeften van energievormen.

6.1.1.2 Aandachtspunten bij de verkregen data

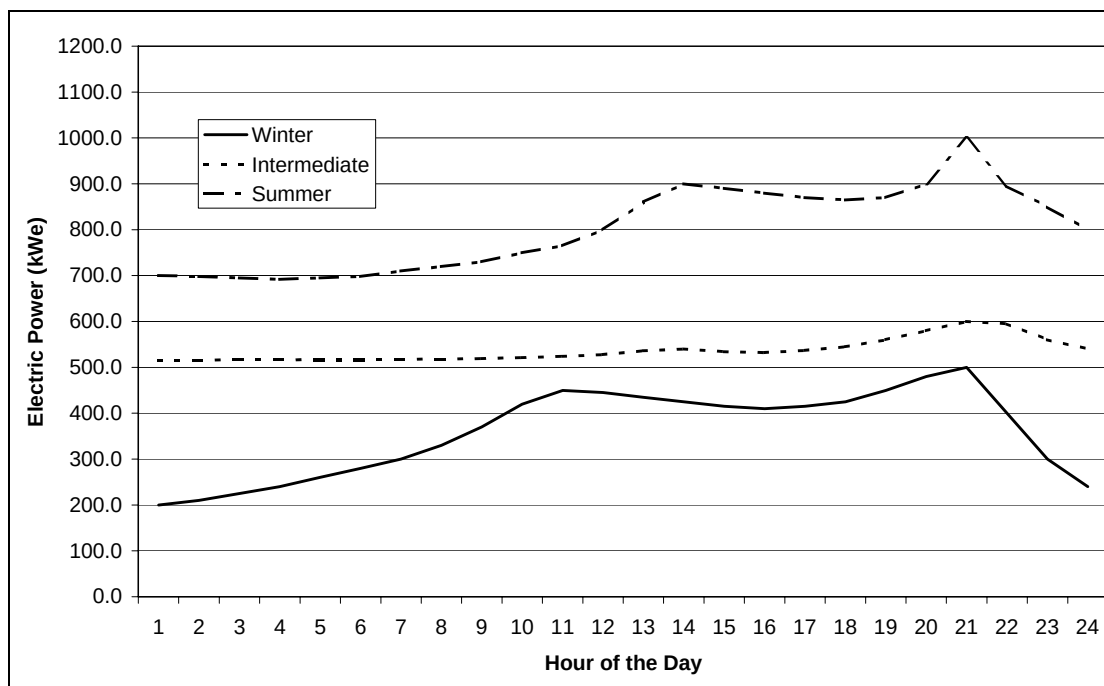
Vooreerst dienen uiteraard allerlei plannen voor toekomstige uitbreiding, verwijdering of wijzigingen aan de installatie en zijn processen in rekening te worden gebracht om toekomstige belastingen te kunnen voorspellen. Energiebesparingsmaatregelen, beheersing aan de vraagzijde, veranderingen in processen kunnen immers niet alleen kosteneffectief zijn op zichzelf, maar kunnen ook het type, de dimensionering en de economie van het WKK-systeem beïnvloeden.

Daarnaast zou steeds een onderzoek moeten uitgevoerd worden om enkel die energievraag aan het licht te brengen die door warmtekrachtkoppeling kan ingevuld worden. Immers, indien men de warmtevraag bijvoorbeeld afleidt uit de het brandstofverbruik, dient men zeker te zijn dat het gemeten brandstofverbruik enkel en alleen voor warmteproductie werd gebruikt. Brandstoffacturen kunnen immers ook brandstof gebruikt voor koken of zelfs voor voertuigen omvatten. Ook wordt op sommige sites stoom verbruikt die bekomen wordt door warmterecuperatie bij bv externe processen. Het spreekt voor zich dat het vervangen van deze ‘fatale’ warmte door warmte geleverd door een WKK, niet de energetisch meest gunstige optie is.

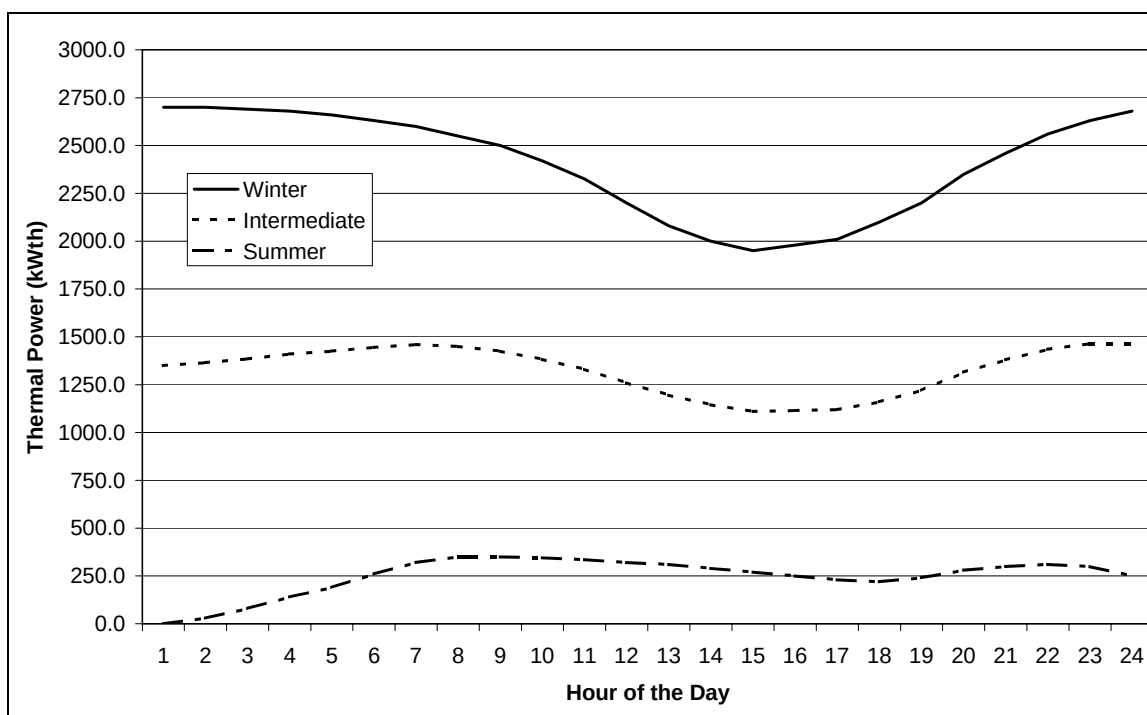
Het is bovendien niet onwaarschijnlijk dat beschikbare data onnauwkeurigheden bevatten ten gevolge van verschillende oorzaken: onnauwkeurige meters, leesfouten, foute verwerking van data, enz. Daarom wordt het ten stelligste aangeraden om de nauwkeurigheid en samenhang van de data nogmaals te controleren op een andere manier. Bijvoorbeeld, wanneer zowel data van brandstofverbruik als stoomproductie van een boiler beschikbaar zijn, is het aan te raden om het boilerrendement te berekenen; een onwaarschijnlijke waarde van de efficiëntie is een indicatie voor fouten in de data.

6.1.1.3 Profielen

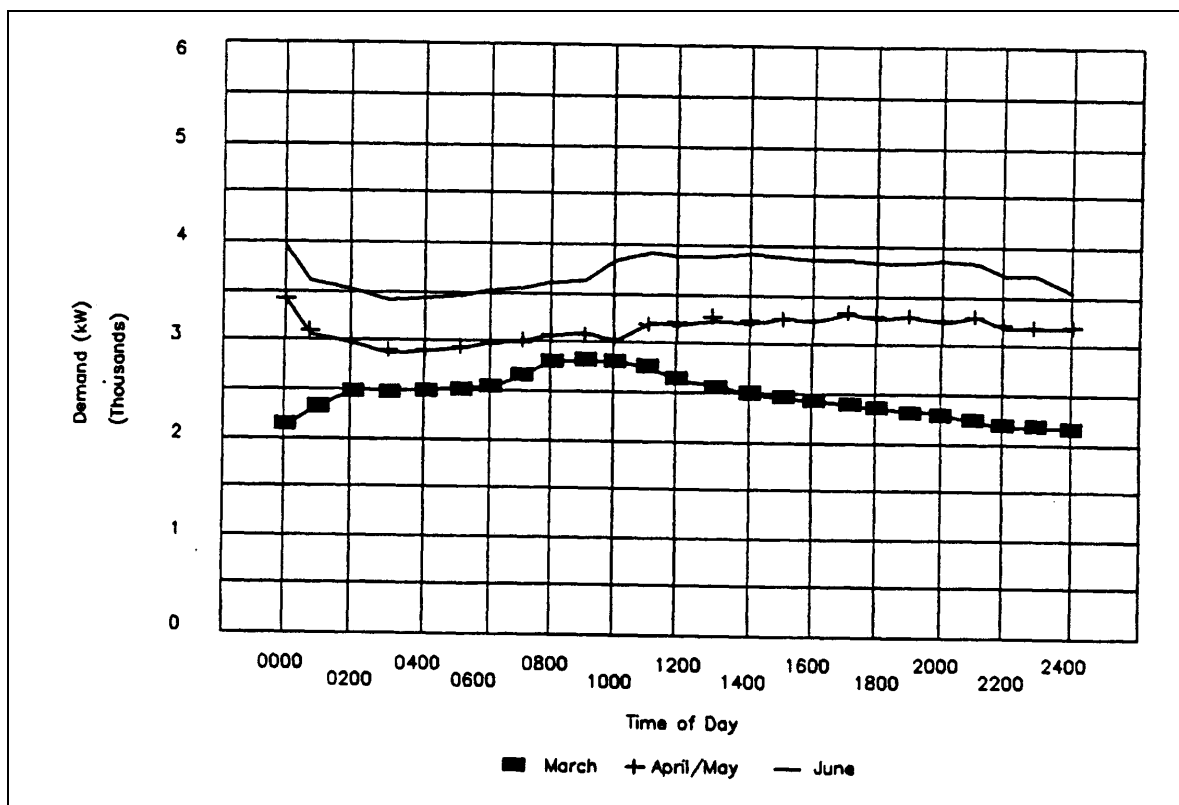
Het doel van al de inspanningen beschreven in de vorige paragrafen is het ontwikkelen van uurprofielen van de belasting voor elke dag van het jaar. Het is niet nodig, en waarschijnlijk niet praktisch haalbaar, om 365 verschillende profielen te hebben. Afhankelijk van de beschikbare informatie worden belastingsprofielen getekend voor groepen van gelijkaardige dagen (vanuit het standpunt van belasting). Zo kan men zich beperken tot profielen voor verschillende maanden of seizoenen, en voor verschillende werkregimes (weekdagen, weekends). Voorbeelden worden getoond in Figuur 6.1 – Figuur 6.4.



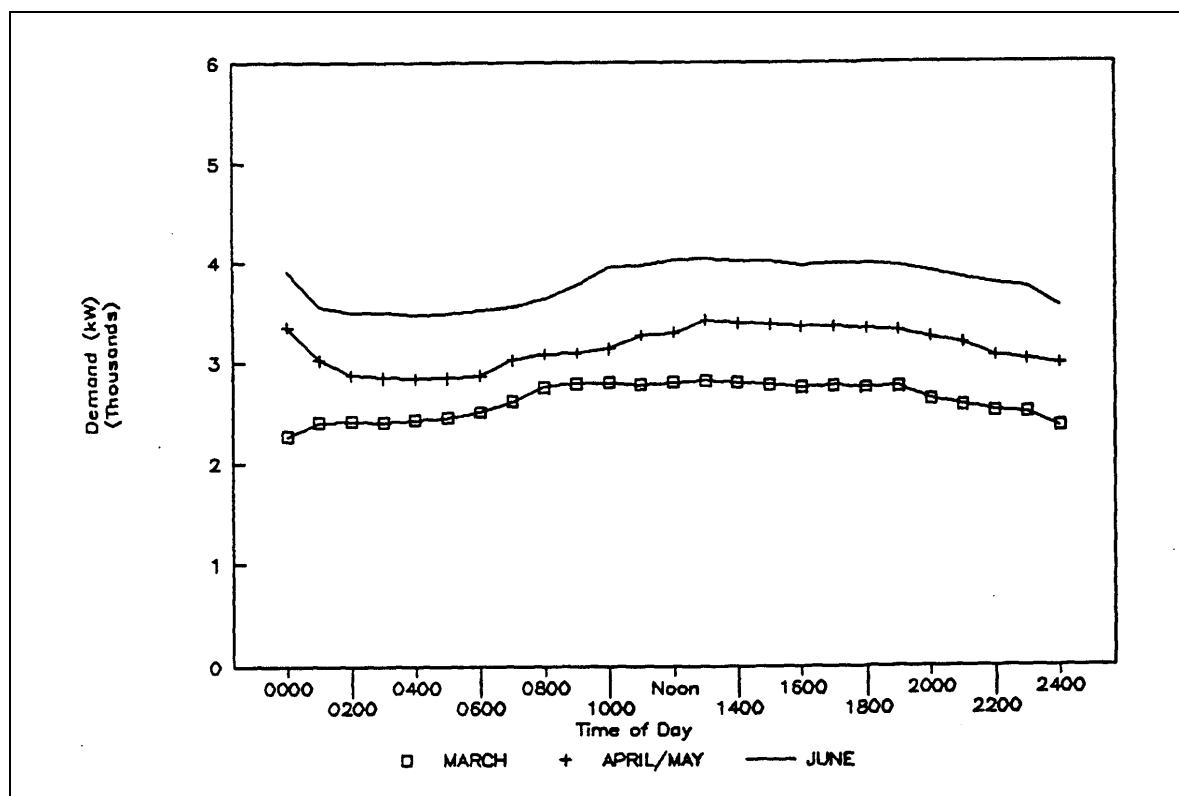
Figuur 6.1: Elektrische vermogenprofielen per uur voor typische dagen in de winter, tussenseizoen en zomer in een hotel.



Figuur 6.2: Thermisch vermogenprofielen per uur (ruimteverwarming en warm water) voor typische dagen in de winter, tussenseizoen en zomer in een hotel.



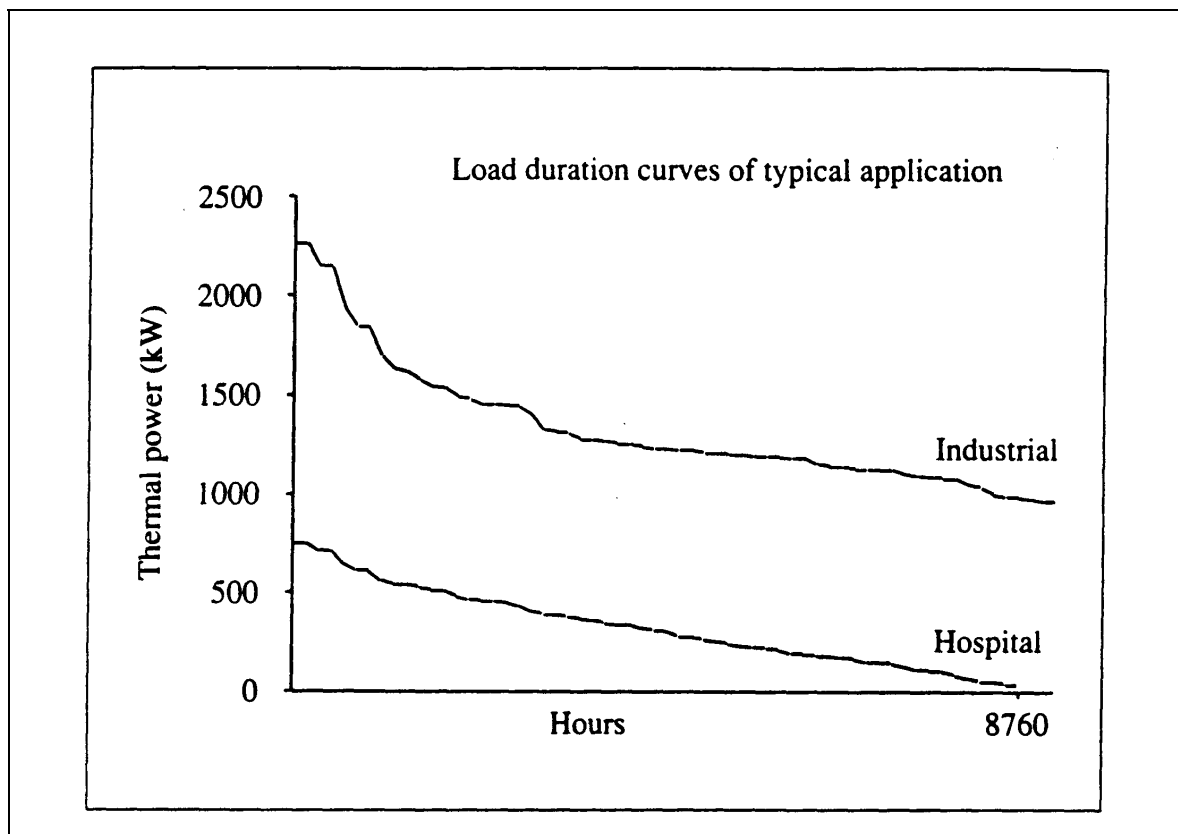
Figuur 6.3: Profielen van weekdays in een ziekenhuis per seizoen. (Orlando 1996)



Figuur 6.4: Profielen van weekenddagen in een ziekenhuis per seizoen. (Orlando 1996)

6.1.2 Belastingsduurcurven

Na de belastingsprofielen is het nuttig de belastingsduurcurve voor elke energievorm te tekenen. Deze bekomt men door de uurlijkse waarden van de vraag van groot naar klein te rangschikken. Op die manier toont de belastingsduurcurve het aantal uren dat de vraag groter is dan een bepaald vermogen. De coördinaten van de grafiek kunnen zowel in absolute waarden (kW, uren) als in percentages (% van maximale vraag, % van tijd) zijn. Een voorbeeld wordt getoond in Figuur 6.5.



Figuur 6.5: Voorbeeld van belastingsduurcurven (Jennekens 1989)

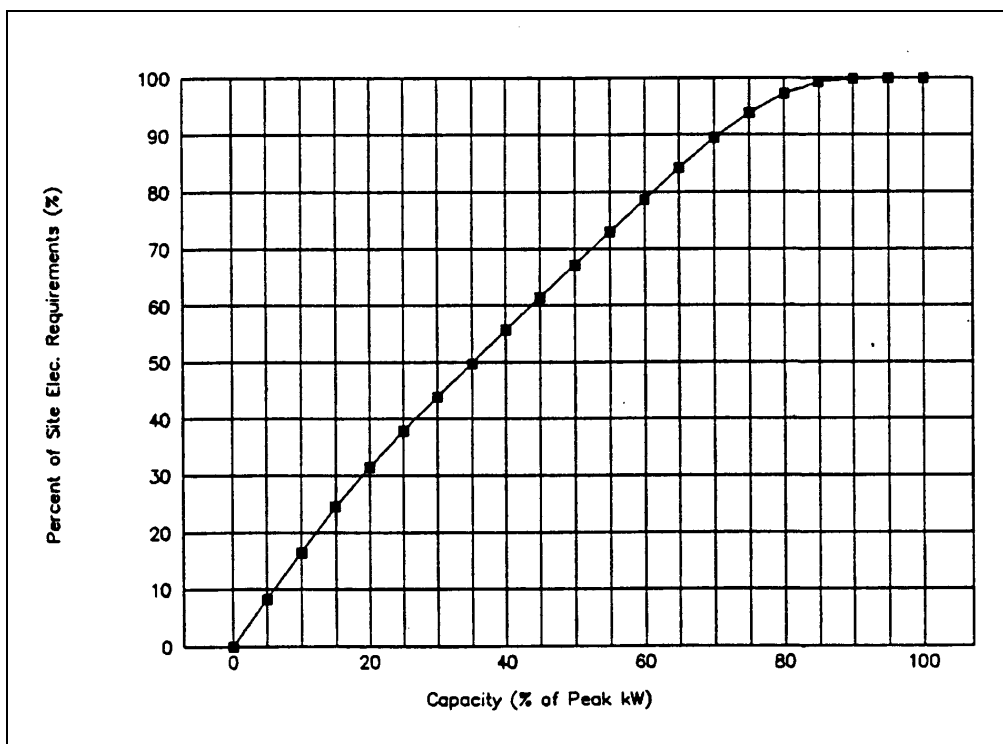
Belastingsduurcurven geven een indicatie omtrent de basislast en piekbehoeften en kunnen helpen bij het dimensioneren van een systeem.

6.1.3 Capaciteitsbelastingcurven

Door de belastingscurve over de tijd te integreren wordt de capaciteitsbelastingcurve bekomen. Deze geeft het totale energieverbruik van de site bij of beneden een bepaald vermogenniveau weer. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 6.6.

Volgens Figuur 6.6 zal de site in kwestie bijna 90% van de energie, vereist gedurende een maand, verbruiken bij vermogenniveaus gelijk aan of lager dan 70% van de piek. Wanneer een WKK wordt geïnstalleerd, gedimensioneerd op 70% van het piekvermogen, zal deze bijgevolg 90% van de energie vereist gedurende deze maand, kunnen voorzien. Om niet 90% maar 100% van de vereiste energie te kunnen voorzien, moet het vermogen van de WKK vermeerderd worden van 70% tot 100%, i.e. met 43%. Het vermogen en bijgevolg de kost van een systeem verhogen met meer dan 40% om de amper 11% meer energie te leveren aan de site, is iets wat slechts

kosteneffectief kan zijn indien het mogelijk is het teveel aan elektriciteit te verkopen aan het net onder gunstige economische voorwaarden.



Figuur 6.6: Voorbeeld van een capaciteitsbelastingcurve voor één maand (Orlando 1996)

6.2 Werkingsmodes van WKK-systemen

Bij de dimensionering van een WKK-systeem is het reeds nodig om de werkingmode van het WKK-systeem vast te leggen. Immers, de manier waarop de installaties, eenmaal gebouwd, zullen uitgebaat worden, beïnvloedt het ontwerp van de machine. Een werkingmode wordt gekarakteriseerd door de parameter die het op elk moment geproduceerde elektrische en thermische vermogen bepaalt. Er zijn verschillende werkingmodes mogelijk, waarvan de meest voorkomende de volgende zijn.

- *Warmtevraag-gestuurd:* De nuttige thermische output van een WKK-systeem is op elk moment gelijk aan de warmtevraag (zonder de maximale capaciteit van de warmtekrachtinstallatie te overschrijden). Wanneer de gegenereerde hoeveelheid elektriciteit groter is dan de vraag wordt het teveel aan elektriciteit aan het net verkocht. In het omgekeerde geval wordt bijkomende elektriciteit van het net aangekocht.
- *Elektriciteitsvraag-gestuurd:* De geproduceerde hoeveelheid elektriciteit is op elk moment gelijk aan de elektrische vraag (zonder de maximale capaciteit van de WKK te overschrijden). Wanneer de door de WKK geproduceerde hoeveelheid warmte kleiner is dan de warmtevraag, voorziet een supplementaire boiler (die standby staat) de rest van de vraag. Indien er meer warmte wordt geproduceerd dan gevraagd wordt, wordt het teveel aan warmte eventueel gebruikt in een absorptie koelmachine of naar de omgeving geloosd doorheen koelers of de uitlaatgassen.
- *Gecombineerde sturing warmte/elektriciteitsvraag:* Gedurende bepaalde perioden wordt de warmtevraag gevolgd, terwijl in andere perioden de elektriciteitsvraag gevolgd wordt. De

keuze voor één van beide is gebaseerd op factoren als de belastingsniveaus, de brandstofprijs en het elektriciteitsstarief op de bepaalde dag en tijd.

- *Eilandbedrijf*: Er is een volledige dekking van de elektrische en thermische vraag op elk moment, zonder verbinding met het net of standby boiler. Deze mode vereist dat het systeem reserve elektrische en thermische capaciteit heeft. Daarom is het WKK-systeem in dit geval meestal opgebouwd uit meerdere units, zodat in het geval een unit buiten dienst is om welke reden dan ook, de overblijvende units de elektrische en thermische belasting kunnen dekken. Dit is de duurste strategie, althans minstens vanuit het oogpunt van investeringskost.

In het algemeen resulteert de uitbating gebaseerd op de warmtevraag in de grootste primaire energie besparing (*FES* en *FESR*) en veelal ook in de beste economische prestatie, tenminste voor WKK-systemen in de industriële en gebouwsector. In de nutsbedrijfssector hangt de werkingsmode af van de totale netwerkbelasting, de beschikbaarheid van elektriciteitscentrales en de verbintenissen van het nutsbedrijf met zijn klanten met betrekking tot voorziening van elektriciteit en warmte.

Echter, het toepassen van algemene regels is niet steeds de meest geschikte aanpak. Elke toepassing heeft immers zijn eigen onderscheiden karakteristieken: er is een verscheidenheid aan WKK-systemen (type technologie, afmetingen, configuratie); het ontwerp van een WKK-systeem dient soms aangepast te worden aan de noden van de gebruiker; het ontwerp van een WKK-systeem beïnvloedt de mogelijke werkingsmodes, en vice versa; de technische en economische parameters kunnen veranderen met tijd gedurende de werking van het systeem;...

Al deze aspecten maken het noodzakelijk om beslissingen niet enkel op basis van vuistregels te nemen, maar ook systematische optimalisatieprocedures, gebaseerd op mathematisch programmeren, te gebruiken voor zowel het ontwerp als de uitbating van het systeem.

6.3 Procedure voor het dimensioneren van een systeem

De technische dimensionering van een WKK-installatie is nauw verweven met de analyse van de financiële haalbaarheid van een project. Een bepaalde configuratie kan immers technisch zeer interessant blijken, maar een financieel ontoereikend resultaat opleveren. De analyses van zowel de technische als de financiële (of economische) haalbaarheid van een project leiden samen tot de dimensionering van het systeem, en worden de haalbaarheidsstudie genoemd.

6.3.1 Eerste fase: analyse van de energievraag en de site

Als start van de technische dimensionering wordt een inspectie van de site uitgevoerd, om tot een eerste beoordeling te komen of de technische condities zodanig zijn dat warmtekrachtkoppeling een haalbare optie is of niet. Aspecten die onderzocht dienen te worden zijn onder meer:

- Grootte en profiel van elektriciteitsvraag en warmtevraag.
- Energiebesparingsmaatregelen die kunnen geïmplementeerd worden vóór WKK wordt toegepast.
- Plannen voor veranderingen in processen die elektriciteitsvraag en/of de warmtevraag zouden kunnen beïnvloeden.

- Overeenstemming van de warmtevraag en het warmte-aanbod geleverd door beschikbare WKK-technologieën.
- Beschikbaarheid van plaats voor plaatsing van de WKK.
- Mogelijkheid tot aansluiting van de WKK op het (interne of externe) elektrische net, aansluiting op het gasnet (indien van toepassing) en inpassing in het thermisch systeem van de warmteverbruiker.
- Effect dat WKK kan hebben op de nood tot het installeren en/of op de werking van andere uitrusting zoals backup-boilers, noodgeneratoren, gascompressoren, compressie- of absorptiekoelers.

Meestal laten de ervaring van de onderzoeker en enkele vuistregels toe om op basis van bovenvermelde aspecten tot een eerste, vrij rudimentaire inschatting te komen over de haalbaarheid van een WKK-project. In grote projecten kan een meer gedetailleerde pre-haalarheidsstudie aangeraden worden voor een betere beoordeling in dit stadium. De pre-haalarheidsstudie verschilt op zich weinig van de eigenlijke haalarheidsstudie, maar vertrekt van minder nauwkeurige data, en maakt hier en daar benaderende veronderstellingen.

Alhoewel het voorgaande betrekking heeft op de plaatsing van een WKK op een bestaande site, worden gelijkaardige aspecten ook onderzocht wanneer een nieuwe site (gebouw, industrie) in de ontwerpfase is. In feite is in een dergelijk geval de integratie van het WKK-systeem met de rest van de installatie veel eenvoudiger en is de kans op een rendabel project groter.

6.3.2 Tweede fase: selectie van technisch haalbare systemen

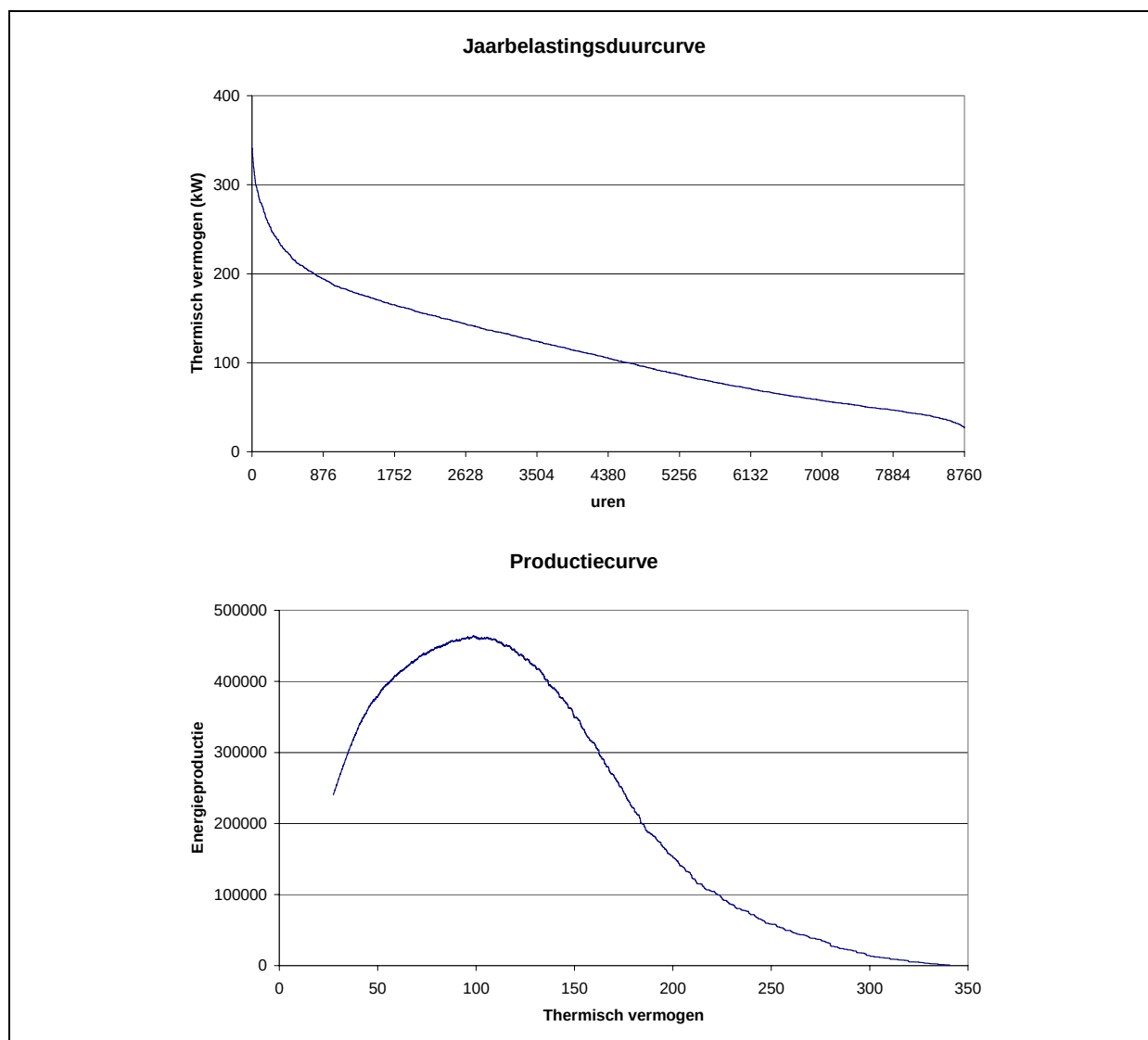
Aan de hand van de in vorige fase verzamelde gegevens over de energievraag kan een WKK-systeem technisch gedimensioneerd worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de jaarbelastingsduurcurves of monotoondigrammen (Fig. 6.5) voor warmte en elektriciteit. In deze diagrammen worden, zoals eerder vermeld, de 8760 uurlijkse waarden van de energievraag gerangschikt volgens grootte, en dus niet chronologisch. Doet men dit zowel voor elektriciteit als voor warmte, dan bekomt men twee jaarbelastingsduurcurves.

Uitgaande hiervan kan men een eerste inschatting bekomen van het vermogen en het aantal draaiuren van de installatie, door te zoeken welke installatie het meeste elektriciteit respectievelijk warmte produceert (beiden als energie, in kWh). Dit komt overeen met de grootste rechthoek onder de jaarbelastingsduurcurve. Met behulp van enkel een jaarbelastingsduurcurve, is het niet steeds eenvoudig te bepalen wat precies de grootste rechthoek onder de curve zal zijn. Daarom maakt men ook vaak gebruik van de productiecurve. Deze curve kan worden bekomen door, voor elk punt op de Y-as van de jaarbelastingsduurcurve, de oppervlakte van de rechthoek onder de curve te bepalen. Aldus bekomt men de geproduceerde hoeveelheid energie in functie van het vermogen van het systeem, ten minste indien men veronderstelt dat het systeem slechts één mogelijk werkingpunt heeft (namelijk vollast). Het maximum in de productiecurve correspondeert met de grootste rechthoek onder de jaarbelastingsduurcurve. Een voorbeeld van een jaarbelastingsduurcurve en de ervan afgeleide productiecurve wordt getoond in figuur 6.7.

Afhankelijk van de gekozen werkingmode van het systeem, bekijkt men de jaarbelastingsduurcurve voor warmte of voor elektriciteit, of beiden. In de meeste gevallen wordt bij het dimensioneren van de WKK vertrokken van de warmtevraag. Dit impliceert dat enkel de jaarbelastingsduurcurve voor warmte in rekening wordt gebracht, en de vermogengrootte van de

WKK dus bepaald wordt door de grootste rechthoek te zoeken onder de jaarbelastingsduurcurve voor warmte (figuur 4). De reden hiervoor is dat in tegenstelling tot warmte, elektriciteit goed transporteerbaar is. Indien een warmtegedimensioneerde WKK teveel elektriciteit produceert voor het bedrijf of het gebouw kan deze elders nuttig aangewend worden en dit terwijl lokaal een maximale hoeveelheid warmte wordt opgewekt met de WKK. Bij een elektrisch gedimensioneerde WKK daarentegen kan overtollige warmte niet altijd nuttig aangewend worden, en dient deze weggekoeld te worden.

Hoewel warmtegedimensioneerde WKK-systemen dus de voorkeur verdienen, zijn er ook argumenten om te dimensioneren op de elektriciteitsvraag. Bij een warmte-gedimensioneerde WKK kan het immers voorkomen dat de WKK niet actief is bij een hoge elektriciteitsvraag (cfr. synchronisme elektriciteits- en warmtevraag). De elektriciteit dient dan aangekocht te worden bij het openbare net wat aanleiding kan geven tot een hoge penaliserende voor het piekverbruik. Bovendien is teruglevering van overtollige elektriciteit economisch vaak minder aantrekkelijk. Beide elementen leiden ertoe dat men uit economische overwegingen toch kan kiezen voor een elektrisch gedimensioneerde WKK. In deze fase van de haalbaarheidsstudie kan men beide opties open houden, en afwachten wat de analyse van de financiële haalbaarheid oplevert.

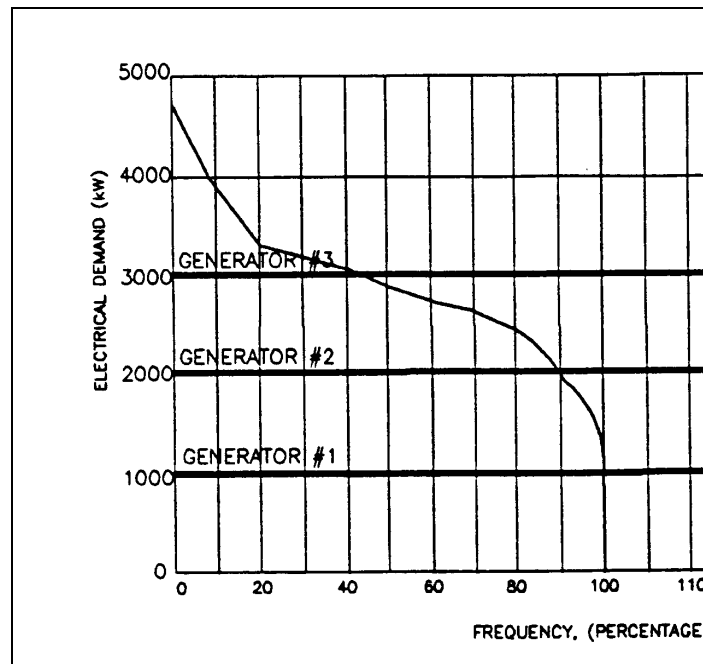


Figuur 6.7: Jaarbelastingsduurcurve (boven) en productiecurve (onder)

De hierboven beschreven methodiek geeft echter niet meer dan een eerste indicatie van het elektrisch en thermisch vermogen van de installatie. Bij de eigenlijke dimensionering komt immers veel meer kijken.

- Jaarbelastingsduurcurves hebben de zeer belangrijke tekortkoming dat ze geen rekening houden met de mate van synchronisme tussen de elektriciteits- en warmtevraag. Het kan dus gebeuren dat perioden met hoge elektriciteitsvraag samenvallen met perioden van lage warmtebehoefte en omgekeerd. Bij de eigenlijke dimensionering van WKK-systemen dient men wel rekening te houden met het synchronisme tussen de elektriciteits- en warmtevraag. In het meest extreme geval kan daarvoor zelfs een dynamische simulatie van de WKK en de warmte-en elektriciteitsvraag uitgevoerd worden, om zodoende een correct beeld te krijgen van de reële werkingscondities en rendabiliteit van het project. In gevallen waar er een sterke faseverschuiving is tussen elektrische en thermische belasting is het nuttig de technische en economische haalbaarheid van thermische opslag of (niet zo veel gebruikt) elektrische opslag te bestuderen met het oog op een verhoging van de productie van elektriciteit en warmte via WKK. De selectie van het type, het design en het beheer van de opslageenheid is van cruciaal belang voor de energetische en economische prestatie van het gehele systeem.
- Er mag bij het dimensioneren van een installatie niet enkel gekeken worden naar de maximalisatie van de geproduceerde hoeveelheid energie. Ook de efficiëntie van de energieproductie dient mee in rekening te worden gebracht. Een suboptimale machine voor wat betreft de geproduceerde hoeveelheid energie kan immers veel efficiënter zijn dan de zogezegd optimale installatie. Het verdient daarom de voorkeur om bij de dimensionering van de installatie ook voor elke mogelijke configuratie te berekenen wat de efficiëntie is, en te streven naar een maximalisatie van de primaire energiebesparing of het exergetisch rendement. In veel gevallen zal de configuratie met maximale energieproductie echter in de buurt liggen van de configuratie met de hoogste primaire energiebesparing
- De eerste indicatie via de jaarbelastingsduurcurves houdt geen rekening met de flexibiliteit van de gekozen machine. Bij een gasturbine met bijgestookte afgassenketel kan de bijstook en dus ook de warmteproductie gevarieerd worden, motoren en in mindere mate ook turbines kunnen in deellast bedreven worden, ... Houden we rekening met flexibiliteit, dan wordt de geproduceerde hoeveelheid energie niet langer weergegeven door een rechthoek onder de curve, maar door een andere vlakke figuur. Het bepalen van de installatie die een zo groot mogelijke hoeveelheid energie produceert, wordt hierdoor minder eenvoudig. Deellastprestatie van de motoren moet immers ook in rekening gebracht worden, vermits dit resulteert in lagere energie-efficiëntie.
- De grootste rechthoek onder de curve impliceert dat slechts één machine wordt geplaatst, of dat meerdere machines worden geplaatst die allen tegelijkertijd draaien. In realiteit kan het echter voorkomen dat men de geproduceerde hoeveelheid energie kan vergroten door twee machines te plaatsen en deze in functie van de vraag al of niet beiden in te zetten. Dit geeft bovendien aanleiding tot een grotere bedrijfszekerheid. Een voorbeeld wordt getoond in Figuur 6.8, dewelke de belastingscurve voor elektriciteit van een bedrijf toont, met een piekvraag van 4800 kW. Laten we veronderstellen dat drie motor-generator sets geïnstalleerd zijn, elkeen met een nominaal vermogen van 1000 kW. Volgens Figuur 5.6 kan Generator 1 voortdurend in bedrijf zijn bij zijn nominaal vermogen. Generator 2 kan

echter slechts ongeveer 95% van de tijd op nominaal vermogen werken, terwijl Generator 3 slechts ongeveer 65% van de tijd op vol vermogen draait. Andere combinaties van aantal motor-generatoren en nominaal vermogen kunnen bestudeerd worden met behulp van dezelfde belastingsduurcurve.



Figuur 6.8: Belastingsduur curve en verscheidene generatoren (Orlando 1996)

Indien men de eerste inschatting verder verfijnt, door rekening te houden met het synchronisme tussen warmtevraag en elektriciteitsvraag, de flexibiliteit van de installatie, de efficiëntie van de installatie en de mogelijkheid om meerdere units te plaatsen, dan kan een theoretisch optimale installatie bepaald worden. Men kan dan op zoek gaan naar een aantal op de markt beschikbare configuraties, die qua aard en qua grootte in de buurt liggen van het theoretische optimum. Bij elke configuratie hoort bovendien een werkingsmode.

6.3.3 Derde fase: analyse van de financiële haalbaarheid

Hoewel in dit hoofdstuk aandacht wordt besteed aan de technische dimensionering, kan deze moeilijk los gezien worden van de analyse van de financiële haalbaarheid. Een bepaalde configuratie kan immers technisch de perfectie benaderen, maar helemaal niet rendabel blijken. Daarom wordt er in de meeste gevallen voor gekozen om in de vorige fase een aantal technisch haalbare opties open te houden, en deze allen economisch door te rekenen. Hoe dit precies gebeurt, wordt in detail behandeld in een volgend hoofdstuk. Een combinatie van technische en economische parameters zal dan bepalen welke van de mogelijke configuraties uiteindelijk weerhouden wordt.

6.3.4 Vierde fase: gedetailleerd design

Voor het systeem geselecteerd in de vorige fase volgt een gedetailleerde studie. Gedetailleerde technische specificaties van de belangrijkste unit(s) worden neergeschreven, met daarbij niet alleen de vermogens, rendementen en deellastgedrag, maar ook emissies, geluids- en trillingsniveaus. Specificaties voor andere belangrijke componenten worden ook voorzien.

De locatiesite van het systeem wordt uiteindelijk geselecteerd en de designstudie wordt uitgevoerd, wat de nodige plannen voor constructie of wijziging van het gebouw (indien nodig) en voor de funderingen van het systeem oplevert.

Constructietekeningen worden gemaakt, voor brandstofbevoorrading (met inbegrip van tanks, indien nodig), luchtinlaat- en uitlaatgasleidingen, pijpleidingen, elektrische netwerken en netverbindingen.

Eens alles technisch gekend is, kan de berekening van de financiële kant van de zaak verfijnd worden, om na te gaan of het resultaat nog steeds voldoet aan de verwachtingen.

6.3.5 Vijfde fase: sensitiviteitsanalyse

Omdat de berekening van de financiële haalbaarheid in vele gevallen berust op enkele hypothesen aangaande de brandstofprijs, de elektriciteitsprijs, de beschikbaarheid van de installatie,..., en gezien ook andere parameters kunnen veranderen tijdens de werkingsperiode van de WKK, is het aangewezen om bij de haalbaarheidsstudie reeds na te gaan hoe zwaar de invloed van een aantal parameters is op het bekomen resultaat. Zo kan bepaald worden of het project nog steeds haalbaar is bij wijziging van de omstandigheden, of omgekeerd: hoe ver bepaalde parameters kunnen variëren alvorens het project niet meer interessant zal zijn. We spreken van een sensitiviteitsanalyse of gevoeligheidsanalyse.

Indien nodig kan een zeer uitgebreide analyse uitgevoerd worden, waarbij ook aandacht wordt besteed aan de waarschijnlijkheid van verschillende parametercombinaties (Monte Carlo analyse). Hier wordt enkel ingegaan op meer eenvoudige analyses.

6.3.5.1 Redenen om een sensitiviteitsanalyse uit te voeren

Er zijn verscheidene redenen om een sensitiviteitsanalyse uit te voeren:

- Om het effect van onnauwkeurig gekende parameters op het resultaat aan het licht te brengen. Sommige parameters kunnen een aanzienlijke graad van onzekerheid hebben. Gevoeligheidsanalyses kunnen bepalen of het de moeite waard is om kosten te maken om betere schattingen van deze parameterwaarden te bekomen. Daarentegen kan blijken dat het resultaat niet gevoelig is aan parameters waarvan eerst gedacht werd dat ze kritisch waren; zodoende moeten die niet nauwkeuriger bepaald worden.
- Om één of meer parameters te vinden waaraan het resultaat zeer gevoelig is. Wanneer zulke parameters bestaan, kan een verandering in de corresponderende systeemkenmerken onderzocht worden.
- Om toevoegingen of wijzigingen aan het systeem aan het licht te brengen die de algemene prestatie kunnen verbeteren. Bijvoorbeeld: informatie kan verkregen worden omtrent het nuttig zijn van een verhoging van de capaciteit of de invoering van een energieopslag.

De zodoende verworven informatie is dikwijls zo belangrijk dat de gevoeligheidsanalyse evenwaardig of zelfs meerwaardig kan zijn aan het resultaat zelf.

6.3.5.2 Methodes voor sensitiviteitsanalyse

Twee methodes van gevoeligheidsanalyse worden hier beschreven.

6.3.5.2.1 Parametrische studie

Het financiële haalbaarheid van een installatie wordt herhaaldelijk berekend voor verscheidene waarden van een parameter in een bepaalde range, terwijl de waarden van alle andere parameters constant gehouden worden. De resultaten worden voorgesteld in grafieken, waarin de waarden van bepaalde maatstaven voor financiële haalbaarheid getekend worden als functie van de parameter. Op een tweedimensionale grafiek kan het simultane effect van twee parameters duidelijk geïllustreerd worden. Driedimensionale grafieken kunnen het gelijktijdige effect van drie parameters illustreren. Boven dat aantal is de grafische voorstelling niet duidelijk of mogelijk.

6.3.5.2.2 Onzekerheidsevaluatie

Laat p_j , $j=1, 2, \dots$, de parameters zijn waarvoor een gevoeligheidsanalyse nodig is en Δp_j de onzekerheid(svariatie) op parameter p_j . De onzekerheid(svariatie) op het resultaat F^* (bijvoorbeeld IRR, NPV of terugverdientijd, maar zeker een functie van de parameters in kwestie) te wijten aan de onzekerheid op de parameter p_j wordt gegeven door:

$$\Delta F^* = F^*(p_j + \Delta p_j) - F^*(p_j) \cong \left(\frac{\partial F^*}{\partial p_j} \right) \Delta p_j \quad (6.1)$$

De maximaal mogelijke onzekerheid op het resultaat te wijten aan onzekerheden op een set van parameters wordt gegeven door:

$$\Delta F_{\max}^* \cong \sum_j \left| \frac{\partial F^*}{\partial p_j} \right| \Delta p_j \quad (6.2)$$

De meest waarschijnlijke onzekerheid op de optimale waarde van de objectieffunctie te wijten aan onzekerheden op een set van parameters wordt geschat via:

$$\Delta F_{\text{prob}}^* \cong \sqrt{\sum_j \left[\frac{\partial F^*}{\partial p_j} \Delta p_j \right]^2} \quad (6.3)$$

Het kan zijn dat het niet gemakkelijk is de partiële afgeleiden optredend in vergelijkingen (6.1)-(6.3) analytisch te evalueren. Dan wordt numerieke evaluatie uitgevoerd, afgeleiden vervangend door eindige verschillen in de nabijheid van elke p_j . Het moet ook opgemerkt worden dat de variatie van p_j klein moet zijn vergeleken met de waarde van p_j (kleine $\Delta p_j/p_j$) opdat de resultaten verkregen via vergelijkingen (6.1)-(6.3) een aanvaardbare nauwkeurigheid zouden hebben.

Een dergelijke analytische aanpak geeft niet de directe indruk van een grafische, maar het kan om het even welk aantal parameters gelijktijdig behandelen.

7 ECONOMISCHE HAALBAARHEID VAN WARMTEKRACHTKOPPELING

Een warmtekrachtkoppelingssysteem moet niet enkel efficiënt zijn op het vlak van energie, het moet ook economisch rendabel zijn om de investering te doen. In dit hoofdstuk wordt stilgestaan bij de kapitaalkost, de werkings- en onderhoudskosten van warmtekrachtkoppelingssystemen, de in Vlaanderen geldende subsidiesystemen, de criteria van een economische prestatie en procedures voor economische waardering. Ook enkele toepassingsvoorbeelden worden voorgesteld. Er moet benadrukt worden dat de cijfergegevens die hier gegeven worden indicatief zijn en enkel kunnen gebruikt worden voor de eerste schattingen. Bovendien kunnen de waarden veranderen met de tijd. Daarom moeten de uiteindelijke beslissingen gebaseerd zijn op actuele en accurate gegevens, waaronder data die beschikbaar worden gesteld door de bedrijven die de uitrusting zullen leveren, installeren en/of onderhouden.

7.1 Belangrijkste kosten bij warmtekrachtinstallaties

Om een zo correct mogelijke economische analyse of haalbaarheidsstudie uit te voeren, is het nodig om de kost voor de bouw van het systeem enerzijds en de kost voor de werking anderzijds te kennen. In wat volgt gaan we hier dieper op in.

7.1.1 Investeringskost

De investeringskost wordt ook wel de kapitaalkost of initiële kost genoemd. Deze bestaat uit de de aanschafkost van alle onderdelen, de kost voor de installatie ervan en de zogenaamde projectkost, of ‘ingenieur- en managementkost’.

7.1.1.1 Uitrustingskosten

De uitrustingskosten bestaan uit de kosten voor de aanschaf van de uitrusting, inclusief belastingen, en vervoer ervan naar de site. Ze hangen af van de componenten waaruit het systeem bestaat, en hun specificaties. De belangrijkste onderdelen zijn:

- Motorblok en generator: het motorblok, eventuele apparatuur om alternatieve brandstoffen mogelijk te maken, de generator, de spanningsregelaar van de generator, emissiebeheersysteem in het primair circuit,...
- Warmterecuperatiesysteem: warmtewisselaars, afgassenketel, waterbehandelingseenheid,... benodigd aantal trappen in druk en temperatuur, uitrusting voor emissieregeling,...
- Bijstook: Extra branders voor bijkomende thermische capaciteit, al dan niet met mogelijkheid tot alternatieve brandstof; eventueel ventilatoren en andere apparatuur om de afgassenketel te kunnen gebruiken bij stilstand van de gasturbine (fresh air firing);...
- Uitlaatgassysteem: schoorsteen, één of meerdere uitlaatpijpen bij meerdere motoren, uitrusting voor emissieregeling, bypass schoorsteen en klep.
- Elektronica en automatisering: regelsystemen, besturingssystemen, monitoring, apparatuur voor telecontrole,...

- Brandstof toevoer: verbinding met het brandstof toevoersysteem, opslagmogelijkheid, brandstofmeting (zeker voor aardgas), eventueel een gascompressor indien de druk van het geleverde gas niet hoog genoeg is,...
- Elektrische aansluiting. Verbindingslijn, enkele of dubbele verbinding, veiligheids- en meetuitrusting.
- Thermische (en andere) aansluiting: leidingen voor verbinding met de circuits van water, stoom, samengeperste lucht (indien nodig); apparatuur noodzakelijk voor goede werking van deze leidingen (kleppen, afsluiters,...),...
- Ventilatie en verbrandingsluchtsystemen: kanalen, filters, geluidsdempers,...
- Geluidsomkasting, indien van toepassing
- Vervoerskosten.
- Belastingen, indien van toepassing.

7.1.1.2 Installatiekosten

Deze bestaan uit:

- Installatievergunningen
- Aankoop van het terrein, sanering (indien nodig) en voorbereiding ervan
- Bouwkunde: gebouwen, funderingen, wegen,...
- Constructie en bouw van de uitrusting,
- Documentatie en bouwtekeningen.

Sommige van deze kosten zijn bij bepaalde projecten niet van toepassing, bijvoorbeeld als het terrein vroeger reeds gebruikt werd voor warmtekraftinstallaties.

7.1.1.3 Projectkosten (soft costs)

De ontwerpkosten en professionele dienstverleningskosten voor de analyse, planning en ontwikkeling van een warmtekraftkoppelingssysteem worden vaak projectkosten of soft costs genoemd. Ze kunnen tot 15-30% van de totale investeringskost bedragen. De belangrijkste projectkosten zijn:

- Kosten voor gedetailleerd ontwerp (design) door architecten en./of studiebureau.
- Kosten voor het beheer van het project.
- Verzekering van de risico's inherent aan de bouwwerf
- Kosten voor milieustudies en milieuvergunningen.
- Kosten voor keuringen, inspecties,...
- Wettelijke kosten.
- Opleiding.

Deze lijst is uiteraard niet limitatief. In sommige gevallen kunnen ook nog een aantal 'financiële kosten' in rekening gebracht worden, zoals bijvoorbeeld de intrest betaald tijdens de bouw, banktarieven, schuldenverzekering,...

Het is bovendien aangewezen in de budgettraming een toeslag voor onvoorziene kosten (contingency) in rekening te brengen. Vroeg in het ontwerpproces kan deze toeslag 15-20% van de totale kost bedragen. Bij de voltooiing van het ontwerp, wanneer de onzekerheid is gereduceerd, kan de toeslag gereduceerd worden tot bijvoorbeeld 5%. Voorbeelden van het aandeel van de diverse kosten vervat in de investeringskost, worden in de volgende tabellen gegeven:

Tabel 7.1: Indeling van de investeringskosten voor een kleinschalige warmtekrachtkoppeling [Jennekens, 1989].

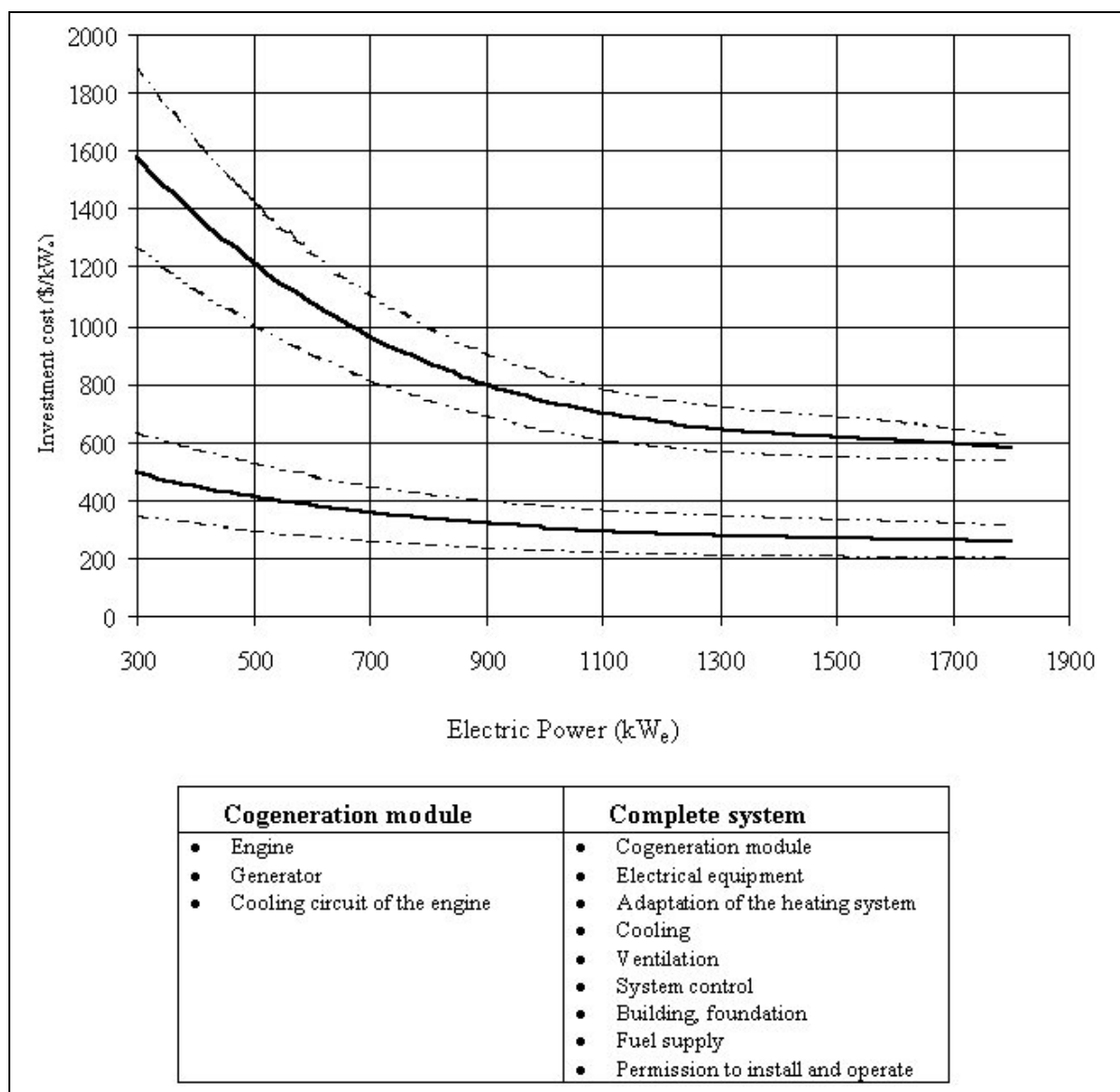
Type van de kost	% van totaal
Warmtekrachtkoppelingseenheid inclusief warmte-recuperatieuitrusting	55
Instrumentatie, voorschriften en regeling	15
Hulpsystemen	5
Verbinding met het net	5
Bouwonkosten en/of akoestische omheining	10
Installatie en commissie loon	5
Project beheerskosten	
Totaal	100

Tabel 7.2: Voorbeelden van een indeling van investeringskosten voor een warmtekrachtkoppeling met een gasturbine en een stoomturbine [Belding, 1982].

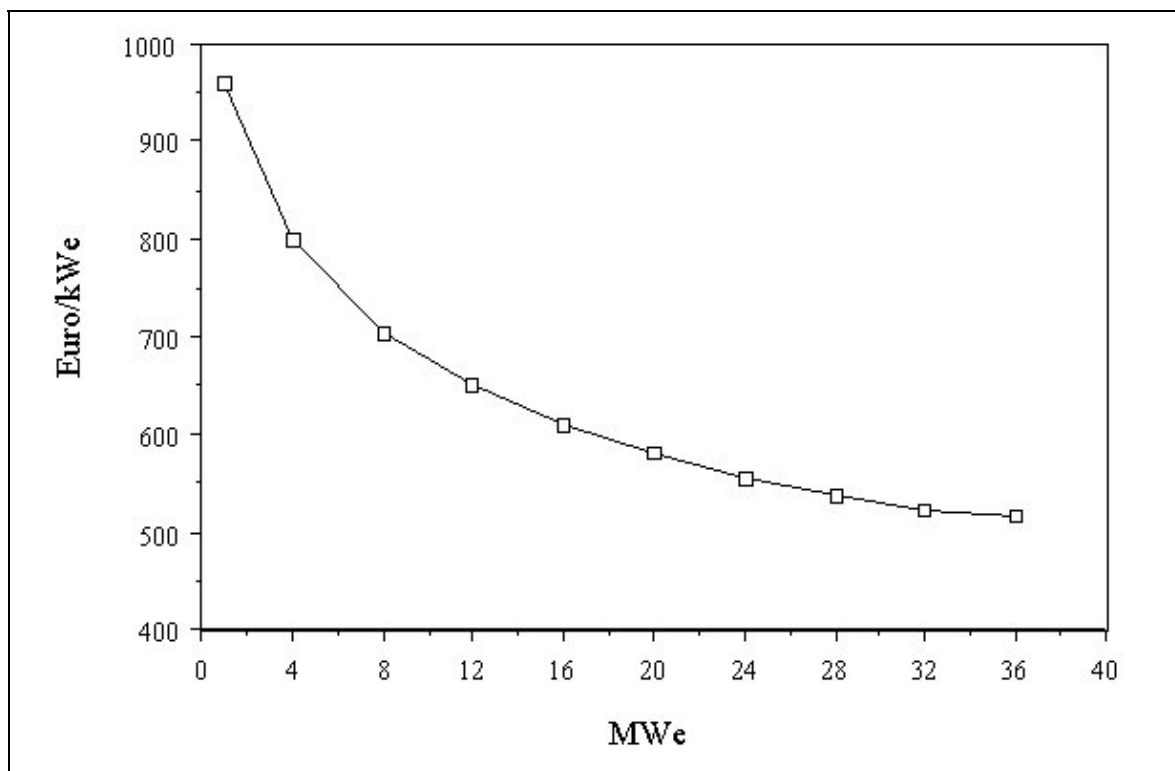
Type van de kost	% van totaal	
	Gasturbine ⁽¹⁾	Stoomturbine ⁽²⁾
Turbinen-Generator		
Warmterecuperatie stoomgenerator		
Instrumentatie, voorschriften, regeling		
Hulpsystemen		
Verbinding met het net		
Infrastructuur (land, gebouwen, wegen)		11
Ontwerp- en constructiemanagement	11	11
Risicopremie	15	15
Totaal	100	100
(1) Nominaal vermogen 10 MW.		
(2) Niet-condenserende turbine. Nominaal vermogen 30 MW.		
(3) Ketelkost is inbegrepen.		

Het is vanzelfsprekend dat de investeringskost van een WKK-project afhangt van veel factoren, en dus erg kan verschillen van project tot project. Typische waarden voor deze kosten zijn dus zeker niet altijd bruikbaar, maar kunnen nuttig zijn om een initiële en zeer ruwe schatting te

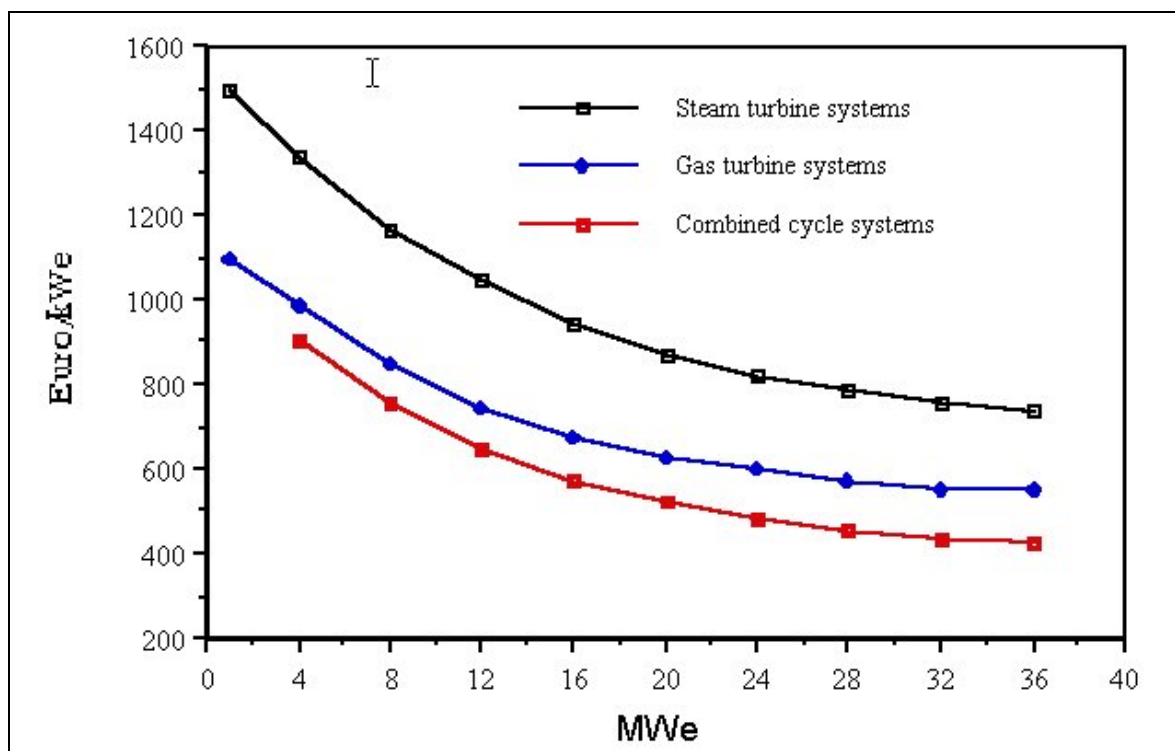
geven. Algemene kosteninformatie, gepubliceerd in de literatuur, is weergegeven in de grafieken van figuren 7.1 tot 7.3. Kosten verkregen uit deze figuren hebben een onzekerheid van $\pm$ (20-25)%, hetgeen duidelijk blijkt uit figuur 7.1, waar de gestreepte lijnen de onzekerheidszone aanduiden.



Figuur 7.1: Specifieke investeringskost van kleinschalige warmtekrachtkoppelsystemen met zuigermotor met interne verbranding.



Figuur 7.2: Specifieke investeringskost van warmtekrachtkoppelingssystemen met Dieselmotor.



Figuur 7.3: Specifieke investeringskost van middelgrote- tot grootschalige warmtekrachtkoppelingssystemen.

7.1.2 Werkings- en onderhoudskosten

De werkings- en onderhoudskosten hangen in zekere mate af van de beslissingen die genomen worden in de ontwerp- en constructiefase van het systeem. Het is mogelijk dat acties die de investeringskost verminderen, kunnen leiden tot verhoogde werkings- en onderhoudskosten, met een negatieve impact op de totale economische prestatie van het project. De belangrijkste werkings- en onderhoudskosten zijn de volgende.

Brandstof is gewoonlijk de belangrijkste werkingskost, dewelke 80% van de totale werkingskost kan bedragen. Bij kleinschalige WKK moet men rekening houden met een duurdere aanschafkost van de brandstof dan bij grote, industriële klanten. Dit is te wijten aan de grotere afnamevolumes. Brandstof hoeft echter niet steeds aangekocht te worden, maar kan ook een bijproduct zijn van een bepaald proces. Bovendien kunnen ook sommige afvalstromen dienst doen als of verwerkt worden tot brandstof.

Tot de uitbatingkost rekenen we in hoofdzaak de personeelskosten. Deze hangen af van de grootte van het systeem en de automatiseringsgraad. Meerdere kleinere warmtekrachtkoppelingssystemen kunnen samen vanaf een centrale controlezaal bediend en uitgebaat worden, en vereisen dus minder personeel dan grotere eenheden. Als het systeem echter een afgassenketel bevat, dan kunnen veiligheidsvoorschriften lokaal personeel eisen, zelfs voor de kleinere systemen. Als een vaste brandstof wordt gebruikt, kan eveneens meer personeel nodig zijn. Het is belangrijk te verduidelijken of extra personeel nodig is, of dat het reeds beschikbare personeel (vb. in een industrie) het systeem kan uitbaten. In het laatste geval zal de extra personeelskost nul zijn. Andere uitbatingkosten zijn te wijten aan sommige werkingsproducten, zoals smeerolie, toevoegwater en chemicaliën, maar zijn klein in verhouding tot de personeelskosten.

Onderhoudskosten hangen af van factoren zoals de gekozen WKK-technologie, het brandstoftype, de werkingscyclus, de werkingsomgeving,... Het gebruik van zwaardere of vuile brandstoffen en de werking in een vuile omgeving zullen de onderhoudskosten verhogen. Het frequent opstarten en afzetten zal de thermische spanningen verhogen, hetgeen in verhoogde onderhoudskosten resulteert. Als bekwaam personeel beschikbaar is op de site, dan zal de extra onderhoudskosten lager zijn. Voor het onderhoud kunnen diverse soorten onderhoudscontracten afgesloten worden, gaande van contracten die enkel het meest noodzakelijke onderhoud omvatten tot all-in contracten, waarbij elke interventie in geval van incidenten in het contract is inbegrepen. Uiteraard heeft elke type onderhoudscontract een eigen kost. Door middel van systemen voor prestatie monitoring en conditiebewaking van de machines, kunnen mogelijke defecten geïdentificeerd of voorspeld worden. Dit laat toe enkel onderhoud uit te voeren wanneer het nodig is, in plaats van op geplande tijdstippen zoals voorgeschreven door de constructeur. Hierdoor kunnen de onderhoudskosten mogelijk gereduceerd worden, doch het grotere risico van een dergelijke werkwijze wordt niet steeds door de constructeurs ondersteund.

De verzekering wordt ook bij de werkingskosten gerekend. Men kan zich uiteraard verzekeren tegen de materiële schade en de schade aan derden bij machinebreuk, maar men kan ook het verlies van inkomsten, het verlies van interesten, de kosten bij een bedrijfsonderbreking,... mee opnemen in de verzekering. De verzekeringskost wordt niet alleen bepaald door de scope van de verzekering, maar ook door de gekozen WKK-technologie, de prestatiegeschiedenis van de uitrusting, en het systeemontwerp en de werkingswijze. De verzekeringskost bedraagt per jaar ongeveer 0.25-2% van de totale investeringskost. In sommige gevallen, vooral bij kleinere

eenheden, kan de verzekering binnen het algemene verzekeringsprogramma van de eigenaar vallen, zonder bijkomende kost.

Andere werkingskosten zijn administratieve kosten, managementlonen, belastingen, intrest op een lening (indien van toepassing).

Werkings- en onderhoudskosten worden ook ingedeeld in vaste en variabele kosten. Vaste kosten zijn deze kosten die sowieso gemaakt worden, ongeacht de werking van het WKK-systeem. Variabele kosten hangen daarentegen wel af van het aantal draaiuren of de geproduceerde energiehoeveelheden.

Werkings- en onderhoudskosten zijn systeemspecifiek, net als de investeringskost. Kosteninformatie gepubliceerd in de literatuur kan enkel gebruikt worden voor een eerste schatting. Tabel 7.3 maakt geen onderscheid tussen vaste en variabele kosten, maar geeft enkel gemiddelde kosten.

Tabel 7.3: Onderhoudskosten voor warmtekraftkoppelingssystemen.

Systeem	Onderhoudskost* (Euro/MWh _e)
Stoomturbine	2.3 – 1.5
Gasturbine	5.4 – 4.6
Gecombineerde cyclus	5.4 – 4.6
Zuigermotor	9.2 – 5.8
* Lagere waarden zijn toepasbaar op grotere systemen.	

7.2 Belangrijkste opbrengsten bij warmtekraftinstallaties

7.2.1 Geproduceerde energie

7.2.1.1 Warmte

In de meeste gevallen zal de door de warmtekraftinstallatie geproduceerde warmte verbruikt worden door de eigenaar van de installatie of de warmteverbruiker op wiens terrein een warmtekraftinstallatie staat. In dit geval kan men de opbrengst van de geproduceerde warmte gelijk stellen aan de vermeden kost voor de productie van dezelfde hoeveelheid warmte in een ketel. Echter, hierbij wordt enkel de marginale kost of de variabele kost voor warmteproductie in rekening gebracht. De boiler zal immers in veel gevallen gebruikt worden als backup-installatie, zodat de investeringskost en de vaste werkings- en onderhoudskosten van de boiler hoedanook dienen gemaakt te worden, en dus niet kunnen bestempeld worden als vermeden kosten.

De opbrengst toe te schrijven aan de geproduceerde warmte kan bijgevolg benaderd worden door:

$$\frac{Q \cdot V_F}{\eta_B} \quad (7.1)$$

Hierin is Q de geproduceerde hoeveelheid warmte (in MWh), V_F de waarde van de brandstof (in €/MWh) en η_B het rendement van de ketel die de warmte zou geproduceerd hebben indien de warmtekrachtinstallatie niet was gebouwd. Dit rendement is specifiek voor elke toepassing, en dus niet steeds met voldoende nauwkeurigheid gekend, zodat het desnoods dient benaderd te worden door een geschatte waarde.

Als (een deel van) de door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde warmte verkocht wordt, dan kan men de opbrengst van (dit deel van) de geproduceerde warmte natuurlijk eenvoudiger bepalen als zijnde de prijs die de koper ervoor betaalt. Echter, deze prijs zal meestal ook in lijn liggen met de productiekost in een ketel.

7.2.1.2 Elektriciteit

Op een gelijkaardige manier kan men de opbrengst bepalen die toe te schrijven is aan de geproduceerde elektriciteit. Deze is:

$$E \cdot V_E \quad (7.2)$$

Hierin is E de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (in MWh) en V_E de waarde van de geproduceerde elektriciteit (€/MWh). Deze waarde van de geproduceerde elektriciteit hangt af van een groot aantal factoren. De invloed van een groot aantal van deze factoren is echter equivalent aan de invloed van één meer gekende factor, namelijk de marktprijs voor elektriciteit. Deze marktprijs wordt op zijn beurt immers door dit groot aantal factoren beïnvloed. Enkele andere invloedsfactoren zijn typisch voor warmtekrachtkoppeling, zoals de lokale elektriciteitsproductie, het warmtevraagprofiel, de onderbreekbaarheid van de warmtelevering,...

De door de WKK geproduceerde elektriciteit kan lokaal verbruikt worden (via directe lijnen) of in het openbare net geïnjecteerd worden. In dit laatste geval zal de waarde van de elektriciteit gelijk zijn aan de prijs die een elektriciteitsleverancier er wil voor betalen. Deze prijs kan in eerste instantie benaderd worden door de productiekost van elektriciteit in een centrale of de marktprijs voor elektriciteit op de (lange termijn) elektriciteitsmarkt. Daarnaast zal de prijs echter nog aangepast dienen te worden om rekening te houden met de kosten voor balancing (variaties op het profiel), zodat de uiteindelijke waarde van de elektriciteit lager zal liggen dan de marktprijs.

Anderzijds, wanneer de elektriciteit geproduceerd door de WKK lokaal verbruikt wordt, is de opbrengst ervan gelijk aan de vermeden kost voor aankoop van dezelfde hoeveelheid elektriciteit van het net. Deze zal echter hoger liggen dan de marktprijs, gezien ook taksen, heffingen, transport- en distributiekosten,... deel uitmaken van de vermeden kost voor elektriciteitsaankoop.

In tegenstelling tot bij een conventionele elektriciteitscentrale, spelen de marktprijs voor elektriciteit en de actuele vraag naar elektriciteit in een land zelden een rol bij de beslissing of een warmtekrachtinstallatie op een bepaald moment in werking zal zijn of niet. Warmtekrachtinstallaties worden immers meestal gestuurd door de lokale (warmte)vraag. Dit houdt in dat warmtekrachtinstallaties soms zullen draaien wanneer marktprijzen voor elektriciteit laag zijn, of zullen stilliggen wanneer de marktprijzen voor elektriciteit hoog zijn. Het warmtevraagprofiel, dat mee bepaalt wanneer elektriciteit zal geproduceerd worden door de WKK, beïnvloedt daarom de gemiddelde waarde van de geproduceerde elektriciteit, gezien de marktprijs voor elektriciteit niet constant is.

Bovendien dient men er rekening mee te houden dat de warmtekrachtinstallatie meestal niet in staat zal zijn de totale elektriciteitsvraag van de site te dekken. Dit zal zeker het geval zijn wanneer

de installatie niet draait (onderhoud, ongeplande stop,...), maar kan ook voorkomen wanneer de lokale elektriciteitsvraag groter is dan de elektriciteitsproductie door de WKK. In deze gevallen zal nog een bepaalde hoeveelheid elektriciteit via het net moeten aangekocht worden. Deze hoeveelheid is kleiner en minder voorspelbaar dan de hoeveelheid die via het net zou gevraagd worden indien de WKK er niet was, en zal daarom een hogere kostprijs hebben. Dit dient in rekening te worden gebracht bij het bepalen van de opbrengsten en kosten van de warmtekrachtinstallatie, hetzij door de opbrengst van de geproduceerde elektriciteit te verlagen, hetzij door een verhoging van de totale kosten.

7.2.2 Subsidies

Gezien de gunstige invloed van warmtekrachtkoppeling op het brandstofverbruik en op het milieu, wordt warmtekrachtkoppeling in diverse landen door de overheid aangemoedigd. In wat volgt, bespreken we enkel de specifieke situatie voor Vlaanderen en België. Het is echter belangrijk te vermelden dat ook in andere landen soortgelijke of totaal andere systemen bestaan om warmtekrachtkoppeling financieel te ondersteunen.

Voor wat de Belgische situatie betreft moeten we een onderscheid maken tussen twee types van subsidies: enerzijds de investeringssubsidies, die eenmalig zijn en proportioneel met het geïnvesteerde bedrag, en anderzijds de uitbatingssubsidies, die over een langere tijd lopen en proportioneel zijn met de (energetische) prestaties van de installatie.

7.2.2.1 *Investeringssubsidies*

In België bestaan diverse investeringssubsidies. Sommigen zijn eerder fiscale voordelen, andere zijn feitelijke terugbetalingen van een deel van het investeringsbedrag. Doordat warmtekrachtkoppeling onder de regionale bevoegdheden valt, verschillen de systemen bovendien van regio tot regio. Hierna worden enkele subsidiesystemen beschreven, maar de opsomming is zeker niet limitatief.

7.2.2.1.1 Verhoogde investeringsaftrek

Verhoogde investeringsaftrek is een fiscale steunmaatregel van het federale Ministerie van Financiën, waardoor bedrijfswinst en baten worden vrijgesteld van belasting, voor een bedrag dat gelijk is aan een percentage van een bepaalde bedrijfsinvestering. Voor energiebesparende maatregelen geldt een verhoogd percentage, dat in 2004 13,5% bedroeg.

Het is wel zo dat deze maatregel alleen geldt voor nieuwe investeringen. Als begunstigden van de maatregel komen nijverheids-, handels- en landbouwondernemingen in aanmerking, alsook vrije beroepen, ambten, posten en andere winstgevende bezigheden. In principe wordt de investeringsaftrek in één maal verleend, maar bepaalde belastingplichtigen kunnen deze desgewenst spreiden. Het aanvragen van deze investeringsaftrek kan door het bijvoegen van een speciaal formulier bij de aangifte.

7.2.2.1.2 Ecologiepremie in Vlaanderen

De ecologiepremie is een investeringssubsidie van de Vlaamse Overheid voor ecologische investeringen die ondernemingen doen in het Vlaams Gewest. Ze werd eind 2004 hervormd, en kan nu enkel nog via de website <http://www.vlaanderen.be/ecologiepremie> worden aangevraagd.

Een aantal sectoren (NACE-codes) komen niet in aanmerking voor de ecologiepremie. Hiertoe behoren de land- en bosbouw, de eerste verwerking van landbouwproducten, de openbare besturen, ...

De subsidie bestaat uit het terugbetalen van een deel van de meerkost van de gedane investering. Deze meerkost is het prijsverschil tussen twee mogelijke installaties, waarvan de duurste – die wordt uitgevoerd – een extra milieuvoordeel geeft.

Als kleine of middelgrote onderneming kan men genieten van een steunpercentage van 35%; voor een grote onderneming is dit 25%. De percentages kunnen verhoogd worden als men bepaalde erkenningen kan voorleggen, zoals een ISO 14001 of een EMAS-certificaat.

Voor de verschillende categorieën ondernemingen gelden de gebruikelijke definities. Onder kleine ondernemingen verstaat men dus ondernemingen die minder dan 50 werknemers tewerkstellen, een jaaromzet hebben van maximum 7 miljoen euro (of een balanstotaal van maximum 5 miljoen euro), en beantwoorden aan het onafhankelijkheidscriterium. Middelgrote ondernemingen hebben minder dan 250 werknemers, een omzet van maximum 40 miljoen euro (of balanstotaal max 27 miljoen euro), voldoen aan het onafhankelijkheidscriterium, en zijn geen kleine onderneming. Grote ondernemingen zijn dan uiteraard de overige ondernemingen.

De subsidiabele investeringen worden bepaald aan de hand van vastgelegde percentages van de totale investeringskost, terug te vinden op een technologieënlijst. Voor WKK bedragen de subsidiabele investeringen 30% van de totale investering. Voor WKK op biomassa kan een hoger percentage (40%) bekomen worden.

De uiteindelijke steun voor een klassieke WKK-toepassing bedraagt aldus 7,5% voor een grote onderneming en 10,5% voor een KMO. Met een EMAS-certificaat komt hier maximaal nog 1,5% bij. Daarnaast geldt er een maximum steunbedrag van 3,6 miljoen euro. Komt men hierboven, dan moet men ook op Europees niveau een goedkeuring krijgen, rekening houdende met Europese wetgeving inzake marktdominantie en marktconcentratie.

De uitbetaling van de steun kan vrij snel gebeuren. In principe wordt de steun uitbetaald in drie schijven: 30% na de start van de investering (datum eerste factuur), nog eens 30% nadat de helft van de investeringen zijn gerealiseerd, en tenslotte de resterende 40% na beëindiging van de investering en na controle van de inspectiedienst ter plaatse. Het is belangrijk te vermelden dat de aanvraag dient te gebeuren voor aanvang van de investeringen. Enkel facturen van na de goedkeuring van de subsidieaanvraag komen in aanmerking voor gedeeltelijke terugbetaling.

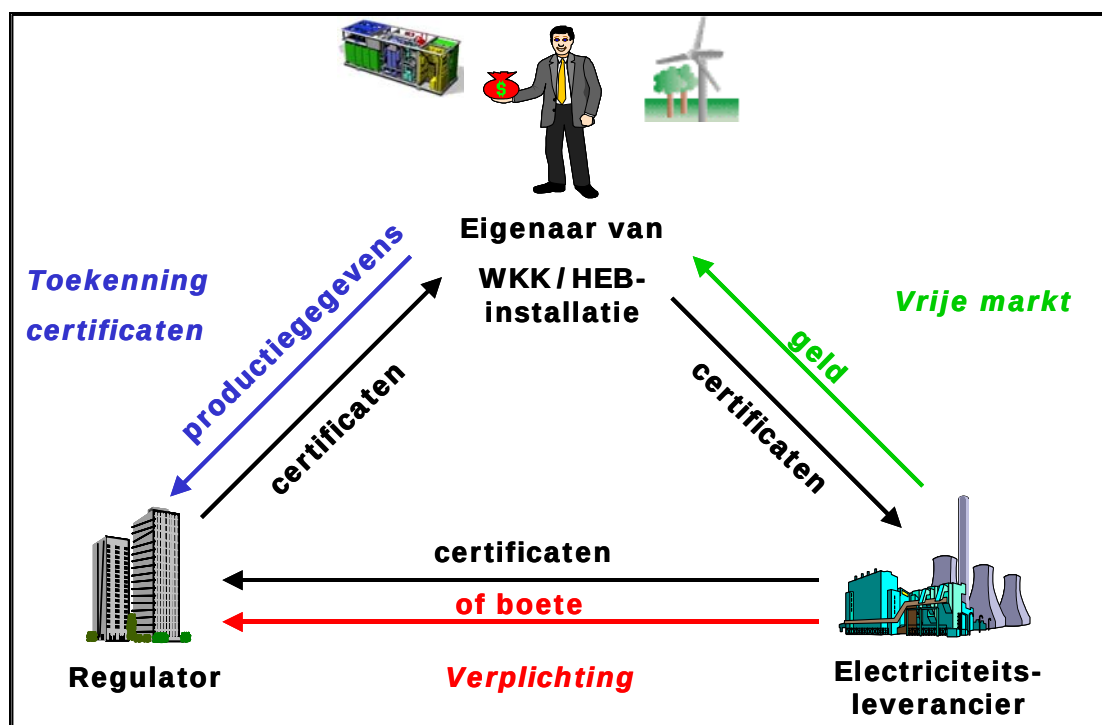
7.2.2.1.3 Steun aan demonstratieprojecten in Vlaanderen

De Vlaamse Overheid voorziet bovendien in een extra steun voor nieuwe technologieën of voor een eerste toepassing van een bestaande technologie in een bepaalde sector. Voor klassieke WKK zal dit uiteraard niet meer van toepassing zijn. Nieuwe technologieën, zoals microturbines, stirlingmotoren en brandstofcellen, bieden daarentegen wel nog mogelijkheden voor deze bijkomende investeringssubsidie. Het bedrag van de subsidie is maximaal 250 000 euro, en in praktijk een 30 tot 35% van de investering.

7.2.2.2 *Uitbatingssubsidies*

In België hebben de diverse regio's ervoor gekozen om uitbatingssteun te geven voor warmtekrachtkoppeling door middel van een systeem van verhandelbare certificaten. Er zijn niet minder dan vier certificaten systemen operationeel: in Vlaanderen heeft men groenestroomcertificaten (voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen) en

warmtekrachtcertificaten (voor primaire-energiebesparing met kwalitatieve warmtekrachtkoppeling), in Wallonië is er een systeem van groene certificaten voor zowel hernieuwbare energie als WKK, en ook Brussel heeft één systeem van groene certificaten dat HE en WKK omvat. Deze systemen zijn in een aantal opzichten analoog. Toch zijn er ook een aantal belangrijke verschillen. De belangrijkste principes van een certificatenstelsel worden geschetst door figuur 7.4.



Figuur 7.4: Basisprincipes certificatenstelsel

Na het verstrekken van de productiegegevens van zijn installatie, krijgt de eigenaar van een WKK of installatie voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen certificaten van de regulator, in Vlaanderen dus van de VREG. Het aantal certificaten wordt bepaald aan de hand van de meegedeelde productiecijfers. Vervolgens kan de eigenaar van de installatie zijn certificaten verkopen aan de elektriciteitsleveranciers. Het bedrag dat zij voor de verkoop van de certificaten ontvangen, is de marktprijs van de certificaten. De certificatenmarkt is een vrije markt, en is niet direct gekoppeld met de elektriciteitsmarkt. Men hoeft dus zijn certificaten niet te verkopen aan dezelfde elektriciteitsleverancier als deze waarmee men een contract heeft voor aankoop of verkoop van elektriciteit. Opdat er een vraag zou zijn op de markt, en opdat de marktprijs dus niet nul zou bedragen, wordt een verplichting opgelegd aan de elektriciteitsleveranciers. Dit houdt in dat zij op geregelde tijdstippen – in Vlaanderen is dit jaarlijks – een bepaald aantal certificaten moeten inleveren bij de regulator. Deze aantallen worden vooraf vastgelegd; het zijn de zogenaamde quota. Indien de elektriciteitsleveranciers onvoldoende certificaten kunnen indienen bij de regulator, dienen zij per ontbrekend certificaat een administratieve boete te betalen.

7.2.2.2.1 Vlaanderen

7.2.2.2.1.1 Groenestroomcertificaten

Groenestroomcertificaten zijn reeds operationeel sinds januari 2002. Indien elektriciteit wordt geproduceerd uit hernieuwbare energiebronnen, kunnen certificaten worden bekomen volgens

een heel eenvoudig principe: 1 certificaat per 1000 kWh geproduceerde elektriciteit. Dus rest alleen de vraag wat hernieuwbare energiebronnen zijn. Deze zijn opgelijst in het besluit van de Vlaamse Regering, en omvatten:

- Zonne-energie
- Windenergie
- Waterkracht < 10 MW
- Getijdenenergie
- Golfslagenergie
- Aardwarmte
- Biogas voortkomend uit de vergisting van organisch-biologische stoffen in vergistingsinstallaties of in stortplaatsen
- Energie opgewekt uit de volgende organisch-biologische stoffen:
 - producten, bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw
 - dierlijke mest
 - organisch-biologische afvalstoffen, die selectief ingezameld werden en niet in aanmerking komen voor materiaalrecyclage of worden verwerkt conform de bepalingen van het van toepassing zijnde sectorale uitvoeringsplan
 - organisch-biologische afvalstoffen die gesorteerd worden uit restafval en niet in aanmerking komen voor materiaalrecyclage of worden verwerkt conform de bepalingen van het van toepassing zijnde sectorale uitvoeringsplan
 - het organisch-biologisch deel van restafval, op voorwaarde dat de betrokken verwerkingsinstallatie door energierecuperatie een primaire energiebesparing realiseert van minstens 35% van de energie-inhoud van de afvalstoffen verwerkt in de installatie.

De boete die door de elektriciteitsleverancier moet betaald worden indien hij onvoldoende certificaten kan inleveren, bedroeg initieel 75 euro, maar is intussen al gestegen tot 125 euro per certificaat . In de toekomst wordt de boete op het huidige niveau gehandhaafd.

De grootte van de boete bepaalt in principe de maximale marktprijs voor een certificaat. Toch spelen nog andere zaken een rol: het kopen van een certificaat is aftrekbaar van de belastingen, maar het betalen van een boete is dit niet. Dit zorgt ervoor dat de marktprijs van de certificaten uiteindelijk zelfs licht hoger kan uitkomen dan het bedrag van de boete.

Gezien het systeem van groenstroomcertificaten in Vlaanderen reeds in werking is, zijn de eerste resultaten reeds beschikbaar, en hebben we dus reeds een indicatie voor de marktprijs van een certificaat. In de eerste inleverperiode was er een aanzienlijke schaarste aan certificaten en bedroeg de gemiddelde marktprijs 94% van de boete. Voor de tweede inleverperiode was dat 91%. In Wallonië werden gelijkaardige resultaten opgetekend. Bij een erg beperkte schaarste strandde de marktprijs in het laatste trimester van 2003 op 92% van de boete.

Bovenstaande illustreert dat de marktprijs van de certificaten de boeteprijs benadert, tenminste indien er sprake is van een schaarste aan certificaten. Deze schaarste dient verzekerd te worden door voldoende hoge verplichtingen of quota op te leggen aan de elektriciteitsleveranciers.

Bovendien bestaat er een bijkomende garantie. Groenstroomcertificaten kunnen ook worden verkocht aan ELIA of aan de distributienetbeheerder, tegen vastgestelde prijzen.

ELIA wordt verplicht groenestroomcertificaten aan te kopen die werden uitgereikt tijdens de eerste tien jaar na de indienstname van een installatie. Hiervoor gelden volgende minimumprijzen per certificaat (toestand op 1/1/2005):

- Zonne-energie : 150 €
- Off-shore windenergie : 90 €
- On-shore windenergie : 50 €
- Waterkracht : 50 €
- Andere hernieuwbare bronnen : 20 €

De distributienetbeheerder wordt enkel verplicht groenstroomcertificaten aan te kopen van installaties die in dienst zijn genomen na 8 juni 2004 (na 1 januari 2006 voor zonne-energie), en waarvan de elektriciteit niet langer dan 24 maanden voor de verkoop van de bijhorende certificaten is geproduceerd. Hier zijn de minimumprijzen per certificaat (toestand op 1/1/2005):

- Zonne-energie : 450 €
- Waterkracht, getijden- en golfslagenergie, aardwarmte : 95 €
- On-shore windenergie : 80 €
- Organisch-biologische stoffen : 80 €
- Vergisting van organisch-biologische stoffen in stortplaatsen : 80 €
- Organisch-biologisch deel van afvalstoffen : 80 €

7.2.2.2.1.2 *Warmtekraftcertificaten*

Op 5 maart 2004 keurde de Vlaamse regering het besluit houdende de openbare dienstverplichting ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekraftinstallaties, of kortweg het besluit inzake de warmtekraftcertificaten, definitief goed. Dat betekende dat het licht eindelijk op groen werd gezet voor certificaten voor warmtekraftkoppeling.

Op 15 april 2004 volgde de publicatie van het voornoemde besluit in het Belgisch Staatsblad. Het gevolg daarvan was dat het besluit officieel in werking trad op 25 april 2004. In principe kon dus vanaf die datum gestart worden met het aanvragen van certificaten bij de VREG.

Het duurde enkele maanden voor de eerste installaties door de VREG werden goedgekeurd en de eerste certificaten werden uitgereikt. Het aantal installaties waaraan inleverbare certificaten worden toegekend steeg in de daaropvolgende maanden gestaag naar 35 medio 2006. Het systeem kende dus een trage start, zodat het aantal voorgelegde certificaten bij de eerste inlevering, op 31 maart 2006, ruim beneden de quota lag.

Om enkele onzekerheden weg te werken en om de Vlaamse wetgeving aan te passen aan de Europese richtlijn inzake warmtekrachtkoppeling, werd het besluit van 5 maart 2004 vervangen door het besluit van 7 juli 2006. De Europese regelgeving bepaalt immers dat de lidstaten een systeem van garanties van oorsprong moeten invoeren en dat ze regelmatig moeten rapporteren over het potentieel aan hoogrenderende warmtekrachtkoppeling en de evolutie van het aandeel warmtekrachtkoppeling in de elektriciteitsproductie. Tevens wordt een definitie van hoogrenderende warmtekrachtkoppeling vastgelegd in de Europese richtlijn. Het nieuwe besluit implementeert deze Europese vereisten en definities in de Vlaamse wetgeving.

Het Vlaamse certificatenstelsel voor WKK was en blijft echter volledig gebaseerd op het feit dat warmtekrachtkoppeling elektriciteit en warmte kan produceren uitgaande van minder brandstof, of primaire energie, dan de klassieke, gescheiden productie van warmte en elektriciteit. De primaire-energiebesparing van de WKK ten opzichte van gescheiden productie vormt dan ook de basis voor de toekenning van de certificaten.

De “gescheiden productie” wordt in kaart gebracht met behulp van de rendementen van referentie-installaties. Voor het Vlaamse certificatenstelsel gelden de referentierendementen die werden vastgelegd in het besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006, en die identiek zijn aan de referentierendementen uit eerdere besluiten van de Vlaamse Regering en beslissingen van de VREG. De Minister van Energie heeft echter de bevoegdheid om de referentierendementen, na advies van de VREG, aan te passen aan de stand van de techniek.

Op dit ogenblik (midden 2006) bedraagt het rendement van de referentieketel voor gescheiden warmteproductie 90% indien de warmte wordt geleverd onder de vorm van warm water, 93% indien de warmte wordt geleverd onder de vorm van warme gassen voor droogtoepassingen en 85% als de warmte wordt geleverd onder de vorm van stoom of andere media. Voor gescheiden opwekking van elektriciteit gebruikt men 55% als rendement van de referentiecentrale indien het gaat om een vergelijking met een warmtekrachtinstallatie aangesloten op een elektriciteitsnet met nominale spanning hoger dan 15 kV, en 50% indien het gaat om een vergelijking met een warmtekrachtinstallatie aangesloten op een elektriciteitsnet met nominale spanning lager dan of gelijk aan 15 kV.

Om het aantal certificaten te kennen dat men voor een installatie kan verkrijgen, dient men de absolute primaire-energiebesparing van de installatie te berekenen. Maandelijks kent de VREG dan certificaten toe: één certificaat per gerealiseerde MWh primaire-energiebesparing in de voorbije maand. De formule voor het bepalen van de absolute primaire energiebesparing over een bepaalde maand, luidt als volgt:

$$PEB = E \cdot \left(\frac{1}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E \cdot \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right) \quad (7.1)$$

Hierin is:

E : de binnen de beschouwde periode (maand) door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh),

α_Q : het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie,

η_Q : het thermisch rendement van de referentieketel,

α_E : het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie,

η_E : het elektrisch rendement van de referentiecentrale.

Voor het elektrisch en thermisch rendement van de warmtekrachtinstallaties worden de gemiddelden over de beschouwde periode genomen van de operationele rendementen, bepaald na meting van de nuttige outputs en de verbruikte brandstof. Enkel voor installaties met een nominaal elektrisch vermogen kleiner dan 200 kW, mogen ontwerpgegevens voor deze rendementen gebruikt worden.

Opdat de certificaten van een installatie zouden aanvaard worden om te voldoen aan de verplichting, dus aan de gestelde quota, moet de installatie echter aan een aantal voorwaarden voldoen.

Vooreerst dient de installatie een 'hoogrenderende warmtekrachtkoppelingsinstallatie' te zijn. Volgens het Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 bedoelt men hiermee een warmtekrachtinstallatie die gemiddeld over de laatste 12 maanden een relatieve primaire-energiebesparing van minimaal 10 procent realiseert ten opzichte van de in de Europese Richtlijn gedefinieerde referentie-installaties voor gescheiden opwekking. In formulevorm betekent dit:

$$1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \geq 5\% \quad (7.2),$$

waarbij de referentierendementen η_E en η_Q dus niet gelijk zijn aan de hierboven vermelde Vlaamse waarden, maar wel aan Europees vastgelegde waarden in functie van onder meer de gemiddelde buitentemperatuur, het jaar van indienstelling, de gebruikte brandstof en het spanningsniveau van het net waarop aangesloten wordt. Tabel 7.4 geeft een indicatie van de elektrische referentierendementen in functie van het jaar van indienstelling en de aangewende brandstof. Deze waarden gelden echter voor ISO-condities, en dienen te worden verhoogd met 0.1 procentpunt per °C dat de gemiddelde buitentemperatuur lager ligt dan 15°C, en omgekeerd voor hogere buitentemperaturen. Voor België, met een gemiddelde buitentemperatuur van 11°C, zou bij de rendementen uit de tabel dus 0.4% moeten bijgeteld worden.

Daarna dient nog gecorrigeerd te worden voor de aansluitspanning. Hiervoor wordt het na temperatuurcorrectie bekomen referentierendement vermenigvuldigd met een factor die functie is van de aansluitspanning en weergegeven wordt in tabel 7.5. Waar nodig dient een gewogen gemiddelde van twee factoren genomen te worden.

Voor wat het rendement van de referentieketel betreft, worden in Tabel 7.6 de waarden getoond in functie van de warmtevorm en de aangewende brandstof. Hier zijn geen verdere correcties van toepassing, behalve dan dat de lidstaten er mogen voor opteren om de referentierendementen voor warmte onder de vorm van stoom met 5 procentpunten te laten dalen indien de energie-inhoud van het retourcondensaat in rekening wordt gebracht bij het bepalen van de nuttige warmte. In Vlaanderen is het inderdaad zo dat de nuttige warmte wordt bepaald als het verschil tussen de energie-inhoud van de stoom en deze van het retourcondensaat, zodat deze correctie inderdaad mag gebeuren.

Tabel 7.4. Europees vastgelegde rendementen voor de referentiecentrale voor elektriciteitsproductie, in functie van de aangewende brandstof en het jaar van indienstname

	Year of construction:	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006-2011
	Type of fuel*:											
Solid	Hard coal / coke	39.7%	40.5%	41.2%	41.8%	42.3%	42.7%	43.1%	43.5%	43.8%	44.0%	44.2%
	Lignite / lignite briquettes	37.3%	38.1%	38.8%	39.4%	39.9%	40.3%	40.7%	41.1%	41.4%	41.6%	41.8%
	Peat / peat briquettes	36.5%	36.9%	37.2%	37.5%	37.8%	38.1%	38.4%	38.6%	38.8%	38.9%	39.0%
	Wood fuels	25.0%	26.3%	27.5%	28.5%	29.6%	30.4%	31.1%	31.7%	32.2%	32.6%	33.0%
	Agricultural biomass	20.0%	21.0%	21.6%	22.1%	22.6%	23.1%	23.5%	24.0%	24.4%	24.7%	25.0%
	Biodegradable (municipal) waste	20.0%	21.0%	21.6%	22.1%	22.6%	23.1%	23.5%	24.0%	24.4%	24.7%	25.0%
	Non-renewable (municipal and industrial) waste	20.0%	21.0%	21.6%	22.1%	22.6%	23.1%	23.5%	24.0%	24.4%	24.7%	25.0%
	Oil shale	38.9%	38.9%	38.9%	38.9%	38.9%	38.9%	38.9%	38.9%	38.9%	38.9%	39.0%
Liquid	Oil (gas oil + residual fuel oil), LPG	39.7%	40.5%	41.2%	41.8%	42.3%	42.7%	43.1%	43.5%	43.8%	44.0%	44.2%
	Biofuels	39.7%	40.5%	41.2%	41.8%	42.3%	42.7%	43.1%	43.5%	43.8%	44.0%	44.2%
	Biodegradable waste	20.0%	21.0%	21.6%	22.1%	22.6%	23.1%	23.5%	24.0%	24.4%	24.7%	25.0%
	Non-renewable waste	20.0%	21.0%	21.6%	22.1%	22.6%	23.1%	23.5%	24.0%	24.4%	24.7%	25.0%
Gaseous	Natural gas	50.0%	50.4%	50.8%	51.1%	51.4%	51.7%	51.9%	52.1%	52.3%	52.4%	52.5%
	Refinery gas / hydrogen	39.7%	40.5%	41.2%	41.8%	42.3%	42.7%	43.1%	43.5%	43.8%	44.0%	44.2%
	Biogas	36.7%	37.5%	38.3%	39.0%	39.6%	40.1%	40.6%	41.0%	41.4%	41.7%	42.0%
	Coke oven gas, blast furnace gas, other waste gases, recovered waste heat	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%
* For fuels not mentioned in this matrix case to case reference values will be established by the Commission in accordance with Articles 4 and 14 of Directive 2004/8/EC.												

Tabel 7.5. Europees vastgelegde correctiefactoren voor het elektrisch referentierendement in functie van de aansluitspanning

	For electricity exported to the grid	For electricity consumed on-site
> 200 kV	1	0.985
100-200 kV	0.985	0.965
50-100 kV	0.965	0.945
0.4-50 kV	0.945	0.925
< 0.4 kV	0.925	0.860

Tabel 7.6. Europees vastgelegde rendementen voor de referentieketel voor warmteproductie, in functie van de aangewende brandstof en de warmtevorm

		Steam/hot water	Direct use of exhaust gases **
Type of fuel***:			
Solid	Hard coal / coke	88%	80%
	Lignite / lignite briquettes	86%	78%
	Peat / peat briquettes	86%	78%
	Wood fuels	86%	78%
	Agricultural biomass	80%	72%
	Biodegradable (municipal) waste	80%	72%
	Non-renewable (municipal and industrial) waste	80%	72%
	Oil shale	86%	78%
Liquid	Oil (gas oil + residual fuel oil), LPG	89%	81%
	Biofuels	89%	81%
	Biodegradable waste	80%	72%
	Non-renewable waste	80%	72%
Gaseous	Natural gas	90%	82%
	Refinery gas / hydrogen	89%	81%
	Biogas	70%	62%
	Coke oven gas, blast furnace gas + other waste gases	80%	72%

Een relatieve primaire energiebesparing realiseren van 10% op jaarbasis, is echter niet de enige voorwaarde opdat de certificaten van een installatie aanvaard worden om te voldoen aan de verplichting. De installatie moet bovendien gelegen zijn in het Vlaamse Gewest, en moet in dienst genomen zijn of ingrijpend gewijzigd zijn na 1 januari 2002. Dit betekent dat de steun door middel van warmtekrachtcertificaten dus specifiek wordt gericht op nieuwe of nog te bouwen installaties.

Bovendien zullen ook van deze recente of nog te bouwen installaties niet permanent alle certificaten kunnen gebruikt worden om te voldoen aan de verplichtingen. Gedurende de eerste vier jaar dat een WKK operationeel is, mogen wel alle certificaten ervan ingediend worden. Daarna, vanaf maand 49 dus, wordt echter nog slechts een fractie X van de certificaten aanvaard. X wordt berekend op basis van de relatieve primaire energiebesparing, zodat ervoor gezorgd

wordt dat een installatie die relatief veel brandstof bespaart, langer kan genieten van de certificaten en dus uiteindelijk ook meer steun krijgt. De formule is als volgt:

$$X = \frac{RPE - 0,2 \cdot (T - 48)}{RPE} \quad (7.3)$$

Met:

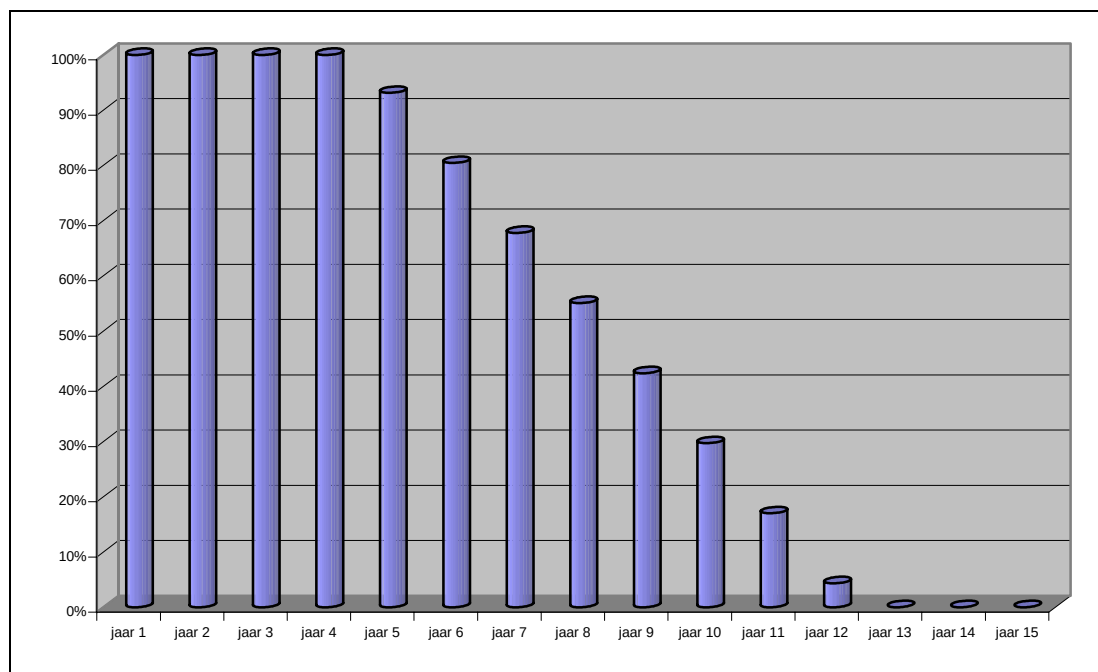
T : de tijd in maanden sinds de indienstname van de installatie

RPE : de relatieve primaire energiebesparing, zijnde:

$$RPE = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_E}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\eta_Q}} \quad (7.4)$$

De hier vermelde rendementen van referentie-installaties voor gescheiden productie zijn opnieuw de in het besluit van de Vlaamse Regering vastgelegde waarden, dus dezelfde als die gebruikt worden voor het berekenen van het aantal bekomen certificaten.

Voor een performante WKK kan de degressieperiode acht jaar of zelfs langer bedragen, wat een totale steuntijd betekent van twaalf jaar, waarbij de steun weliswaar afneemt in de tijd. Figuur 7.5 illustreert een dergelijk voorbeeld. Indien we met het gemiddelde van de bestaande installaties rekenen, komen we op een degressieperiode van zes jaar uit, of dus een totale steunperiode van 10 jaar. Het mag echter verwacht worden dat de nog te bouwen installaties performanter zullen zijn dan de gemiddelde bestaande installatie.



Figuur 7.5 : Verloop van het aantal inleverbare certificaten in de tijd; voorbeeld voor een gasmotor

De boeteprijzen werden, in het decreet van 10 juli 2003, vastgelegd. Ze bedragen 40 euro per ontbrekend certificaat op 31 maart 2006 en 45 euro per ontbrekend certificaat op 31 maart 2007 en later. De grootte van deze boete bepaalt in principe de maximale marktprijs voor een

certificaat. Toch spelen nog andere zaken een rol: het kopen van een certificaat is aftrekbaar van de belastingen, maar het betalen van een boete is dit niet. Dit zorgt ervoor dat de marktprijs van de certificaten uiteindelijk zelfs licht hoger kan liggen dan het bedrag van de boete.

Mede gebaseerd op de marktprijzen van de groenestroomcertificaten, valt het te verwachten dat de marktprijs van de warmtekrachtcertificaten de boeteprijs zal benaderen, tenminste indien er sprake is van een schaarste aan certificaten. Deze schaarste dient verzekerd te worden door voldoende hoge verplichtingen of quota op te leggen aan de elektriciteitsleveranciers. Deze quota lopen op van 1,19% van de totale elektriciteitsleveringen in Vlaanderen in 2005 tot 5,23 % ervan in 2012, en ze zijn als dusdanig gebaseerd op de invulling van een ambitieuze doelstelling van de Vlaamse overheid, namelijk het bereiken van een opgesteld elektrisch vermogen aan kwalitatieve warmtekrachtkoppeling van 1832 MW in 2012, daar waar dit nu ongeveer 900 MW bedraagt.

Zolang de doelstellingen niet gehaald worden, ziet het er dus veelbelovend uit, en zal de aansporing tot investeren blijven bestaan. Toch hoeft men ook in het andere geval niet te wanhopen. Via een decreet van 20 juni 2006 worden de distributienetbeheerders immers verplicht om warmtekrachtcertificaten aan te kopen van eigenaars van WKK-installaties, aangesloten aan hun net, tegen een vaste prijs van 27 euro per certificaat, of dus 60% van de boete. Deze concrete minimumsteun geldt echter enkel voor inleverbare certificaten (zie hogervermelde voorwaarden) en gedurende een periode van 10 jaar na de indienstname van de installatie. Het is natuurlijk wel zo dat binnen de 10 jaar na indienstname het gros van de certificaten gegenereerd worden.

Zoals reeds vermeld, geldt de minimumsteun dus enkel voor installaties aangesloten op het distributienet (70 kV en minder). Voor installaties aangesloten op het transmissienet (hoogspanning) geldt enkel dat, ingeval de marktwaarde van de warmtekrachtcertificaten door een beslissing van de Vlaamse Regering daalt tot minder dan 27€, de Vlaamse Regering de geleden schade vergoedt voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties die minder dan 10 jaar in dienst zijn.

Om certificaten te kunnen bekomen, moet een aanvraagdossier ingediend worden bij de VREG. In dit aanvraagdossier moet steeds een ingevuld aanvraagformulier zitten, waarvan een model kan bekomen worden via de website van de VREG. Voor installaties met een elektrisch vermogen groter dan 1 MW moet bij het volledig ingevulde aanvraagformulier ook een keuringsverslag van een erkende keuringsinstantie gevoegd worden. Hierin wordt bevestigd dat de installatie en de bijhorende meettoestellen correct beschreven worden in de aanvraag. Binnen de drie maand na ontvangst van een volledig en correct ingevuld dossier, beslist de VREG of de betrokken installatie voldoet aan de voorwaarden om certificaten te verkrijgen, en over de manier waarop het aantal certificaten wordt berekend. Vanaf de maand waarin deze beslissing wordt genomen, worden certificaten toegekend.

Het is bovendien zo dat men voor een in aanbouw zijnde installatie ook een aanvraag kan indienen bij de VREG, teneinde reeds vroeg in het project voldoende informatie te verkrijgen over het aantal bekomen certificaten. Uiteraard gaat het in dat geval om een onvolledig dossier, waarvoor de indiener echter tot na de indienstname de tijd heeft om het te vervolledigen, zonder dat de aanvraag vervalt. Dit is belangrijk, gezien de referentierementen en de rekenregels worden vastgeklemd op datum van de aanvraag. Op deze manier vermijdt men dus dat men bij wetswijzigingen tijdens de bouwtijd van een installatie voor onaangename verrassingen komt te staan. De certificaten zelf worden uiteraard pas toegekend eens de installatie operationeel is.

7.2.2.2.1.3 *Combinatie van groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten*

Wanneer een hernieuwbare energiebron wordt gebruikt als input voor de WKK, en de hernieuwbare energiebron staat op de lijst hierboven, dan komt de installatie in principe in aanmerking voor zowel groenestroomcertificaten als warmtekrachtcertificaten.

Omdat WKK-installaties gevoed door hernieuwbare energiebronnen vaak iets lagere rendementen hebben dan fossiel gestookte installaties, en voor de berekening van het aantal certificaten vergeleken wordt met de Vlaamse referentierendementen, kan het aantal bekomen certificaten wel eens zeer laag uitvallen, ook al voldoet de installatie ruimschoots aan de definitie voor hoogrenderende warmtekrachtkoppeling.

Daarom mogen voor WKK-installaties op hernieuwbare energiebronnen ook voor de berekening van het aantal bekomen certificaten lagere referentierendementen gehanteerd worden, zijnde (voor het elektrisch referentierendement):

- 42% bij de toepassing van biogas
- 42,7% bij de toepassing van vloeibare biobrandstoffen
- 34% bij de toepassing van hout of houtafval
- 25% bij de toepassing van andere vaste biomassastromen

Voor het thermisch referentierendement kan 70% gebruikt worden indien de brandstof biogas is.

Gezien de hogere waarde van de groenestroomcertificaten, vormen deze echter nog steeds de hoofdbrok in de steun. Er zal bijgevolg steeds geprobeerd worden zoveel mogelijk groenestroomcertificaten te bekomen. Een combinatie met warmtekrachtcertificaten zal daardoor enkel voorkomen in situaties waar quasi steeds alle warmte van de WKK nuttig wordt aangewend.

7.2.2.2.2 Wallonië

In Wallonië wordt één systeem gehanteerd, voor zowel elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen als voor warmtekrachtkoppeling. Het integreren van deze beide technieken in één certificatenstelsel biedt enkele aanzienlijke voordelen, inzake liquiditeit van de markt en inzake administratieve vereenvoudiging. Anderzijds vereist dit natuurlijk een gemeenschappelijke basis voor de behandeling van elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen en warmtekrachtkoppeling. De keuze voor deze gemeenschappelijke basis is gevallen op de CO₂-emissiereductie die de installatie realiseert.

Om dit te kunnen bepalen, zijn uiteraard referenties nodig. Deze referenties werden gebaseerd op de emissiefactoren voor brandstoffen. Hoeveel CO₂ uitgestoten wordt bij de verbranding van een eenheid brandstof, is internationaal vastgelegd. Voor het Waalse certificatenstelsel wenste men echter niet enkel de uitstoot door verbranding in aanmerking te nemen, maar ook de uitstoot veroorzaakt door de productie, het transport en de voorbehandeling van de brandstof. Zodoende bekomt men de emissiefactoren voor brandstoffen zoals getoond in tabel 7.7.

Hieruit kunnen we afleiden dat een gasgestookte STEG-installatie, met een elektrisch rendement van 55%, bij productie van 1 MWh elektriciteit 456 kg CO₂ uitstoot. Analooch vindt men dat een ketel, met een thermisch rendement van 90%, bij de productie van 1 MWh warmte 279 kg CO₂ uitstoot indien de brandstof gas is, en 340 kg CO₂ indien de brandstof diesel is.

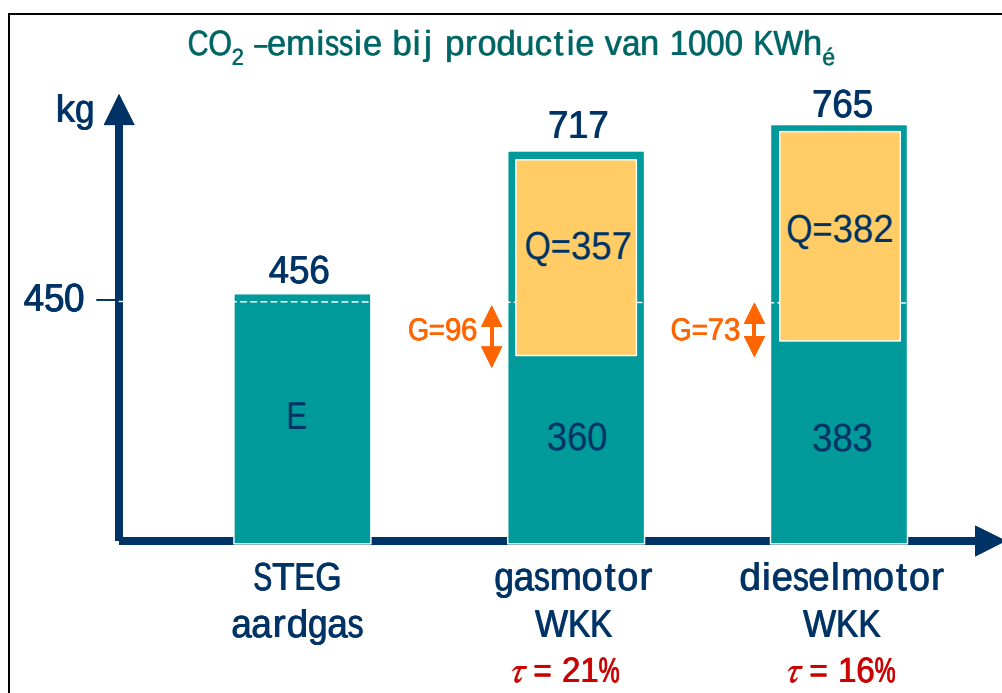
De drie waarden die hier berekend werden, gelden precies als referenties voor de gescheiden productie. Voor elektriciteit is de referentie dus steeds een uitstoot van 456 kg CO₂ per MWh. Voor warmte is die 279 kg CO₂ per MWh indien de warmtekraftinstallatie kan aangesloten worden op een gasnet, m.a.w. indien het gasnet in de buurt ligt. Is dit niet zo, dan is de dieselgestookte installatie de referentie, dus een uitstoot van 340 kg CO₂ per MWh.

Tabel 7.7: Emissiefactoren van brandstoffen zoals gehanteerd in het Waalse certificatenstelsel.

Energiebron	kg CO ₂ /MWhp
Fossiel	
Aardgas	251
Gasolie	306
Lichte-zware stookolie	310
Extra zware stookolie	320
Steenkool	385
Niet Fossiel	
Wind/Zon/Biologisch afbreekbare organische stoffen (*)	0
Hout (energie teelt)	45
Hout (andere types)	23
(*) Opmerking: Waar nodig worden ook volgende processen verrekend:	
Vermalen van hout	4
Drogen van hout	10
Transport over een afstand van minder dan 100km	5

Het berekeningsprincipe van de factor τ , de relatieve CO₂-emissiebesparing, en daaraan gekoppeld ook van het aantal bekomen certificaten, wordt geïllustreerd door figuur 7.6.

Voor een WKK vertrekt men van de emissies van deze WKK bij productie van 1 MWh elektriciteit. Daarvan mag men echter de emissies aftrekken die veroorzaakt zouden worden door de referentieproductie van dezelfde hoeveelheid warmte als geproduceerd werd door de WKK. De resterende emissiehoeveelheid wordt dan vergeleken met de referentie-emissiehoeveelheid bij productie van 1 MWh elektriciteit (456 kg CO₂). In het voorbeeld van de gasmotor wordt aldus een CO₂-besparing van 96 kg gerealiseerd. De relatieve CO₂-besparing wordt dan uitgedrukt ten opzichte van de referentie van 456 kg CO₂/MWh, en bedraagt zodoende in het voorbeeld 21%. Om certificaten te kunnen krijgen, geldt een relatieve emissiebesparing van 10% als minimumeis.



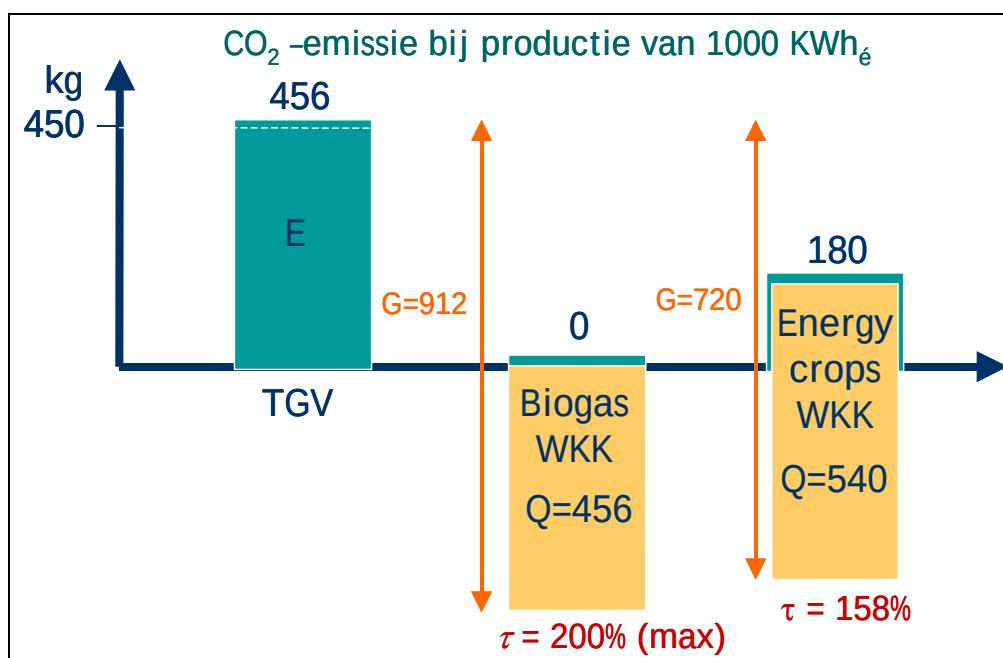
Figuur 7.6: Berekeningsprincipe groene certificaten in Wallonië, bron CWaPE

Voor een biomassa-gestookte WKK, is de uitstoot van de WKK gelijk aan nul. De relatieve emissiebesparing is bijgevolg steeds groter dan 100%. Het maximum voor de relatieve emissiebesparing is echter vastgesteld op 200%, zoals blijkt uit figuur 7.7.

Voor grotere installaties, gelden bovendien nog strengere begrenzings. De maximumgrens van 200% geldt immers enkel voor de eerste vermogensschijf van 5 MWe. Voor de vermogensschijf tussen 5 MWe en 20 MWe, is de relatieve emissiebesparing beperkt tot 100%, en voor de vermogensschijf boven 20 MWe wordt de in een WKK geproduceerde warmte niet langer in rekening gebracht, en worden geen certificaten meer toegekend aan hydro-elektriciteit.

In concreto betekent dit voor warmtekrachtinstallaties dat deze slechts certificaten zullen krijgen voor de eerste vermogensschijf van 20 MWe. Voor biomassa-gestookte WKK geldt bovendien dat het aantal certificaten voor de vermogensschijf tussen 5 en 20 MWe beperkt wordt.

De quota bedragen 3% van de totale elektriciteitsleveringen in 2003, oplopend tot 7% in 2007. Uiteraard betreft het de gezamenlijke quota voor hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling. Indien de elektriciteitsleveranciers niet kunnen voldoen aan de door deze quota opgelegde verplichting, dienen zij een boete te betalen van 100 € per ontbrekend certificaat. In tegenstelling tot elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen, is voor warmtekrachtkoppeling geen minimumgarantie voorzien inzake de prijs van het certificaat.



Figuur 7.7: Berekeningsprincipe groene certificaten in Wallonië (2), bron CWaPE

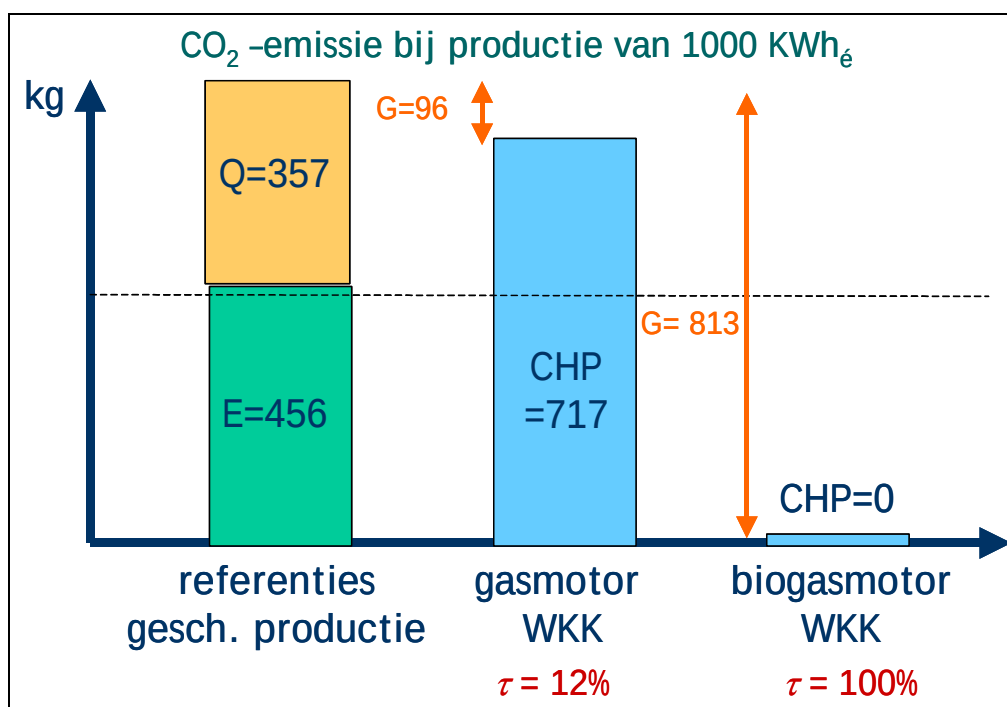
7.2.2.2.3 Brussel

Ook Brussel heeft één systeem voor zowel elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen als warmtekrachtkoppeling in te voeren. Het is sinds de tweede helft van 2004 in voege. Net als in Wallonië zijn de Brusselse groene certificaten gebaseerd op vermeden emissies van koolstofdioxide, maar de concrete uitwerking verschilt wel van de Waalse.

De emissiefactoren voor brandstoffen werden op een analoge wijze als in Wallonië bepaald: zowel verbranding als voorbehandeling van de brandstof (productie, bewerking, transport) worden in aanmerking genomen. Toch zijn de resultaten anders: voor aardgas neemt men 217 kg CO₂ per MWh (onderste verbrandingswaarde), voor stookolie 306 en voor steenkool 385.

Als referentie-installaties werd gekozen voor een gasgestookte ketel met 90% rendement voor warmteproductie, en een gasgestookte STEG met 55% voor elektriciteitsproductie. De warmtekrachtinstallatie wordt in Brussel dus steeds vergeleken met gasgestookte eenheden voor gescheiden productie. Gezien het stedelijk karakter van Brussel, vormt een vergelijking met aardgas echter geen probleem.

De werkwijze voor het bepalen van de relatieve emissiebesparing, en dus ook van het aantal bekomen certificaten, wordt geïllustreerd door figuur 7.8. Het linker blokje geeft de emissies van de referentie-installaties weer bij productie van evenveel elektriciteit en warmte als door de warmtekrachtinstallatie wordt geproduceerd. De overige twee blokjes tonen dan de emissies van deze warmtekrachtinstallatie, enerzijds voor het geval deze gasgestookt is en anderzijds voor het geval deze op biogas werkt. De relatieve emissiebesparing (τ) is dan de verhouding tussen het verschil in emissies en de emissies van de referentie-installaties. In het voorbeeld van de figuur bedraagt deze 12% voor de gasgestookte WKK, en 100% voor de biogas-gestookte WKK. Deze laatste waarde is de maximaal bereikbare relatieve emissiereductie, gezien deze correspondeert met een WKK die theoretisch geen CO₂ uitstoot.



Figuur 7.8: Berekeningsprincipe groene certificaten in Brussel

Het aantal bekomen certificaten wordt afgeleid uit de relatieve emissiebesparing als volgt:

$$C = \tau \cdot \left(\frac{E}{\eta_E} + \frac{Q}{\eta_Q} \right) \quad (7.5)$$

met:

C : het aantal bekomen certificaten

τ : de relatieve emissiebesparing

η_E : het elektrisch rendement van de referentiecentrale, dus 55%

E : de totale elektriciteitsproductie van de warmtekrachtinstallatie, in MWh

η_Q : het thermisch rendement van de referentiecentrale, dus 90%

Q : de totale warmteproductie van de warmtekrachtinstallatie, in MWh

De relatieve emissiebesparing wordt dus vermenigvuldigd met de hoeveelheid brandstof nodig voor gescheiden opwekking van dezelfde hoeveelheid elektriciteit en warmte als door de WKK opgewekt wordt.

De minimumvereiste om van certificaten te kunnen genieten is het realiseren van een relatieve emissiebesparing van 5%. Verder zijn er geen beperkingen opgelegd voor wat betreft de vermogensgrootte of de maximale emissiebesparing.

De quota liggen in Brussel op 2% van de totale elektriciteitsleveringen in 2004, oplopend tot 2,5% in 2006. Het merkwaardige is echter dat deze quota hoger liggen dan het potentieel voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen en warmtekrachtkoppeling in Brussel. Er wordt dus gedacht aan import van certificaten uit andere regio's, onder nog vast te leggen voorwaarden. Indien niet wordt voldaan aan de quota, wacht de elektriciteitsleveranciers een boete van 75 euro per ontbrekend certificaat.

7.2.2.2.4 Vergelijking

Een verschil dat vrijwel onmiddellijk in het oog springt, is het feit dat Vlaanderen aparte certificaten systemen heeft voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen en voor warmtekrachtkoppeling, terwijl de andere regio's beide technieken integreren binnen één systeem. Vlaanderen heeft het grootste potentieel, zowel voor groene stroom als voor WKK, hetgeen aparte systeem meer mogelijk maakt dan in de andere regio's. Toch biedt een geïntegreerd systeem het voordeel van een grotere markt met meer spelers, die minder gevoelig is aan allerlei invloeden en dus wellicht een hogere liquiditeit zal kennen. Bovendien laat een dergelijk systeem toe om meer complexe installaties, zoals warmtekrachtinstallaties op biogas, op een eenvoudige manier in te passen, zodat dergelijke installaties ook geen twee verschillende types certificaten hoeven aan te vragen. Tenslotte moet er door de regulator slechts één systeem gerund worden in plaats van twee.

Er wordt steeds een vergelijking gemaakt tussen de WKK en de gescheiden productie van warmte en elektriciteit. De referentie-installaties voor gescheiden opwekking hebben echter in sommige gevallen verschillende rendementen of verschillende brandstoffen naargelang de regio.

Hoewel steeds vergeleken wordt met gescheiden opwekking, lijkt de berekeningswijze in Vlaanderen op het eerste zicht toch erg verschillend van die in Wallonië en Brussel. Deze laatste twee baseren hun systeem immers op CO₂-emissiereductie, terwijl dat in Vlaanderen primaire-energiebesparing is. Inderdaad, dit betekent dat men in Vlaanderen geen onderscheid maakt naargelang de brandstof van de WKK. Enkel de efficiëntie waarmee de brandstof wordt omgezet in nuttige outputs is van belang. In de andere regio's is dit niet het geval, en krijgen installaties die werken op een brandstof met een hogere CO₂-uitstoot per eenheid primaire energie (bijvoorbeeld diesel), minder certificaten en dus ook minder steun.

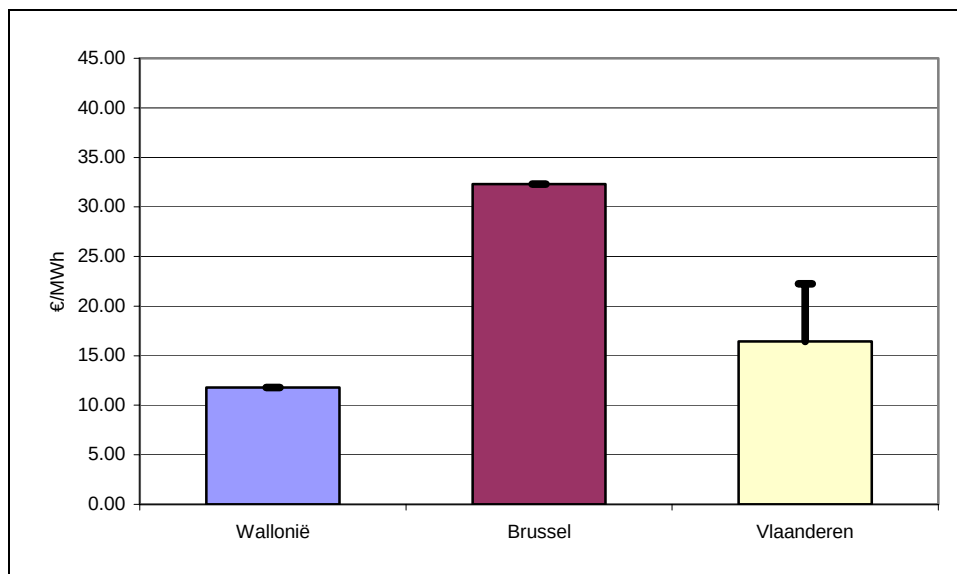
Indien we ons beperken tot gasgestookte installaties, worden de formules echter wel gelijkaardig, maar nog steeds niet identiek. De formule voor het aantal certificaten verschilt licht van regio tot regio. In Vlaanderen kan men het grootste aantal certificaten bekomen, maar daar is de verwachte marktprijs dan ook het laagst. Voor wat de relatieve besparing betreft, hebben Vlaanderen en Brussel wel een identieke benadering, maar houdt Wallonië er een andere methode op na. De Europese harmonisatie moet hier echter voor meer uniformiteit gaan zorgen.

Toch zijn er nog meer verschillen vast te stellen inzake beperkingen. Wallonië kent een getrapte vermogenbegrenzing, terwijl Vlaanderen het aantal inleverbare certificaten beperkt in de tijd, en bovendien enkel certificaten van nieuwe installaties, gebouwd of ingrijpend gewijzigd na 1 januari 2002, aanvaardt om aan de verplichtingen te voldoen.

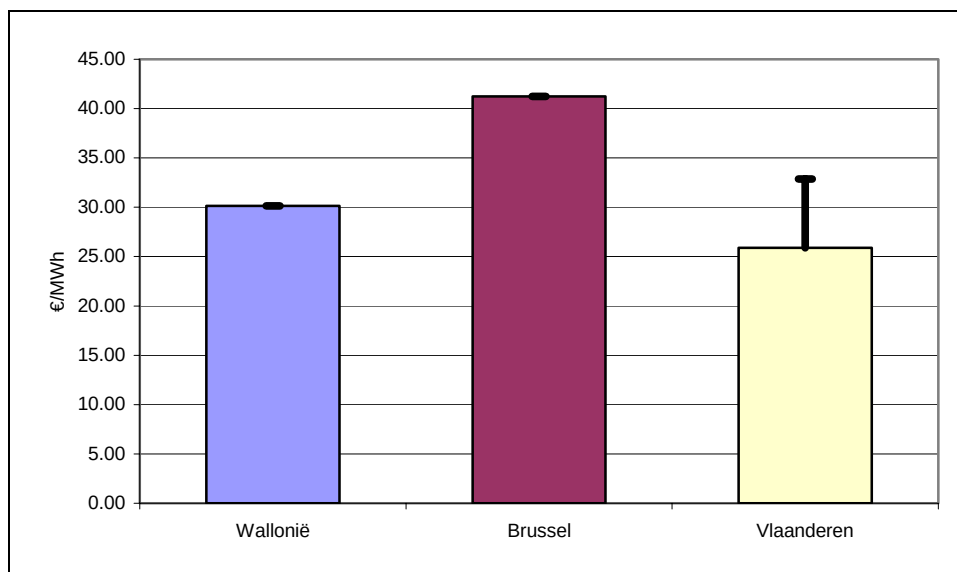
De quota zijn in Vlaanderen en Wallonië gebaseerd op het aanwezige potentieel, en zouden dus realiseerbaar moeten zijn. In Brussel liggen de quota echter hoger dan het potentieel, en is import van certificaten dus noodzakelijk om aan de verplichtingen te voldoen. Dat hiervoor correcte voorwaarden dienen opgesteld te worden is logisch, gezien de verschillen in berekeningsmethode, maar ook gezien de verschillende boeteprijzen voor de certificaten.

De hierboven opgesomde verschillen zijn talrijk, maar compenseren elkaar deels. Hierna wordt dan ook geïllustreerd wat elk van de systemen effectief kan gaan opbrengen voor een WKK-project. Daartoe worden drie voorbeeldinstallaties beschouwd: een gasturbine, een aardgasmotor en een dieselmotor. In de figuren 7.9 tot en met 7.11 wordt de maximale steun uit certificaten – dit is de steun indien de marktprijs gelijk zou zijn aan de boeteprijs – getoond, uitgedrukt in euro per geproduceerde MWh elektriciteit, en uitgemiddeld over een periode van 10 jaar. De zwarte

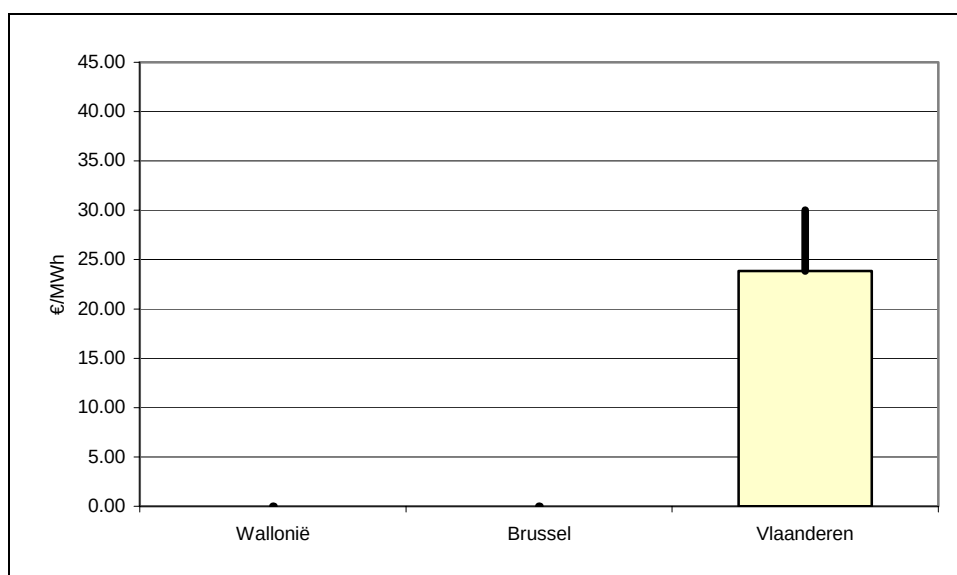
lijnen in de grafiek tonen bovendien hoe hoog de Vlaamse steun maximaal is gedurende de eerste vier jaar na indienstname.



Figuur 7.9: Maximale steun, in €/MWh geproduceerde elektriciteit, in de drie Belgische regio's voor een gasturbine van 40 MWe met een elektrisch rendement van 40% en een thermisch rendement van 40%, gebaseerd op boetewaarden en uitgemiddeld over 10 jaar.



Figuur 7.10: Maximale steun, in €/MWh geproduceerde elektriciteit, in de drie Belgische regio's voor een gasmotor van 1 MWe met een elektrisch rendement van 35% en een thermisch rendement van 50%, gebaseerd op boetewaarden en uitgemiddeld over 10 jaar.



Figuur 7.11: Maximale steun, in €/MWh geproduceerde elektriciteit, in de drie Belgische regio's voor een dieselmotor van 1 MWe met een elektrisch rendement van 40% en een thermisch rendement van 42%, gebaseerd op boetewaarden en uitgemiddeld over 10 jaar.

Uiteraard kan men voor het bepalen van de steun in een praktijkgeval, dus voor een specifiek project, niet rekenen met de boeteprijzen. Men dient daartoe een inschatting te maken van de marktprijs van de certificaten. Veel gegevens hieromtrent zijn niet voorhanden, maar de eerste cijfers laten vermoeden dat de marktprijs dicht bij de boeteprijs zal liggen, en dat een verhouding marktprijs/boeteprijs van 90% realistisch is. Voor rendabiliteitsberekeningen wordt echter meestal ook een meer pessimistisch scenario doorgerekend, waarbij 60% een klassieke waarde is voor de verhouding marktprijs/boeteprijs.

7.3 Definities van enkele economische begrippen

7.3.1 Economische Parameters

7.3.1.1 *Interest en rentevoet*

De term *interest* wordt gebruikt om een huurbedrag aan te duiden voor het gebruik van geld, aangerekend door financiële instellingen. Het bedrag, waarop de interest wordt betaald, wordt *hoofdsom* genoemd. De *rentevoet* wordt gedefinieerd als het interestbedrag per eenheid van hoofdsom in een eenheid van tijd.

7.3.1.2 *Economische levenscyclus van een investering*

De economische levenscyclus van een investering wordt beschouwd gelijk te zijn aan de tijd die nodig is om de initiële investering en de gewenste opbrengsten van een investering te recupereren. Als de uitrustingskost een belangrijk deel is van een investering, dan moet de economische levenscyclus gelijk zijn aan of korter dan de werkelijke (technische) levensduur van het grootste deel van de uitrusting.

7.3.1.3 *Inflatie en inflatiegraad*

In het algemeen neemt de kost van goederen en diensten toe met de tijd (inflatie). Een vermindering is ook voorgekomen in bepaalde tijdsperiodes (deflatie), maar dat is eerder een

zeldzame uitzondering. De prijsstijgingen per tijdseenheid wordt de inflatiegraad genoemd; ze wordt gewoonlijk uitgedrukt als een jaarlijks percentage, dat de prijsstijging voorstelt over een tijdsspanne van één jaar. Deflatie wordt gekarakteriseerd door een negatieve inflatiegraad.

De inflatiegraad kan verschillend zijn voor verschillende goederen, vb. uitrusting, arbeid, brandstof, reserveonderdelen, etc.

7.3.1.4 Huidige waarde

De waarde van geld verandert met de tijd. Als een kapitaal P wordt geïnvesteerd op het huidige moment ($t=0$), dan zal het opgetelde bedrag van kapitaal en interesten in de toekomst, na N tijdsperiodes, zijn:

$$F = P \cdot \prod_{t=1}^N (1+d_t) \quad (7.6)$$

waarbij d_t de rentevoet gedurende de periode t is. Elke tijdsperiode kan gebruikt worden: dag, maand, zes maand, jaar, etc. Periodes van een jaar zijn het meest gebruikelijk.

Omgekeerd wordt het geldbedrag, dat moet geïnvesteerd worden op het huidige moment om een bepaald geaccumuleerd bedrag F te hebben op een vastgelegd moment in de toekomst, bepaald door de vergelijking:

$$P = \frac{F}{\prod_{t=1}^N (1+d_t)} \quad (7.7)$$

Het bedrag P wordt de *huidige waarde* van het toekomstig bedrag F genoemd.

Als aangenomen wordt dat de rentevoet d constant is gedurende al te tijdsperiodes, dan neemt vergelijking (7.7) de volgende vorm aan

$$P = \frac{F}{(1+d)^N} \quad (7.8)$$

Omdat d wordt gebruikt om toekomstige bedragen te verminderen tot hun huidige waarden, wordt ze ook "*market discount ratio*" genoemd. De huidige waarde van een vroegere cashflow kan bepaald worden door de vergelijking:

$$P = F \cdot \prod_{t=-1}^{-n} (1+d_t) \quad (7.7)'$$

of, als d_t constant wordt verondersteld:

$$P = F(1+d)^n \quad (7.8)'$$

Een voorbeeld van het toepassen van vergelijking (7.7)' of (7.8)' is het berekenen van de huidige waarde van de initiële investering, wanneer de uitgaven plaatsgevonden hebben gedurende de bouwperiode van enkele jaren.

7.3.2 Maatstaven voor de economische prestatie

Een maat of index van de economische prestatie wordt gebruikt als een indicatie voor het levensvatbaar zijn op zichzelf van een investering (vb. in een warmtekrachtkoppelingssysteem),

ofwel als een basis voor de vergelijking met alternatieve investeringen (vb. tussen verschillende warmtekrachtkoppelingssystemen of tussen warmtekrachtkoppeling en volledig andere activiteiten). De meest voorkomende maatstaven, welke ook van toepassing zijn voor investeringen in warmtekrachtkoppelingssystemen, worden hieronder gedefinieerd.

7.3.2.1 *Netto huidige waarde van de investering (NPV, Net Present Value)*

Dit is de huidige waarde van de totale winst van een investering, welke het resultaat is van het verschil tussen de huidige waarde van alle uitgaven en de huidige waarde van alle inkomsten, gedurende de levenscyclus van de investering (of het systeem). Een algemene uitdrukking voor de netto huidige waarde is

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+d_t)^t} \quad (7.9)$$

waarin F_t de winst is of de netto cashflow (inkomsten + spaargelden – uitgaven) in het jaar t , en d_t is de gemiddelde marktrente (market discount ratio). Besparingen zijn vooral van belang voor de economische beoordeling van systemen zoals warmtekrachtkoppelingssystemen en technologieën van hernieuwbare energie.

De term “winst” wordt hier gebruikt met een algemene betekenis: F_t kan negatief zijn, wanneer het netto resultaat van jaar t een verlies is. F_0 , in het bijzonder, vertegenwoordigt gewoonlijk de huidige waarde van de investering ($t = 0$) en is negatief. Als de bouwperiode enkele jaren bleef duren, dan kunnen vergelijkingen (7.7)’ of (7.8)’ gebruikt worden om de huidige waarde te berekenen van de uitgaven van elk jaar. Hun som is F_0 .

Er zijn drie karakteristieke situaties:

- $NPV > 0$: De investering is economisch leefbaar onder de gespecificeerde voorwaarden (N , d). De opbrengst van de investering is groter dan d .
- $NPV = 0$: De investering is economisch leefbaar en het heeft opbrengst conform met de marktrente d .
- $NPV < 0$: De investering is niet economisch leefbaar onder de gespecificeerde voorwaarden (N , d).

7.3.2.2 *De interne rendementsgraad van de investering (IRR, internal rate of return)*

Het wordt ook de opbrengst van een investering (ROI) genoemd. Ze is gedefinieerd als de rentevoet die ervoor zorgt dat de huidige waarde van een reeks uitgaven gelijk is aan de huidige waarde van een reeks inkomsten. Het is ook anders gedefinieerd als de rentevoet die zal resulteren in een NPV van nul. De interne graad van opbrengst is de “market discount ratio” d^* dewelke voldoet aan de vergelijking:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+d^*)^t} = 0 \quad (7.10)$$

Indien we aannemen dat:

$$x \equiv \frac{1}{1+d^*} \quad (7.11)$$

Dan wordt (7.10) geschreven als

$$F_0 + F_1 x + F_2 x^2 + \dots + F_N x^N = 0 \quad (7.12)$$

Deze N-de graads-polynoom heeft N wortels, maar enkel deze die voldoen aan $0 \leq d^* < \infty$ ($0 < x \leq 1$) zijn van praktisch belang. Heel vaak ligt er maar één wortel in dit interval. In het geval er echter meerdere wortels in het interval liggen is het de gewoonte te vermijden dat de IRR als een maatstaf voor de economische prestatie wordt gebruikt. Dit is zo omdat er geen rationele middelen zijn om te oordelen welke van de wortels het meest geschikt zijn voor het bepalen van de economische prestatie.

7.3.2.3 Terugverdiëntijd (PBT, payback time)

Er zijn twee definities van de terugverdiëntijd, zoals hieronder gegeven.

7.3.2.3.1 Enkelvoudige terugverdiëntijd (SPB)

De enkelvoudige terugverdiëntijd wordt gedefinieerd als de periode die nodig is om de investeringskost (eerste kost) terug te winnen met de netto cashflow die door die investering geproduceerd wordt zonder rekening te houden met de rentevoet ($d = 0$). Als F_0 de investeringskost is en als F_t de netto cashflow is in de periode t , dan wordt de enkelvoudige terugverdiëntijd gedefinieerd als de kleinste waarde van N die voldoet aan de uitdrukking:

$$N_{\min} = \text{SPB} \quad \sum_{t=0}^{N_{\min}} F_t \geq 0 \quad (7.13)$$

In voorafgaande schattingen, wordt F_t vaak constant verondersteld, zodat de cashflow in elk jaar dat de installatie in bedrijf is, gelijk is, of dus $F_t = F$. Dan wordt vergelijking (7.13) herleid tot:

$$\text{SPB} = \frac{-F_0}{F} \quad (7.14)$$

welke natuurlijk een positieve waarde geeft voor SPB, als $F > 0$; anders resulteert de investering in een verlies.

De enkelvoudige terugverdiëntijd wordt gemakkelijk berekend, maar ze heeft serieuze gebreken omdat ze geen rekening houdt met:

- De tijdswaarde van geld
- De prestatie van de investering na de terugbetalingperiode, inclusief de grootte en timing van de cashflows en de verwachte levensduur van de investering.

Omwille van deze beperkingen, neigt de enkelvoudige terugverdiëntijd de kortlevende investeringen te bevoordelen, wat in veel gevallen economisch ongezond is: investeringen met langere SPB kunnen een hogere NPV hebben, wat op de lange duur de voorkeur geniet.

De enkelvoudige terugverdiëntijd kan enkel gerechtvaardigd worden als een investeringscriterium in situaties waar er een hoge onzekerheidsgraad is betreffende de toekomst, en een firma geïnteresseerd is in zijn cashpositie en leenverplichtingen.

7.3.2.3.2 Gereduceerde terugverdiëntijd (DPB)

De gereduceerde terugverdiëntijd wordt gedefinieerd als de tijdsduur die nodig is om de investeringskost en de gewenste intrest van de netto cashflow geproduceerd door de investering te herwinnen. gereduceerde terugverdiëntijd is gelijk aan de kleinste waarde van N die voldoet aan de uitdrukking

$$\sum_{t=0}^{N_{\min} = \text{DPB}} \frac{F_t}{(1+d)^t} \geq 0 \quad (7.15)$$

Als F_t constant kan verondersteld worden in de tijd op constante waarde, i.e. $F_t = F$, dan wordt een analytische oplossing van vergelijking (7.15) verkregen:

$$\text{DPB} = \frac{-\ln\left(1 + \frac{F_0}{F} d\right)}{\ln(1+d)} \quad (7.16)$$

Er zijn investeringen die een redelijke enkelvoudige terugverdientijd hebben, maar hun gereduceerde terugverdientijd toont dat de investeringskost nooit herwonnen kan worden.

Een investering wordt economisch leefbaar beschouwd met de terugverdientijd als criterium, als zijn terugverdientijd voldoet aan de verwachtingen van de investeerder.

7.4 Procedure voor economische analyse

Om de hierboven vermelde maatstaven voor economische prestatie van een WKK-project (terugverdientijd, IRR, NPV) te berekenen, dienen de jaarlijkse cashflows F_t gekend te zijn. Hierbij wordt het eerste jaar na indienstname meestal gelijkgesteld wordt met $t = 1$, zodat de investeringskost meestal vervat zit in één of meerdere jaarlijkse cashflows F_t met $t < 1$. De jaarlijkse cashflows F_t met $t > 0$ stellen dan de jaarlijkse winsten van de WKK-installatie na de indienstname voor, ofwel de jaarlijkse opbrengsten min de jaarlijkse operationele kosten. Tot de opbrengsten behoren de waarde van de geproduceerde warmte en elektriciteit en elke vorm van uitbatingssteun, zoals de warmtekrachtcertificaten in Vlaanderen. Aan de kostenzijde vinden we de onderhouds- en uitbatingskost en natuurlijk ook de brandstofkost. Alle hier vermelde opbrengsten en kosten werden reeds uitvoerig toegelicht in paragrafen 7.1 en 7.2.

Nadat alle opbrengsten en kosten bepaald zijn, kunnen de jaarlijkse cashflows F_t berekend worden. Het dient echter opgemerkt te worden dat het hier gaat om cashflows voor belastingen, hoewel het gebruikelijk is de economische haalbaarheid van een investering te beoordelen op basis van de cashflows na belastingen. Voor een exacte berekening van de cashflows na belastingen is kennis nodig van de financiële resultaten van de hele onderneming die eigenaar is van de WKK-installatie. In de praktijk is dit echter vaak onmogelijk, zodat men zich beperkt tot een vereenvoudigde analyse.

Rekening houdende met een lineaire afschrijving van de investering over een periode van n jaar, kunne de cashflows na belasting F'_t (voor $t > 0$) berekend worden als:

$$F'_t = F_t - \left(F_t - \frac{|I|}{n}\right) \cdot t, \quad (7.17)$$

waarbij I de totale investeringskost is en t de belastingsvoet (voor bedrijfsbelasting). Voor $t < 1$ wordt de cashflow na belasting identiek beschouwd aan die voor belasting, tenminste voor wat de hier besproken vereenvoudigde berekening betreft.

Hierna kunnen de formules uit paragraaf 7.3.2 gebruikt worden om IRR, NPV en terugverdientijd te berekenen, uitgaande van de cashflows na belasting. Voor WKK-projecten worden IRR en NPV doorgaans bepaald over een vrij lange periode, typisch 10 tot 15 jaar. Een investering wordt als rendabel aanzien indien de IRR significant hoger ligt dan de interestvoet bij

de bank. Typische wenswaarden voor IRR liggen tussen 10 en 15%. Toch spelen ook NPV en terugverdientijd mee in de evaluatie van de rendabiliteit van het project.

7.5 Enkele voorbeelden van de economische haalbaarheid van WKK in Vlaanderen

In onderstaande tabellen 7.8 tot en met 7.11 wordt de economische haalbaarheid van enkele voorbeeldinstallaties volledig doorerekend. Hierbij wordt het Vlaamse certificatsysteem mee in rekening gebracht.

Tabel 7.8: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een microturbine

Type installatie			Microturbine		
BASISGEGEVENS					
Technisch			Economisch		
Elektrisch vermogen	[MW]	0,06	Investeringskost	[€]	100 000
Thermisch vermogen	[MW]	0,12	Onderhouds- en uitbatingskost	[€/MWb]	7
Elektrisch rendement	[%]	25%	Marktprijs elektriciteit	[€/MWb]	43
Thermisch rendement	[%]	52%	Marktprijs brandstof	[€/MWb]	20
Aantal draaiuren	[h/jaar]	7500			
RESULTATEN					
Warmtekrachtcertificaten			Financiële resultaten (na belasting)		
Relatieve primaire energiebesparing	[%]	7,22%	Terugverdientijd	[jaar]	5,13
Warmtekracht-besparing	[MWb /jaar]	140	IRR	[%]	12,94%
Looptijd steun	[jaar]	7	Netto huidige waarde (10 jaar, 15%)	[€]	-5 406

Tabel 7.9: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een gasmotor

Type installatie			Gasmotor		
BASISGEGEVENS					
Technisch			Economisch		
Elektrisch vermogen	[MW]	0,2	Investeringskost	[€]	250 000
Thermisch vermogen	[MW]	0,32	Onderhouds- en uitbatingskost	[€/MWb]	20
Elektrisch rendement	[%]	33%	Marktprijs elektriciteit	[€/MWb]	51
Thermisch rendement	[%]	52%	Marktprijs brandstof	[€/MWb]	20
Aantal draaiuren	[h/jaar]	4000			
RESULTATEN					
Warmtekrachtcertificaten			Financiële resultaten (na belasting)		
Relatieve primaire energiebesparing	[%]	19,21%	Terugverdientijd	[jaar]	4,49
Warmtekracht-besparing	[MWb /jaar]	576	IRR	[%]	11,91%
Looptijd steun	[jaar]	12	Netto huidige waarde (10 jaar, 15%)	[€]	-23 322

Tabel 7.10: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een gasmotor

Type installatie			Gasmotor		
BASISGEGEVENS					
Technisch			Economisch		
Elektrisch vermogen	[MW]	1	Investeringskost	[€]	550 000
Thermisch vermogen	[MW]	1,13	Onderhouds- en uitbatingskost	[€/MWb]	15
Elektrisch rendement	[%]	40%	Marktprijs elektriciteit	[€/MWb]	51
Thermisch rendement	[%]	45%	Marktprijs brandstof	[€/MWb]	20
Aantal draaiuren	[h/jaar]	4000			
RESULTATEN					
Warmtekrachtcertificaten			Financiële resultaten (na belasting)		
Relatieve primaire energiebesparing	[%]	23,08%	Terugverdientijd	[jaar]	3,76
Warmtekracht-besparing	[MWb /jaar]	3 000	IRR	[%]	21,37%
Looptijd steun	[jaar]	13,58	Netto huidige waarde (10 jaar, 15%)	[€]	109 621

Tabel 7.11: Voorbeeld financiële haalbaarheid van een gasturbine

Type installatie			Gasturbine		
BASISGEGEVENS					
Technisch			Economisch		
Elektrisch vermogen	[MW]	40	Investeringskost	[M€]	34
Thermisch vermogen	[MW]	47	Onderhouds- en uitbatingskost	[€/MWb]	7
Elektrisch rendement	[%]	38%	Marktprijs elektriciteit	[€/MWb]	43
Thermisch rendement	[%]	45%	Marktprijs brandstof	[€/MWb]	20
Aantal draaiuren	[h/jaar]	7500			
RESULTATEN					
Warmtekrachtcertificaten			Financiële resultaten (na belasting)		
Relatieve primaire energiebesparing	[%]	18%	Terugverdientijd	[jaar]	4,28
Warmtekracht-besparing	[MWb /jaar]	173 938	IRR	[%]	16,84%
Looptijd steun	[jaar]	11,5	Netto huidige waarde (10 jaar, 15%)	[M€]	0,56

Indien we de financiële haalbaarheid van WKK-projecten bekijken, dan zien we dat de certificaten daar een enorme invloed op hebben. Zowel voor motoren als voor turbines kan de interne rendementsgraad van de investering over 10 jaar sterk stijgen onder invloed van de certificaten. Veel hangt daarbij uiteraard af van de marktwaaarde die de certificaten zullen hebben. Toch kunnen we stellen dat de certificaten het potentieel hebben om de meerderheid van de WKK-projecten rendabel te maken, waar dit zonder certificaten zeker niet altijd het geval zou zijn. Hierdoor wordt de investeringsbeslissing tevens minder afhankelijk gemaakt van schommelingen van andere parameters. Dit alles kan ervoor zorgen dat het opgesteld vermogen aan WKK in Vlaanderen significant zal toenemen, zoals vooropgesteld. Momenteel zijn er bovendien reeds een aantal projecten lopende.

7.6 Economisch optimale uitbating van warmtekraftinstallaties

Eerder (paragraaf 6.2) werd reeds uiteengezet dat ontwerp en dimensionering van een WKK-systeem kunnen beïnvloed worden door de vooropgestelde werkingsmode van het WKK-systeem. Tevens werden de werkingsmodi ‘Warmterraag-gestuurd’, ‘Elektriciteitsvraag-gestuurd’, ‘Gecombineerde sturing warmte/elektriciteitsvraag’ en ‘Eilandbedrijf’ kort besproken.

Reeds enige tijd voor de installatie er staat, liggen design en dimensionering vast. Dat wil echter niet zeggen dat daarom de werkingsmode ook vastligt. De werkingsmode die bij het ontwerp van de installatie wordt vooropgesteld hangt immers af van de inschatting van de evolutie van een aantal parameters, zoals onder meer de noden van de gebruiker, de energieprijzen en de (uitbatings-)subsidies. Het is dan ook niet uit te sluiten dat deze parameters tijdens de levensduur van de installatie op een andere manier evolueren dan was vooropgesteld bij het ontwerp. Deze evoluties kunnen de beoogde winst verkleinen, maar kunnen ook nieuwe opportuniteiten inhouden voor de installatie. Daarom is het van belang dat men er, eens de installatie in bedrijf is, steeds naar streeft om haar op een zo optimaal mogelijke manier uit te baten. Het optimum zal in de meeste gevallen een financieel optimum zijn, doch er kan ook gestreefd worden naar een energetisch of een milieutechnisch optimum.

Gezien de complexiteit van een WKK-installatie, is het vaak nodig om systematische optimalisatieprocedures te gebruiken om tot een optimale uitbating van het systeem te komen. Zo zijn er microprocessor-gebaseerde controlesystemen beschikbaar. Ze kunnen de mogelijkheid voorzien om in een basislast mode te werken, om ofwel elektrische ofwel thermische belastingen te volgen, of om de meest economische werkingsmode op te sporen en te volgen. In het laatste geval kan de microprocessor gebruikt worden om de prestatie van het cogeneratiesysteem te meten, inclusief

- De systeemefficiëntie en de hoeveelheid beschikbare nuttige warmte;
- De elektrische en thermische behoeften van de gebruiker, de hoeveelheid van het teveel aan elektriciteit die moet geëxporteerd worden naar het net, en de hoeveelheid warmte die moet geloosd worden naar de omgeving;
- De kost van aangekochte elektriciteit en de waarde van elektriciteitsverkoop, vermits ze kunnen veranderen met het tijdstip van de dag, de dag van de week, of het seizoen.

Gebruik makend van de hiervoor vermelde data kan de microprocessor bepalen welke werkingsmode de meest economische is of zelfs of de eenheid moet stilgelegd worden. Meer nog, door operationele parameters te meten zoals efficiëntie, aantal uren in werking, uitlaatgastemperatuur, koelwatertemperaturen, kan de microprocessor helpen in het plannen van onderhoud. Wanneer het systeem zonder toezicht ter plaatse werkt kan de microprocessor via een telefoonlijn verbonden worden met een beheerscenter op afstand, waar de computeranalyse van de data de experts kan inlichten over een dringende noodzaak voor gepland of ongepland onderhoud. Verder kan de microprocessor, als onderdeel van een data-acquisitiesysteem, verslagen produceren over de technische en economische prestatie van het systeem.

7.6.1 Simulatie en prestatievoorspelling van systemen via modellen

Het doel van simulatie en prestatievoorspelling is het bepalen of inschatten van de maatstaven van energetische en economische prestaties, zoals gedefinieerd in paragrafen 3.1 en 7.3, voor een gegeven installatie in een gegeven werkingsmode op een gegeven moment (bij gegeven omgevingscondities). Het spreekt voor zich dat een dergelijke analyse voor verschillende werkingsmodes toe moet laten de meest optimale werkingsmode te selecteren.

Om dit doel te bereiken is het nodig een model van het systeem op te bouwen, i.e. een mathematische beschrijving van het systeem bestaande uit data, regels, gevolgtrekkingen en vergelijkingen, waarbij het woord “systeem” hier niet alleen de warmtekrachtinstallatie(s) omvat,

maar ook het bedrijf waarin de WKK wordt uitgebaat, zoals beschreven door de verschillende belastingen.

Dit model kan zeer ruw zijn, enkel gebaseerd op gemiddelde vragen en nominale of gemiddelde prestaties van de WKK-installaties, maar kan ook zeer nauwkeurig zijn, gebaseerd op gedetailleerde energievragen voor elk uur van het jaar en werkelijke prestaties van de WKK's, rekening houdend met de invloed van deellast en omgevingscondities,... Uiteraard zijn ook tussenliggende oplossingen mogelijk, onder meer afhankelijk van de beschikbare informatie en hulpbronnen. Ook binnen de uur per uur modellen kunnen verschillende niveaus van benadering (en bijgevolg van nauwkeurigheid) voorkomen. Zo kan de informatie bijvoorbeeld gebaseerd zijn op waarden voor slechts enkele dagen (bvb. weekday, weekend) voor elk seizoen of elke maand, maar daarentegen ook op waarden voor elk uur van een typejaar (8760 uren) of zelfs meerdere jaren. Steeds moet men er zich echter van bewust zijn dat ruwere modellen waarschijnlijk onnauwkeurigere of zelfs onbruikbare resultaten zullen produceren.

Wat echter ook de nauwkeurigheid is, via het model worden voor elk uur steeds een aantal parameters bepaald of voorspeld voor de gegeven installatie in de gegeven situatie en werkingsmode. Deze resultaten kunnen onder meer zijn:

- Elektrische en thermische vraag van het bedrijf of de inrichting
- Elektriciteitsproductie van elke WKK-eenheid (nulwaarden zijn aanvaardbaar),
- Elektriciteitsverbruik op de site,
- Elektriciteit aangekocht uit of verkocht aan het net,
- Warmteproductie van elke eenheid,
- Warmteverbruik op de site,
- Brandstofverbruik van elke WKK-eenheid,
- Brandstofverbruik van boilers voor supplementaire warmte,
- Vermeden brandstofverbruik van boilers dankzij WKK,
- Operationeel financieel resultaat (inkomsten min kosten)
- ...

Afhankelijk van de tariefstructuur voor elektriciteit en/of brandstof of van de uitbatingssubsidies kan het nodig zijn cumulatieve resultaten voor elke dag, maand of jaar te produceren. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Jaarlijks aantal uren in dienst of beschikbaar
- Gemiddelde elektrische belastingsfactor van elke WKK-unit,
- Percentage van de door de WKK geproduceerde elektriciteit die ook op de site gebruikt wordt,
- Percentage van vereiste energie in elke vorm gedekt door de WKK,
- Jaargemiddeld elektrisch rendement van de WKK(s),
- Jaargemiddeld thermisch rendement van de WKK(s), gebaseerd op de verbruikte warmte,

- Jaargemiddelde totale brandstofbenuttigingsgraad van elke unit (sommatie van de jaargemiddeld elektrisch en thermisch rendement),
- Maandelijks brandstofverbruik voor gescheiden productie van elektriciteit en warmte,
- Maandelijkse brandstofbesparing door de WKK (FES, te bepalen voor warmtekraftcertificaten in Vlaanderen),
- Jaargemiddelde relatieve primaire-energiebesparing (RFES, te bepalen voor het recht op warmtekraftcertificaten in Vlaanderen),
- ...

In een gedetailleerd uur per uur model wordt het effect van omgevingscondities zowel op energiebehoeften als op de prestatie van het WKK-systeem expliciet in rekening gebracht. Zo ook kunnen lokale belastingen gemodelleerd worden door factoren zoals gebouwbezetting, type en prestatie van verwarming, ventilatie en luchtbehandelingssysteem, procesvereisten, enz. te beschouwen. Verder laten uur per uur modellen nauwkeurige berekeningen toe van de kost van aangekochte elektriciteit of van de inkomsten van de verkoop van het teveel aan elektriciteit, wanneer waarden afhangen van het uur van de dag.

Zeker bij meer uitgebreide modellen volstaat een zakrekenmachine niet meer, en is computermodellering en simulatie nodig. Dit is nog meer het geval wanneer de effecten van alternatieve veronderstellingen of van procesveranderingen op de prestatie moeten bestudeerd worden. De ontwerper kan het efficiënter en niet zeer moeilijk vinden om speciaal gemaakte software te ontwikkelen, in plaats van een commercieel pakket te gebruiken.

7.6.2 Optimalisatie van de werking van WKK-systemen

7.6.2.1 *Formulering en oplossingsprocedure van het algemene optimalisatieprobleem*

Het volledige optimalisatieprobleem van een WKK kan voorgesteld worden onder de vorm van met elkaar verbonden vragen: wat zijn de configuratie van het systeem (set van verbonden uitrusting), de designkarakteristieken van de componenten, en de werkingsstrategie (mode) die samen leiden tot een algeheel optimum? Het aantal vrijheidsgraden neemt toe in multiproductsystemen waar de productiegetallen niet altijd gespecificeerd zijn, zoals dat het geval is bij cogeneratiesystemen. Verder voegt tijdsafhankelijke werking nog een dimensie toe.

In wiskundige termen wordt het optimalisatieprobleem voorgesteld door de objectieffunctie

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \quad (7.18)$$

onderworpen aan de beperkingen:

$$h_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (7.19)$$

$$g_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (7.20)$$

waarin $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$, $\mathbf{z}$ respectievelijk de sets van onafhankelijke variabelen voor werking, technische specificaties en synthese zijn. Onder de onafhankelijke variabelen voor werking ($\mathbf{x}$) valt onder meer de energielevering van elke WKK-unit. Voorbeelden van onafhankelijke variabelen voor technische specificaties ($\mathbf{y}$) zijn het nominale vermogen van elke unit, drukken en temperaturen van vloeistoffen (indien niet strikt bepaald door processen), nominale rendementen, enz. De onafhankelijke variabelen voor synthese ($\mathbf{z}$) geven aan of bepaalde componenten in het systeem

aanwezig zijn of niet; het aantal gelijkaardige WKK-units is een voorbeeld; anderzijds kan ook het nominale vermogen van een unit een onafhankelijke variabele voor synthese zijn: een nulwaarde geeft aan dat de eenheid niet bestaat in de optimale configuratie.

De objectieffunctie in vergelijking (7.18) is geschreven als een algemene uitdrukking die ook toepasbaar is wanneer maximalisatie het echte objectief is: maximalisatie van een functie is equivalent met minimalisatie van zijn negatieve of inverse waarde. Voorbeelden van objectieffuncties in bij optimalisatie van ontwerp van WKK-systemen zijn de volgende:

- Maximalisatie van de NPV,
- Maximalisatie van het IRR,
- Minimalisatie van de terugverdientijd.

De gelijkheids- en ongelijkheidsbeperkingen in vergelijkingen (7.19) en (7.20) respectievelijk, zijn niets meer dan het model van het systeem (paragraaf 7.6.1), de technische limieten, en de limieten opgelegd door regels, regelgevingen en contracten.

De optimale oplossing wordt bekomen wanneer de synthese van het systeem (componenten waaruit het systeem is opgebouwd), de designkarakteristieken van de uitrusting en de werkingsmode in elk tijdsinterval bepaald zijn, en wel zodanig dat voldaan is aan het algemene objectief van vergelijking (7.18). Het complete optimalisatieprobleem zal meestal opgelost worden via een procedure met meerdere niveaus. Een voorbeeld hiervan is het volgende:

- Voor alle beschikbare sets (y_i, z_i) wordt telkens de waarde van x gezocht die de objectieffunctie $F(x, y_i, z_i)$ minimaliseert. De gevonden oplossing voor x wordt vervolgens x_i genoemd. Meestal is x_i niet één waarde, maar een matrix van waarden die de optimale werkingsmode geven voor elk uur van de periode van analyse.
- Daarna wordt uit alle aldus bekomen sets (x_i, y_i, z_i) de set gehaald die de objectieffunctie minimaliseert, en deze set is de uiteindelijke oplossing van het complete optimalisatieprobleem.

De oplossingsprocedure bevat twee maal het zoeken naar een optimum. Optimalisatiemethoden gebaseerd op lineaire of niet-lineaire mathematische programmering worden gebruikt voor dit doel. Ze worden geïmplementeerd via een door de gebruiker gemaakt of commercieel beschikbaar softwarepakket. In sommige gevallen kan het voorkomen dat er slechts een zeer beperkt aantal mogelijkheden zijn voor de sets (y_i, z_i) , hetgeen het optimalisatieprobleem natuurlijk sterk vereenvoudigt.

7.6.2.2 Werkingsoptimalisatie

Zoals reeds gezegd zal in veel gevallen ook optimalisatie van de werking van een reeds compleet gespecificeerd systeem (zowel synthese als designspecificaties zijn gegeven) dienen te gebeuren. Een dergelijke werkingsoptimalisatie kan in elk tijdsinterval uitgevoerd worden om de optimale werkingsmode in elk tijdsinterval te bepalen. Zo wordt uiteindelijk de beste prestatie van het gegeven systeem in de gegeven specifieke toepassing bepaald.

In elk tijdsinterval, zo gedefinieerd dat een steady-state werking van het systeem kan verondersteld worden (bvb. elk uur, in een uur tot uur model), kan een werkingsoptimalisatie probleem voorgesteld worden door de werkingsobjectieffunctie

$$\min f(\mathbf{x}) \tag{7.21}$$

onderworpen aan een aantal beperkingen, zoals in formules (7.19) en (7.20), die verbonden zijn aan de werking van het systeem. Voorbeelden van werkingsobjectieffuncties zijn de volgende:

- Maximalisatie van het totale rendement,
- Maximalisatie van de relatieve primaire energiebesparing,
- Maximalisatie van het (uurlijks) operationeel financieel resultaat (ook werkingswinst genoemd, gelijk aan opbrengsten min kosten)

Het is hierbij van belang te vermelden dat deze objectieffuncties berekend worden voor een particulier tijdsinterval. Bij werkingsoptimalisatie is het immers kenmerkend dat er gekeken wordt naar een kort tijdsbestek, bijvoorbeeld een uur. In tegenstelling tot bij de designoptimalisatie wordt dan ook niet gestreefd naar een optimalisatie van typische lange-termijnparameters als terugverdientijd, IRR en NPV.

Wat hierboven beschreven staat is echter slechts geldig onder de aanname dat geen enkele beslissing omtrent de werking van het systeem in een bepaald tijdsinterval de beslissingen voor andere tijdsintervallen beïnvloedt. Wanneer deze onderstelling niet kan gemaakt worden, zijn dynamische programmeertechnieken vereist, welke buiten het kader van deze tekst vallen.

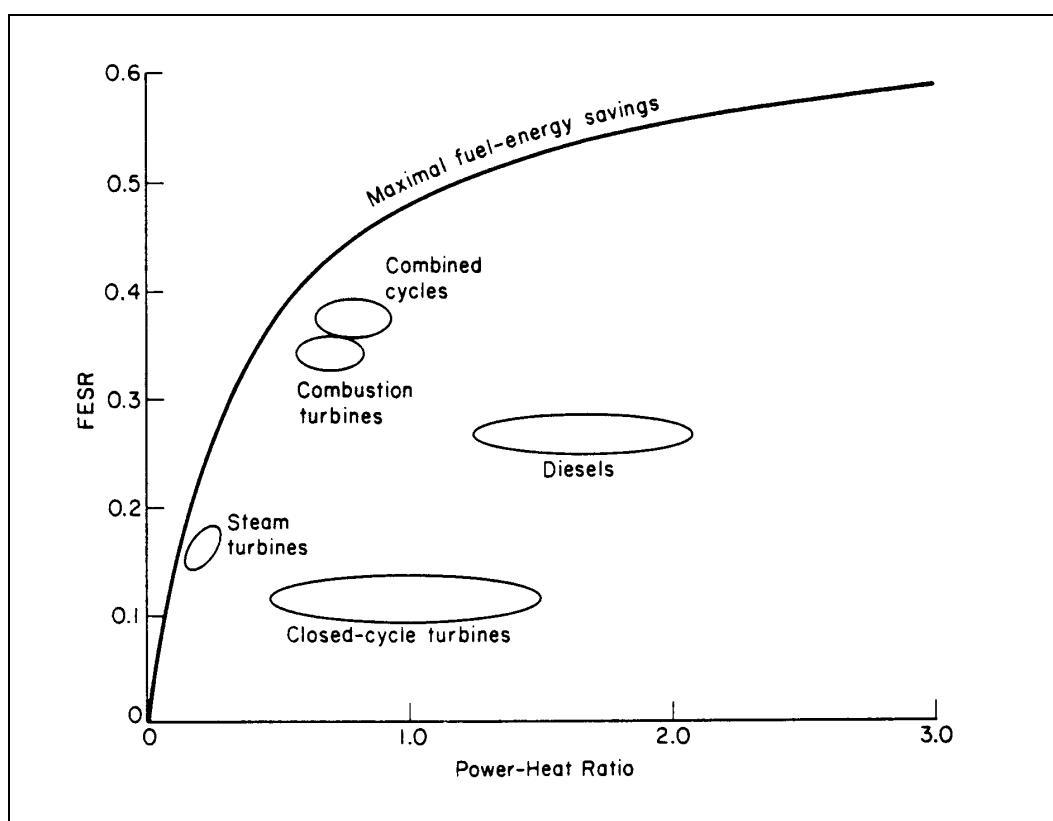
Toch zijn dergelijke situaties niet ondenkbaar. Zo zal het bijvoorbeeld zeer onwaarschijnlijk zijn dat een installatie voor een zeer beperkte tijd (bvb een uur) stilgelegd wordt, hoewel tijdens die tijdsperiode toch verlies geleden wordt indien ze draait. Het kan immers zo zijn dat door lange opstarttijden de opstartkost hoger ligt dan de geleden verliezen, wat het blijven draaien rechtvaardigt. Als echter gedurende een langere periode verlies zou geleden worden door te blijven draaien, dan zal het gecumuleerde verlies groter worden dan de opstartkost van de installatie, hetgeen dan weer van stilleggen de beste keuze zou maken. Het is echter duidelijk dat hier meerdere tijdsintervallen van een uur moeten beschouwd worden om een beslissing te nemen, en dat de resultaten van het ene interval de werkingsmode in het andere interval kunnen beïnvloeden.

8 IMPACT VAN WARMTEKRACHTKOPPELING

Warmtekrachtkoppelingssystemen kunnen zowel voordelige als nadelige invloeden hebben op het verbruik van niet-hernieuwbare energie, op het dienstensysteem van een regio of een land, op het milieu, alsook op de samenleving. De potentiële nadelige effecten kunnen verminderd worden, als het WKK-systeem nauwkeurig gekozen, ontworpen en ingepast wordt, als het zorgvuldig geïntegreerd wordt in het energiesysteem van de regio, inclusief de bestaande en geplande energievoorzieningen, en als het behoorlijk onderhouden en uitgebaat wordt gedurende de volledige levensduur.

8.1 Impact op het brandstofverbruik

Als ze behoorlijk worden ontworpen en bediend, besparen alle warmtekrachtkoppelingssystemen brandstofenergie indien zowel de warmte als de elektriciteit integraal benut worden. Zij hebben immers een lager primair energieverbruik dan de gescheiden productie van dezelfde hoeveelheden warmte en elektriciteit.



Figuur 8.1: Relatie tussen de relatieve primaire energie besparing (FESR) en de kracht-warmteverhouding (PHR) voor verschillende warmtekrachtkoppelingstechnologieën (Belding 1989)

Bekijken we bijvoorbeeld enkele typische waarden in figuur 8.1: een warmtekrachtkoppelingssysteem met stoomturbine vermindert het verbruik van primaire energie met ongeveer 15% in vergelijking met de gescheiden productie van elektriciteit en warmte met respectievelijk een klassieke stoomcentrale en een ketel; een WKK met Dieselmotor(en) vermindert dan weer het verbruik van brandstof met ongeveer 25% in vergelijking met de gescheiden productie van elektriciteit en warmte met respectievelijk een centrale met

dieselmotoren en een ketel. Of een warmtekrachtkoppelingssysteem dure, geïmporteerde en niet-hernieuwbare brandstof zoals olie uitspaart, hangt echter af van de brandstof die gebruikt wordt voor het warmtekrachtkoppelingssysteem, en de brandstoffen die gebruikt worden voor de installaties voor gescheiden productie van warmte en elektriciteit die worden vervangen door de WKK.

Naast het feit dat ze efficiënter zijn dan de aparte productie van elektriciteit en warmte, besparen warmtekrachtkoppelingssystemen energie om nog een andere reden: ze bevinden zich gewoonlijk veel dichterbij de gebruiker dan de centrale elektriciteitscentrales. Zo reduceren ze, of elimineren ze zelfs de elektrische energieverliezen langs het transport- en distributienetwerk, welke 8-10% kunnen bedragen van de elektrische energie aan de bron.

De selectie van warmtekrachtkoppelingstechnologieën en van de gebruikte brandstoffen, moet in overeenstemming zijn met een lange termijn energievisie, op regionaal of nationaal vlak (vb. vermindering van de import van brandstofolie, stijging van hernieuwbare energie, rationeel gebruik van aardgas, etc.).

8.2 Impact op het productiepark voor elektriciteit

Op veel plaatsen moeten de nutsbedrijven nieuwe centrales bouwen, ofwel om de oude te vervangen, ofwel om de capaciteit te verhogen gezien de grotere vraag. In deze gevallen kunnen warmtekrachtkoppelingssystemen belangrijke economische besparingen bieden voor de nutsbedrijven en kan het een aantrekkelijk alternatief zijn voor klassieke elektriciteitscentrales, om de volgende redenen:

- Warmtekrachtkoppelingssystemen voegen bijkomende capaciteit toe en verminderen de nood aan nieuwe investeringen in grote elektriciteitscentrales.
- De relatief kleine omvang van warmtekrachtkoppelingssystemen en de kortere constructietijd kunnen zorgen voor meer flexibiliteit in het aanpassen aan onverwachte veranderingen in vraag dan grote basislast-elektriciteitscentrales. Bovendien is een warmtekrachtkoppeling een meer kostenbesparende vorm van verzekering tegen zulke veranderingen dan het overdimensioneren van de capaciteit van klassieke elektriciteitscentrales.
- Wegens de korte constructietijd kan een warmtekrachtkoppeling de intrestkosten gedurende de bouw significant reduceren, en zodoende de totale investeringskost reduceren.

Veel warmtekrachtkoppelingseenheden die in parallel werken en verbonden zijn met het net, verhogen de betrouwbaarheid van elektriciteitsvoorziening, maar ze kunnen een negatief effect hebben op de stabiliteit van het netwerk, als ze niet behoorlijk met het net zijn verbonden. Om zulke problemen te vermijden, moet de verbinding tussen de verschillende eenheden voldoen aan bepaalde standaarden en uitgevoerd worden in nauwe samenwerking met het nutsbedrijf.

De uitbreiding van warmtekrachtkoppelingen kan een substantieel negatieve economische invloed hebben op nutsbedrijven op plaatsen waar ze ofwel een overcapaciteit hebben, ofwel passen in grote bouwprojecten die niet kunnen uitgesteld worden. Als grote industriële en commerciële sites hun eigen warmtekrachtkoppelingssystemen hebben en uit de portefeuille van het nutsbedrijf verdwijnen, dan moeten de vaste kosten van het nutsbedrijf gedeeld worden door

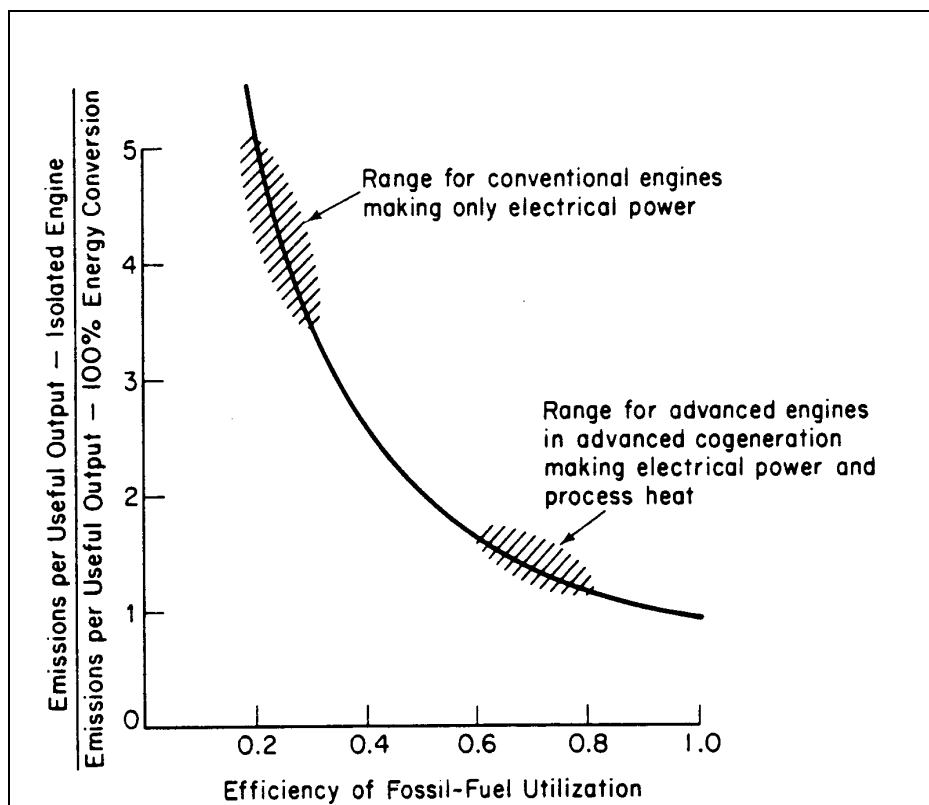
een lagere hoeveelheid geproduceerde elektriciteit, hetgeen resulteert in hoger elektriciteitsstarieven. Op lange termijn kan zulke concurrentie voordelig zijn voor het nutsbedrijf door af te zien van de bouw van nieuwe centrales, de financiële druk te verlichten en de tariefniveaus te verlagen. Maar de negatieve effecten op korte termijn kunnen significant zijn, tot de planning van de bouw en het budget zijn aangepast.

Eén oplossing voor de concurrentie die ontstaat door warmtekrachtkoppelingen, is dat de nutsbedrijven zelf warmtekrachtkoppelingssystemen bezitten. Nutsbedrijven kunnen (of moeten) investeren in een warmtekrachtkoppeling, waar ze economisch competitief is met andere types van capaciteitvermeerdering. Of dit mogelijk is of niet, of onder welke voorwaarden het mogelijk is hangt af van het wettelijk en reglementaire kader van een land.

8.3 Impact op het milieu

8.3.1 Impact op de kwaliteit van lucht, water en bodem

Naast een brandstofbesparing, kunnen warmtekrachtkoppelingssystemen ook een reductie van vervuulende en/of schadelijke emissies verwezenlijken. Ze gebruiken brandstof immers doorgaans efficiënter dan gescheiden productie. Die efficiëntie heeft een directe impact op de emissies, zoals getoond in figuur 8.2, op voorwaarde dat de gebruikte brandstof niet van lagere kwaliteit is dan de brandstof(fen) die voor de aparte productie van elektriciteit en warmte gebruikt wordt. Als aanvulling op de directe vermindering van emissies, gaat het lagere brandstofverbruik gepaard met een indirecte daling van de emissies in de rest van de brandstofcyclus: exploratie, extractie, raffinage, verwerking, transport en opslag.



Figuur 8.2: Impact van de totale brandstofbenuttigingsgraad op de emissie van vervuulende elementen (Belding 1982)

Toch is het niet altijd zeker dat een warmtekrachtkoppeling de totale emissie zal verminderen; het hangt af van de gekozen technologie voor WKK, de technologieën gebruikt voor gescheiden productie van elektriciteit en warmte (met inbegrip van de samenstelling van het productiepark voor elektriciteit), de momenten waarop de WKK-installatie operationeel is, en de gebruikte brandstoffen. Het is ook mogelijk een vermindering te hebben van de uitstoot van broeikasgassen (vb. CO₂) maar een stijging van een ander vervuילend gas (vb. NO_x). Gezien het belang van emissies, behandelen we dit onderwerp meer in detail en meer kwantitatief in een aparte paragraaf.

Wanneer vele kleine en verspreide warmtekrachtkoppelingseenheden een centrale elektriciteitscentrale vervangen, is de verbetering van de luchtkwaliteit niet zeker. Grote elektriciteitscentrales zijn normaal in afgelegen gebieden gesitueerd; ze kunnen voorzien zijn van een uitrusting voor de reductie van stikstofdioxide (DENO_x) en ontzwaveling van de rookgassen (DESO_x) en hoge schoorstenen voor de verspreiding van resterende schadelijke emissies. Daarentegen zijn warmtekrachtkoppelingseenheden meestal dicht bij of in stedelijke zones gelokaliseerd en kunnen een schadelijke impact hebben op de lokale luchtkwaliteit.

Van de beschikbare warmtekrachtkoppelingstechnologieën hebben Diesel- en Ottomotoren (gasmotoren) het grootste potentieel voor een negatieve impact op de luchtkwaliteit. Dit is vooral te wijten aan de hoge (maar meestal controleerbare) emissies van stikstofdioxiden en onverbrande koolwaterstoffen. Deze motoren komen het meest voor bij warmtekrachtkoppelingen in gebouwen. Hun kortere (dan die in grote elektriciteitscentrales) schouwen en de grote omliggende gebouwen, welke de verspreiding van vervuïlende emissies verhinderen, resulteren in een hogere blootstelling van de totale bevolking aan deze vorm van pollutie. Het effect van grote gebouwen in luchtstromen en, aldus, het effect op de verspreiding van de vervuïlende stoffen wordt “*stedelijke meteorologie*” (urban meteorology) genoemd. Stedelijke meteorologie kan ervoor zorgen dat rookpluimen neerwaarts gaan of gevangen worden en recirculeren in de artificiële valleien gevormd door de stadsgebouwen. Zo kan dit resulteren in zeer hoge lokale vervuïlingniveaus tijdens bepaalde windcondities. Als er tegelijkertijd temperatuurinversie optreedt, wordt het probleem nog erger.

Ook al zijn de potentiële invloeden op de luchtkwaliteit vaak de belangrijkste bezorgdheid inzake milieu, toch zijn ook bodem- en watervervuïling, lawaai en koeltorentrek belangrijk. Bodem- en watervervuïling kunnen ontstaan door brandstoftransport en –gebruik, afvalverwerking (slib, as, gedegradeerde smeerolie), “blowdown” van ketels en natte koelingsystemen, bezinksel van steenkoolhopen. Lawaai wordt gegenereerd door de warmtekrachtkoppelinginstallaties zelf, maar ook door het toegenomen verkeer te wijten aan de constructie en de uitbating van het systeem. Koeltorentrek kan ook een hinder zijn voor degenen die in de buurt wonen.

De voornoemde schadelijke effecten kunnen een probleem stellen in stedelijke gebieden. Om deze effecten op de bevolking te minimaliseren, moet aan bepaalde eisen voldaan zijn als een WKK-systeem geïnstalleerd en uitgebraat wordt in of dicht bij gebouwen of in stedelijke gebieden:

- Zorgvuldige selectie van de site.
- Selectie van een WKK-technologie met lage emissies,.
- Installatie van apparatuur voor vermindering en controle van vervuïling.
- Installatie van een elastische fundering en geluidsisolatie en –demping.
- Constructie van een schouw hoger dan de omgevende gebouwen.

- Voorzieningen voor de veilige verzameling en verwijdering van vloeibaar of vast afval.

Deze maatregelen kunnen in sommige gevallen erg duur zijn, en de betrokkenen kunnen de neiging hebben ze te negeren of te mijden. Om negatieve gevolgen te voorkomen, is het nochtans nodig ze te implementeren.

8.3.2 Lawaai en trillingen

Niet enkel het warmtekrachtkoppelingssysteem zelf is een bron van lawaai, maar ook het toegenomen verkeer, dat gepaard gaat met de oprichting en de uitbating van het systeem (vb. vrachtwagens die het systeem voorzien van brandstof en/of ander materiaal, en die afval verwijderen) doen het lawaai toenemen. Een zorgvuldige planning is misschien de enige mogelijkheid om de hinder van het verkeer te reduceren. Om het lawaai komende van het systeem zelf te reduceren, kunnen echter wel meer specifieke maatregelen genomen worden.

Warmtekrachtkoppelingssystemen moeten voldoen aan bepaalde normen, die de maximumniveaus voor geluidsemissie specificeren, om de mensen die in de nabijheid wonen of werken te beschermen.

Het geluid van een inwendige verbrandingsmotor is gewoonlijk hoger dan 95 dB(A). In industriële installaties wordt normaal aangenomen dat een geluidsniveau van 80 dB(A) of minder geen gehoorproblemen zal veroorzaken op lange termijn. Voor woondistricten zijn lagere limieten van toepassing, welke afhangen van de plaats en, eventueel, het tijdstip van de dag. Als gevolg hiervan moeten maatregelen genomen worden om het geluidsniveau te verlagen tot de aanvaardbare limieten.

Wanneer een warmtekrachtkoppelingseenheid in een gebouw wordt geplaatst, moet aan volgende punten aandacht worden besteed

- Het limiteren van het lawaai in de kamer zelf met behulp van een akoestische afscherming, die het geluid reduceert met minstens 25 dB(A). Er kan gebruik gemaakt worden van akoestische dempers in het luchtinlaatkanaal en geluidsabsorberende materialen op de muren.
- Het beperken van het lawaai in de kamers in de onmiddellijke omgeving. Hiertoe kan men de constructie van muren, plafonds en vloeren verstevigen en het aantal ramen en deuren tot een minimum beperken.
- Het beperken van het lawaai naar buiten toe. Akoestische dempers op de uitlaatkanalen zijn hiervoor aangewezen..

Voor een WKK in een gebouw moet er naast de maatregelen voor lawaai-reductie ook aandacht besteed worden aan het vermijden van de transmissie van trillingen door de bouwstructuur. Hiervoor wordt de motor dikwijls op een elastische fundering geplaatst en, indien nodig, wordt bijkomend materiaal gebruikt voor de absorptie of demping van de trilling.

Vaak echter wordt een warmtekrachtkoppelingssystemen buiten het gebouw geplaatst in een container. Een dergelijke opstelling, in combinatie met systemen voor lawaai-reductie, is dikwijls een goedkopere oplossing voor lawaai- en trillingsproblemen dan het uitvoeren van alle nodige maatregelen in het gebouw. Een goedgebouwde container met dempers in de in- en uitlaatkanalen en in de ventilatoren van de container, met lawaai-reducerende isolatie, dubbele

deuren en geen andere openingen, kan het lawaainiveau van een warmtekrachtkoppelingseenheid verminderen tot 30 dB(A) op 60 m van de container.

8.4 Impact van warmtekrachtkoppeling op de luchtkwaliteit

Het al dan niet verbeteren of verslechteren van de luchtkwaliteit is het belangrijkste punt met betrekking tot de milieu-impact van warmtekrachtkoppeling. Dit is vooral kritisch in stedelijke gebieden, waar de luchtkwaliteit lager kan zijn dan het nationale gemiddelde, en de tolerantie voor bijkomende emissies klein kan zijn.

Een schatting van de gevolgen van warmtekrachtkoppeling op de luchtkwaliteit is vaak complex, omdat de gevolgen van schadelijke emissies (NO_x, SO_x,..) kunnen variëren van de ene locatie tot de andere en dus een sterk lokale impact hebben. Dit is echter niet het geval voor emissies van broeikasgassen (CO₂), gezien deze uitsluitend een globale klimaatsimpact hebben. De invloed van polluerende emissies kan positief zijn (verminderde emissies) in de buurt van de centrale elektriciteitscentrale die de regio normaal voorziet van energie, maar ze kan negatief zijn (verhoogde emissies) op de site waar het warmtekrachtkoppelingssysteem is gesitueerd. Dit verschil maakt het noodzakelijk om een analyse uit te voeren op twee niveaus: een lokaal niveau en een globaal niveau.

8.4.1 Uitlaatgasemissies

De componenten van de uitlaatgassen, die van belang zijn omwille van hun schadelijkheid, zijn de volgende:

- koolstofdioxide (CO₂),
- koolmonoxide (CO),
- stikstofoxiden (NO_x),
- zwaveloxiden (SO_x, meestal zwaveldioxide: SO₂),
- onverbrande koolwaterstoffen (C_xH_y, ook voorgesteld met de letters HC of UHC),
- stofdeeltjes, ook “particulates” genoemd.

Wetten en normen specificeren de maximum emissieniveaus voor elektriciteitscentrales. Ze zijn meestal ook van toepassing op warmtekrachtkoppelingssystemen. Sommige landen kunnen een speciale wetgeving hebben voor warmtekrachtkoppelingseenheden.

Tabel 7 geeft de typische niveaus voor ongecontroleerde emissies en dit voor verschillende technologieën van warmtekrachtkoppeling. Er dient vermeld te worden dat het emissieniveau van een WKK-installatie niet alleen afhangt van de gekozen technologie, maar ook van het bouwjaar, de toestand (leeftijd) van de eenheid, het geschatte vermogen, de werkingslast (percent van het geschatte vermogen), het type en de kwaliteit van de gebruikte brandstof, de werking van de apparatuur voor pollutieafname, etc. Het is bijgevolg evident dat tabellen zoals tabel 7 enkel voor eerste schattingen geschikt zijn. Een nauwkeurige schatting van een systeem moet gebaseerd zijn op specifieke data voor elk geval apart.

8.4.1.1 CO₂-emissies

Koolstofdioxide-emissies hangen vooral af van het type, de kwaliteit en de kwantiteit van de gebruikte brandstof. Om reeds een relatief nauwkeurige benadering te krijgen, kan een volledige verbranding worden aangenomen. Dit leunt zeer dicht aan bij de werkelijkheid, als de verbranding gebeurt met een overmaat lucht en de verbrandingsapparatuur in goede staat is en correct is afgesteld. Dan wordt de hoeveelheid geëmitteerde CO₂ berekend met de volgende vergelijking

$$m_{\text{CO}_2} = \mu_{\text{CO}_2} m_f \quad (8.1)$$

Met:

m_{CO_2} : massahoeveelheid van de geëmitteerde CO₂ (kg),

μ_{CO_2} : emissies van CO₂ per eenheid brandstofmassa (kg CO₂/kg brandstof),

$$\mu_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} c \quad (8.2)$$

c : massa-inhoud van koolstof in brandstof (vb. kg C/kg brandstof),

m_f : massahoeveelheid verbruikte brandstof,

$$m_f = \frac{E}{\eta H_u} \quad (8.3)$$

E : netto hoeveelheid geproduceerde energie door de installatie ,

η : energetisch rendement van het systeem, gebaseerd op de onderste verbrandingswaarde van brandstof,

H_u : onderste verbrandingswaarde van brandstof.

Vergelijkingen (8.1) - (8.3) zijn niet alleen toepasbaar op warmtekrachtkoppelingssystemen, maar op elk systeem dat brandstof verbrandt. Wanneer ze bijvoorbeeld worden toegepast op een elektriciteitscentrale of een warmtekrachtkoppelingssysteem, dan is E de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit en η is het elektrisch rendement, η_e , zoals gedefinieerd door vergelijking (3.3). Als ze worden toegepast op een ketel, dan is E de nuttige thermische output van de ketel en η zijn thermisch rendement. Typische waarden voor c , μ_{CO_2} en H_u worden voor verschillende brandstoffen gegeven in tabel 8.1.

Als de waarden van de parameters die voorkomen in vergelijkingen (8.2) en (8.3) met de tijd veranderen, om welke reden ook (vb. verandering in rendement omwille van deellastbedrijf, verandering in kwaliteit en bijgevolg in c en H_u van de brandstof), dan wordt de totale CO₂-emissie gedurende een tijdsperiode bekomen via een sommatie over verschillende intervallen of de integraal over de tijd van vergelijking (8.1).

Een manier om de hoeveelheid uitgestoten CO₂ bij productie van een bepaalde hoeveelheid nuttige energie te verminderen, is het rendement van het brandstofgebruik te verhogen (als de brandstof dezelfde blijft). Anderzijds zal de hoeveelheid CO₂ die in de omgeving wordt geloosd lager zijn dan de geproduceerde hoeveelheid, als de CO₂ (minstens gedeeltelijk) gebruikt wordt in een proces. CO₂ kan bijvoorbeeld samen met waterstof gebruikt worden voor de productie van synthetische koolwaterstoffen. Andere grootschalige toepassingen, die echter moeilijk combineerbaar zijn met warmtekrachtkoppeling, situeren zich op gebied van de verbetering van de ontginning van ruwe olie en aardgas. Voor warmtekrachtkoppeling denken we dan eerder aan het gebruik van CO₂ in serres als voedingsstof voor planten.

In het kader van het Kyoto protocol, wil Europa de totale CO₂ emissies reduceren met 8% over de periode 1990 tot 2008-2012. Naast het stimuleren van gebruik van brandstoffen met geringere koolstofinhoud(c) en verhoging van het procesrendement, worden thans in de industrie diverse technieken bedacht om de CO₂ in de rookgassen te capteren en te sequesteren..Deze technieken zijn tevens toepasselijk voor WKK systemen, maar hebben alle een nefaste impact op het globaal systeemrendement en de investeringskost.

Tabel 8.1: Typische eigenschappen van brandstoffen voor de berekening van CO₂-emissies.

Brandstof	Koolstofinhoud (100)	CO ₂ emissies μCO ₂	Onderste verbrandingswaarde (H _u)	CO ₂ emissie per energieinhoud van de brandstof
	%	Kg CO ₂ /kg fuel	MJ/kg fuel	kgCO ₂ /kWh fuel
Aardgas	75	2.75	49	0.202
Diesel	83	3.05	42.5	0.258
Stookolie 0.7%S	86.5	3.17	41.5	0.275
Stookolie 2% S	85	3.12	41	0.274
Turf*	58	2.13	7.8	0.983
Ligniet*	64	2.35	24	0.3525
Kolen*	80	2.93	30	0.351

* Data zijn geldig voor brandstof zonder vocht en as

8.4.1.2 CO en HC Emissies

Ondanks de luchtvermaat zijn op sommige plaatsen in de verbrandingskamers de condities zo dat de koolstofmonoxidemoleculen niet verder worden geoxideerd tot koolstofdioxide, of zelfs koolwaterstofmoleculen niet worden verbrand tot koolstofdioxide en waterdamp.

De concentratie van deze twee bestanddelen (koolstofmonoxide en koolwaterstoffen) dienen in normale omstandigheden erg laag te zijn. Significante hoeveelheden van deze stoffen in de rookgassen kunnen duiden op een laag verbrandingsrendement, te wijten aan verkeerde menging van brandstof met lucht, of slechte werkingscondities.

Er is geen eenvoudige manier om de concentratie CO en HC in de uitlaatgassen te berekenen. Experimentele metingen uitgevoerd door de producenten worden gebruikt om resultaten af te leiden zoals deze voorgesteld in tabellen 8.2 tot 8.4.

Reductie van de CO- en HC-emissies

Correct onderhoud en afregeling van de verbrandingsapparatuur is absoluut noodzakelijk om CO- en HC-emissies binnen specifieke limieten te houden. Als een systeem niet voldoet aan de wettelijke limieten of als verdere reductie vereist is, dan kan een katalytische omzetter (oxidatiekatalysator of oxicat) worden geïnstalleerd om de oxidatie van zowel CO als C_xH_y te

bevorderen. Voor deze oxidatie kan supplementaire lucht vereist zijn, in het bijzonder als een lage luchtvermaat wordt gebruikt in de verbranding.

Tabel 8.2: Typische waarden van ongecontroleerde emissies van warmtekrachtkoppelingssystemen

System	Fuel	Electrical efficiency (%)	Specific emissions (gr/kWh _e)					
			CO ₂	CO	NO _x	HC	SO _x	Particulates
Diesel	Diesel 0.2% S Dual ⁽¹⁾	35	738.15	4.08	15.56 ⁽²⁾	0.46	0.91	0.32
			593.35	3.81	11.30 ⁽³⁾	3.95	0.09	0.04
Gas engine	Natural gas	35	577.26	2.80	1.90	1.00	≈0	≈0
Gas turbine	Natural gas	25	808.16	0.13	2.14	0.10	≈0	0.07
	Diesel 0.2% S		1033.41	0.05	4.35	0.10	0.91	0.18
Gas turbine-low NO _x	Natural gas	35	577.26	0.30	0.50	0.05	≈0	0.05
Steam turbine (new)	Coal	25	1406.40	0.26	4.53	0.07	7.75	0.65
	Fuel oil		1100.00	≈0	1.94	0.07	5.18	0.65
	Natural gas		808.16	≈0	1.29	0.26	0.46	0.07
Fuel cells (PAFC)	Natural gas	40	505.10	0.03	0.03	0.05	≈0	≈0

(1) 90% of energy supplied by natural gas and 10% by Diesel oil.

(2) Engines of modern designs emit 11-12 gr NO_x/kWh_e.

(3) Engines of modern design emit 7-8 gr NO_x/kWh_e.

(1) 90% of energy supplied by natural gas and 10% by Diesel oil.

(2) Engines of modern designs emit 11-12 gr NO_x/kWh_e.

(3) Engines of modern design emit 7-8 gr NO_x/kWh_e.

Tabel 8.3: Typische waarden van de emissies van conventionele elektriciteitscentrales

System	Fuel	Efficiency (%)	Specific emissions (gr/kWh _e)					
			CO ₂	CO	NO _x	HC	SO _x	Particulates
Steam turbine (old)	Coal 3% S	34	1034.12	0.18	3.13	0.05	19.87	1.41
	Fuel oil 1% S	31	887.06	0.18	3.18	0.05	4.76	0.23
	Natural gas	31	651.74	0.09	3.04	0.18	≈0	0.05
Steam turbine (new)	Coal	31*	1134.20	0.18	2.50	0.05	6.00	0.14
	Fuel oil low sulfur	31	887.06	0.18	1.36	0.05	3.63	0.14
Gas turbine	Diesel oil	34	759.86	0.55	2.40	0.18	0.14	0.18
	Natural gas	34	594.24	0.55	1.95	≈0	≈0	0.05
Gas turbine low NO _x	Natural gas	38	531.68	0.30	0.50	≈0	≈0	0.04
* Lower efficiencies of new steam turbine systems are due to NO _x and SO ₂ abatement equipment								

Tabel 8.4: Typische waarden van emissies van water- en stoomketels

System	Fuel	Specific emissions (gr/kWh _{th} of useful heat)					
		CO ₂	CO	NO _x	HC	SO _x	Particulates
Boiler for hot water	Natural gas	252.55	0.03	0.19	0.02	≈0	0.02
	Diesel 0.2% S	322.94	0.06	0.25	0.02	0.37	0.03
Steam boiler	Coal	439.50	0.08	1.36	0.02	2.32	0.20
	Fuel oil	343.73	0.06	0.57	0.02	1.55	0.20
	Natural gas	252.55	0.03	0.39	≈0	≈0	0.02
Industrial steam boiler	Coal 2% S	439.50	0.16	1.12	0.08	5.65	0.98
	Fuel oil 1% S	343.73	0.06	0.78	0.02	2.03	0.30
	Natural gas	252.55	0.03	0.33	≈0	≈0	0.03
An 80% efficiency of the boiler has been considered.							

8.4.1.3 *NO_x Emissies*

Stikstofoxiden worden gevormd door de verbranding van stikstof, die chemisch gebonden is in de brandstof of die aanwezig is in de lucht. De emissie van NO_x baart de overheden heel wat zorgen. Giftige effecten van NO_x treden immers reeds op bij concentraties die minstens 10 keer lager zijn dan de niveaus waarbij CO giftig wordt.

Door onderzoek en ontwikkeling in de verbrandingsuitrusting slaagde men erin de NO_x-emissies van gasturbines zeer sterk te verminderen gedurende de laatste jaren. Ook ketels en stoomelektriciteitscentrales hebben relatief lage NO_x-emissies (tabellen 8.2 – 8.4). Diesel- en gasmotoren hebben daarentegen veel hogere NO_x-emissieniveaus. Dit is te wijten aan de hoge verbrandingstemperaturen en verbrandingsdrukken. In de rest van deze paragraaf zal de aandacht vooral gericht worden op deze motoren, omdat zij meestal gebruikt worden voor warmtekrachtkoppelingen in gebouwen, waar het probleem van de luchtkwaliteit het meest kritisch is.

De belangrijkste parameters die het niveau van NO_x-vorming in een Diesel- of gasmotor bepalen, zijn:

- De verbrandingstemperatuur in de primaire zone van de verbrandingskamer,
- De verblijfstijd in de primaire verbrandingszone,
- De verbrandingsdruk
- De mengverhouding van lucht en brandstof.

De stoichiometrische luchtverhouding is de verhouding van de werkelijke hoeveelheid gebruikte lucht tot de stoichiometrische hoeveelheid.

Vaak wordt de stoichiometrische luchtverhouding voor het gemak de “lambdaverhouding” genoemd. Ze heeft een directe of indirecte invloed op de voornoemde parameters en, bijgevolg op de NO_x-emissies. Ze beïnvloedt ook de CO- en HC-emissies, het rendement en het vermogen van de motor. Een voorbeeld van deze invloed is gegeven in figuur 8.3.

Low-NO_x branders en verbrandingskamers, stoominjectie in de verbrandingskamer en katalytische reductie van de uitlaatgassen zijn de meest gebruikelijke technieken voor vermindering van NO_x in gasturbines.

De methodes voor reductie van NO_x-emissies in Diesel- en gasmotoren kunnen in twee categorieën worden geclassificeerd:

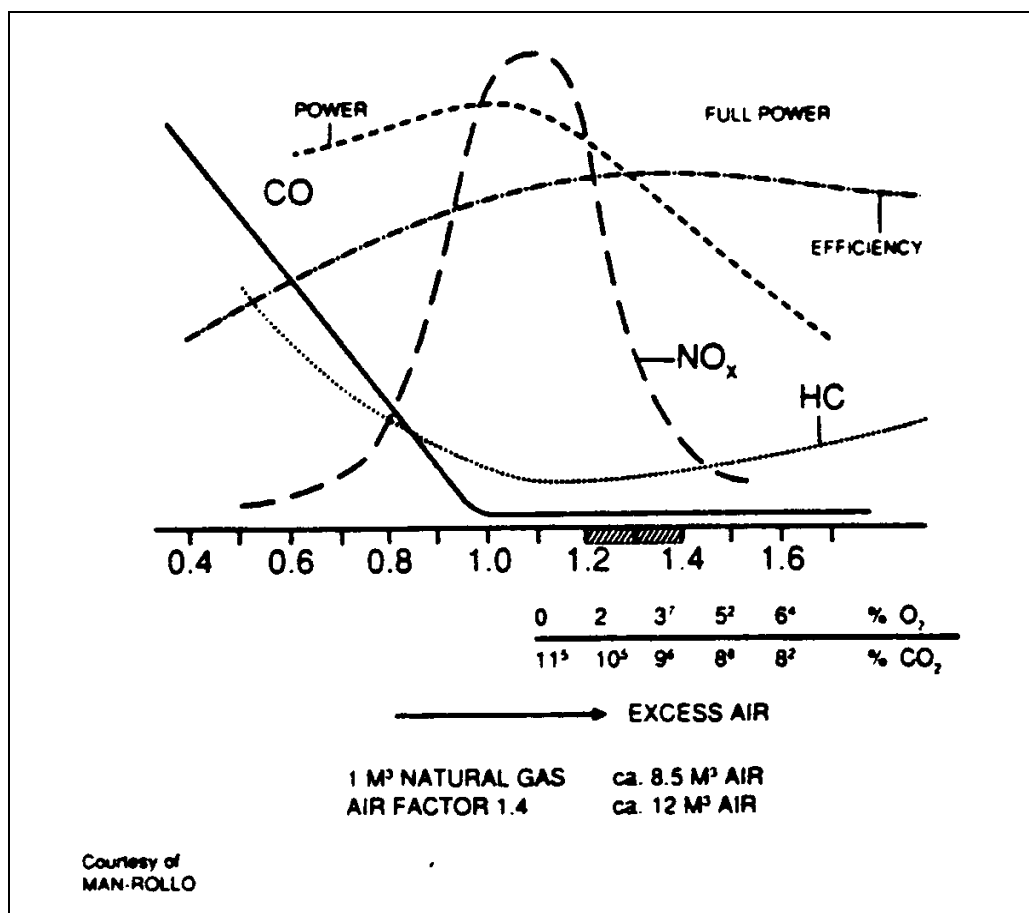
- Actieve reductie van NO_x-vorming door een gewijzigd motordesign en motorgebruik,
- Passieve reductie van NO_x in de uitlaatgassen.

8.4.1.3.1 Actieve reductie van NO_x

Constructeurs streven naar het verlagen van de verbrandingstemperatuur en het bereiken van volledige en snelle verbranding. Hiertoe worden verschillende methoden gebruikt:

- *Uitstellen van het ontstekingsstijdstip.* Hierdoor vermindert de temperatuur in de cilinder. Het heeft echter een negatief effect op het geleverde vermogen en het rendement van de motor. Hierdoor is de periode over dewelke het ontstekingsstijdstip kan worden uitgesteld, beperkt.

- *Veranderen van de stoichiometrische luchtverhouding (λ).* Zoals getoond in fig 45, zijn de NO_x -emissies maximaal bij $\lambda \approx 1.1$ (voor de afzonderlijke motor). Ze kunnen gereduceerd worden ofwel door rijke verbranding ($\lambda < 1$), ofwel door arme verbranding ($\lambda > 1.1$). Waarden voor $\lambda < 0.9$ zijn niet aanvaardbaar, omdat ze overdreven vorming van CO en HC (onvolledige verbranding) veroorzaken. De waarde van λ die uiteindelijk wordt gekozen, is het resultaat van een compromis tussen lage emissies en groot vermogen en rendement. Invoeren van lucht onder druk (turbo-oplading) helpt de NO_x -limieten te bereiken zonder vermogenverlies.
- *Lucht en brandstof beheersing.* Tijdens werking bij deellast moeten lucht- en brandstofdebiet gestuurd worden zodat de prestaties van de motor goed zijn en de emissies laag zijn. De waarden van λ bij deellast kunnen aanzienlijk verschillend zijn van de waarden bij nominaal vermogen.
- *Uitlaatgasrecirculatie (EGR).* Een deel van de uitlaatgassen (tot 40%) wordt samengevoegd met het mengsel van lucht en brandstof. Het mengsel dat de cilinders binnenkomt heeft dus een lagere verbrandingswaarde. Bijgevolg is de maximale verbrandingstemperatuur lager, hetgeen in een verlaagde NO_x -vorming resulteert. Maar EGR kan leiden tot een verhoogde corrosiegraad, en een lager vermogen en rendement.



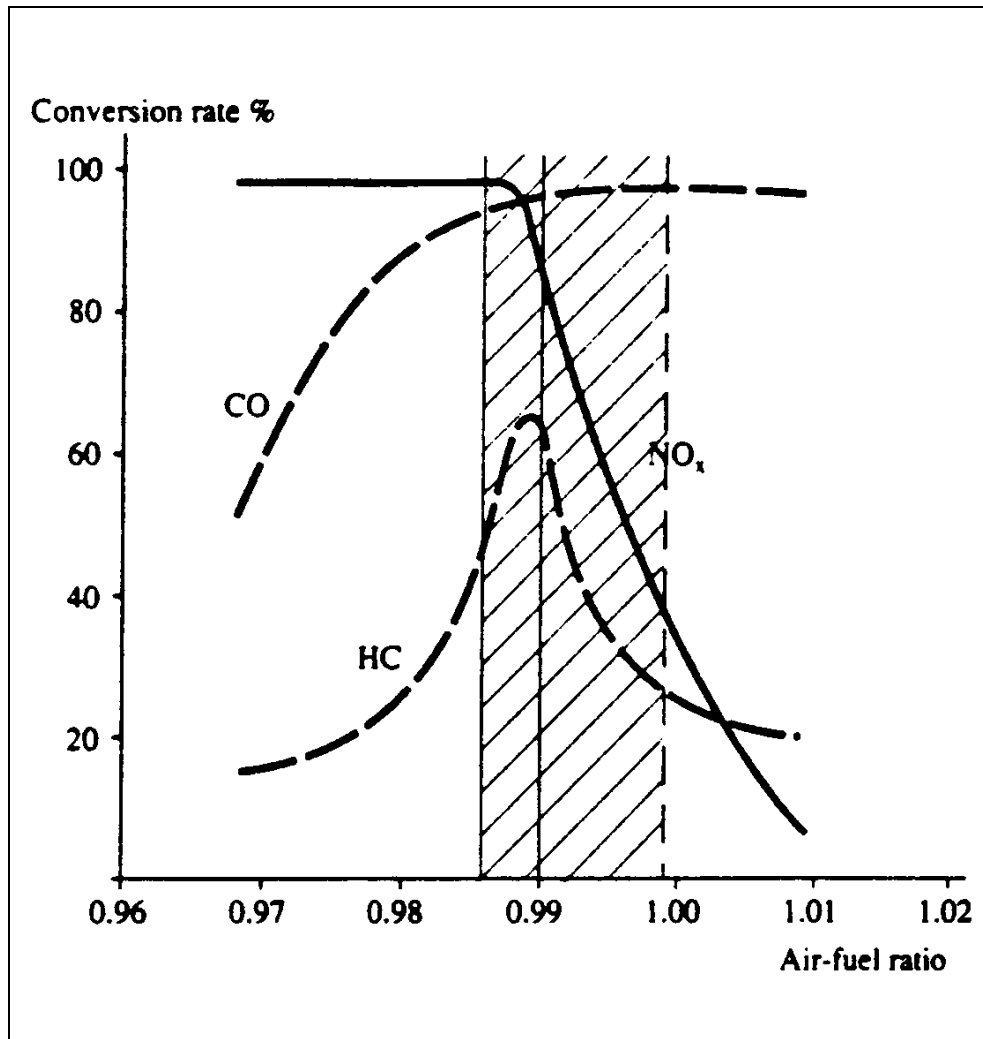
Figuur 8.3: Invloed van de stoichiometrische luchtverhouding (λ) op NO_x , CO en HC-emissie, vermogen en rendement van een gasturbine (Jennekens 1989)

8.4.1.3.2 Passieve reductie van NO_x

Terwijl actieve technieken de hoeveelheid NO_x die geproduceerd wordt tijdens de verbranding, tracht te verminderen, hebben passieve technieken tot doel om de NO_x-inhoud in de uitlaatgassen te verminderen door een katalytische reductie van NO_x tot stikstof en zuurstof. Katalysators kunnen onderverdeeld worden in twee groepen:

- *Niet-selectieve katalytische reductie (NSCR)*. Zoals de naam impliceert (niet-selectief), vermindert dit niet enkel de NO_x, maar ook de CO en C_xH_y. Daarom worden de toestellen driewegkatalysators genoemd. Het proces is gebaseerd op de eigenschap van rhodium om tijdelijk zuurstof aanwezig in NO_x aan zich te binden, en aldus de stikstof vrij te geven. De zuurstof reageert vervolgens met CO en C_xH_y tot CO₂ en H₂O. Het beheersen van λ is van het grootste belang voor het goed functioneren van de katalysator, omdat uitlaatgassen geen zuurstof mogen bevatten. Daarom kan zo'n katalysator enkel gebruikt worden bij motoren met rijke verbranding (lage λ) of motoren met uitlaatgasrecirculatie (EGR). De invloed van λ op het omzettingsrendement van het proces is geïllustreerd in figuur 8.4. Zoals getoond in de figuur, is de werkingsmarge met betrekking tot de λ -waarden eng. De omzettingsreacties zijn exotherm. Als te veel onverbrande brandstof de motor verlaat, zal dit resulteren in te hoge temperaturen in de katalysator, wat schade veroorzaakt. EGR en niet-selectieve katalysators verminderen de NO_x-emissies met 80-90%, CO met ongeveer 80% en HC met ongeveer 50%.
- *Selectieve katalytische reductie (SCR)*. Dit wordt gebruikt om enkel de NO_x in de uitlaatgassen te reduceren. Het wordt gebruikt bij motoren die werken met een luchtvermaat, zoals tweetaktmotoren, opgeladen motoren en motoren met arme verbranding. Ammoniak (NH₃) moet toegevoegd worden aan het uitlaatgas voor de reductie van NO_x. Het inspuiten van vloeibare ammoniak in de katalysator is de goedkoopste manier. Aangezien de hoeveelheid oplossing afhangt van de last van de motor, is een regelsysteem vereist om het ammoniakdebiet aan te passen.

De invloed van deze technieken op de reductie van NO_x, en op de capaciteit en het rendement van de motor wordt aangetoond in tabel 10. De verminderingen die in de tabel worden gegeven, zijn relatief; bvb een rendementsvermindering van 3% op een rendement van 33% resulteert in een absolute daling van het rendement met 1%, d.w.z. van 33% naar 32%. De resultaten worden gegeven voor verschillende motoren, die gekarakteriseerd worden door de waarde van λ : type A motoren met $\lambda=1$, type B motoren met $\lambda=1.1-1.4$, en type C motoren met $\lambda>1.4$. Alle verminderingen gelden voor normale werkingscondities van de motoren.



Figuur 9.4: De invloed van de stoechiometrische luchtverhouding (λ) op de omzetting van niet-selectieve katalytische reductie (Jennekens 1989)

8.4.1.4 SO_x -emissies

De zwavel aanwezig in de brandstof wordt in de uitlaatgassen teruggevonden als zwaveloxiden, voornamelijk als zwaveldioxide (SO_2). Als er wordt aangenomen dat alle zwavel tot SO_2 wordt verbrand, dan is de massa van de uitgestoten SO_2

$$m_{SO_2} = 2(1 - r_{SO_2})s m_f \quad (8.4)$$

Met:

m_{SO_2} : de massa van de uitgestoten SO_2 in de uitlaatgassen,

r_{SO_2} : de SO_2 absorptie factor

s : massa-inhoud van zwavel in de brandstof (vb. kg S/kg brandstof),

m_f : massa brandstofverbruik.

Voor vloeibare en gasvormige brandstoffen is $r_{SO_2} = 0$. Voor vaste brandstoffen die verbrand worden op een rooster of in een vloeibaar bed, kan het behoud van een deel van de SO_2 optreden

in het vaste materiaal. In dit geval is $r_{\text{SO}_2} > 0$. De exacte waarde van r_{SO_2} hangt af van de gebruikte apparatuur.

Bij aardgas is SO_x gewoonlijk van geen belang, omdat de zwavelinhoud van de brandstof zeer laag is.

Het is mogelijk om tot 95% van de SO_2 uit de uitlaatgassen te verwijderen door ontzwavelingstechnieken op de rookgassen toe te passen. Bij deze technieken wordt gebruik gemaakt van vb. water en kalksteen (postproces reductie). Deze technieken worden toegepast op eerder grote installaties. Voor kleinere systemen, zoals deze van kleine tot halfgrote warmtekrachtkoppelingssystemen, is het economischer om brandstoffen met een laag zwavelgehalte te gebruiken; brandstoffen met een hoog zwavelgehalte (vb. stookolie of diesel) worden chemisch behandeld in de raffinaderij zodat brandstoffen met een laag zwavelgehalte worden bekomen (preproces reductie). In het geval van vaste brandstoffen die op een rooster of een vloeibaar bed worden verbrand, is het weerhouden van SO_2 ook mogelijk door kalksteen met het brandbaar materiaal te mengen (procesreductie).

8.4.1.5 Emissie van vaste deeltjes

Partikels zijn vooral een zorg voor installaties die vaste brandstof verbranden, vb. steenkool, en voor dieselmotoren die stookolie of dieselolie verbranden (tabel 8.2). Voor het eerste worden filters of scrubbers geïnstalleerd. Goede brandstofkwaliteit en een zorgvuldige controle van de verbranding zijn voor het tweede geval de middelen om de emissie van partikels op aanvaardbare niveaus te houden.

8.4.2 Emissiebalansen

Het is nuttig om de emissie van schadelijke stoffen van een warmtekrachtkoppelingssysteem te vergelijken met deze van gescheiden productie van elektriciteit en warmte. Dit kan gebeuren met behulp van een emissiebalans voor elk gas. De balansvergelijking en bijgevolg ook het resultaat, hangt echter af van de grens van de bestudeerde regio. Bij de gescheiden productie van elektriciteit en warmte, komt de elektriciteit meestal van elektriciteitscentrales, die zich ver van de inplanting van de warmtekrachtkoppeling kunnen bevinden, terwijl warmte lokaal wordt geproduceerd door ketels. Een globale balans wordt verkregen, als alle bronnen van bezoedeling in rekening worden gebracht, waar ze zich ook mogen bevinden. Als enkel bronnen op de site worden beschouwd, dan wordt een lokale balans verkregen.

8.4.2.1 Globale emissiebalans

De balansvergelijking voor bestanddeel X wordt geschreven als

$$\Delta m_X = m_{XC} - m_{XE} - m_{XQ} \quad (8.5)$$

waarbij:

Δm_X : het massaverschil van het geëmitteerde vervuilende bestanddeel X te wijten aan warmtekrachtkoppeling; als $\Delta m_X > 0$, dan veroorzaakt de warmtekrachtkoppeling een stijging in de emissie van X,

m_{XC} : massa van het geëmitteerde bestanddeel X bij warmtekrachtkoppeling,

m_{XE} : massa van het bestanddeel X, uitgestoten door de gescheiden productie van dezelfde hoeveelheid elektriciteit, E, als deze geproduceerd door warmtekrachtkoppeling,

m_{XQ} : massa van het bestanddeel X, uitgestoten door de gescheiden productie van dezelfde hoeveelheid warmte, Q, als deze geproduceerd door warmtekrachtkoppeling.

Als emissies worden berekend, gebruik makend van data zoals deze van tabel 8.2 – 8.4, dan zijn de volgende vergelijkingen van toepassing:

$$m_{XC} = \mu_{XC} \cdot E \quad (8.6)$$

$$m_{XE} = \mu_{XE} \cdot E \quad (8.7)$$

$$m_{XQ} = \mu_{XQ} \cdot Q \quad (8.8)$$

Waarbij:

$\mu_{XC}, \mu_{XE}, \mu_{XQ}$: de specifieke emissies van het bestanddeel X (massa per nuttige energie) bij respectievelijk warmtekrachtkoppeling en gescheiden productie van elektriciteit en warmte (tabel 8.2 – tabel 8.4 of info van producenten),

E : elektrische energie geproduceerd door warmtekrachtkoppeling,

Q : nuttige thermische energie geproduceerd door warmtekrachtkoppeling.

Als gedetailleerde informatie beschikbaar is over de specifieke emissies met de gebruiksduur de eenheden of met andere werkingsparameters, dan moeten vergelijkingen (8.6) – (8.8) vervangen worden door tijdsintegralen of sommaties.

Voorbeelden van globale emissiebalansen voor zes verschillende combinaties van warmtekrachtkoppelingssystemen en systemen voor gescheiden productie van elektriciteit en warmte worden gegeven in tabel 8.5. De specifieke emissies van tabellen 8.2 – tabel 8.4 werden gebruikt. Zoals de voorbeelden aantonen, wordt een sterke reductie van CO₂-emissies bereikt: 50-100 kg per 100 kWh elektriciteit uit warmtekrachtkoppeling. Zelfs met de lagere waarde, i.e. 50 kg/100 kWh, wordt voor elke TWh (10⁹ kWh) warmtekrachtkoppeling elektriciteit, een reductie van 500000 ton CO₂-emissies bereikt. Als in de Europese Unie een stijging van de elektriciteitsproductie uit warmtekrachtkoppeling met 100 TWh per jaar wordt bereikt, hetgeen mogelijk wordt geacht, dan kunnen de jaarlijkse CO₂-emissies met 50 miljoen ton verminderd worden!

Er moet aandacht besteed worden aan het feit dat bepaalde warmtekrachtkoppelingstechnologieën, vb. dieselmotoren, kunnen resulteren in een stijging van CO, NO_x en HC-emissies. Als zo'n systeem in een gevoelig gebied wordt geïnstalleerd, dan kan het toepassen van emissiereducerende technieken noodzakelijk zijn.

Als aardgas andere brandstoffen, zoals stookolie, vervangt, dan verdwijnen de emissies van SO_x en partikels bijna volledig (een reductie met 90-99.8%).

8.4.2.2 Lokale emissiebalans

Als, in het geval van gescheiden productie, de elektriciteit zou komen van een elektriciteitscentrale ver van de site van het warmtekrachtkoppelingssysteem, dan houdt de lokale balans enkel rekening met de warmtekrachtinstallatie en de ketel voor gescheiden productie van warmte. Vergelijking (8.5) wordt vereenvoudigd tot:

$$\Delta m_X = m_{XC} - m_{XQ} \quad (8.9)$$

waarbij de symbolen dezelfde zijn als in vergelijking (8.5).

Als toepassingsvoorbeeld, werden globale en lokale emissiebalansen opgemaakt voor een warmtekrachtkoppelingssysteem met gasmotor in vergelijking met drie verschillende combinaties van systemen voor gescheiden productie van elektriciteit en warmte. Data en resultaten worden gegeven in tabel 8.6. Het belang van de grens van de regio, waarvoor de analyse is uitgevoerd, wordt verduidelijkt door de resultaten van tabel 8.7.

Tabel 8.5: Invloed van de NO_x-reductietechnieken [Jennekens, 1989].

Actie	NO _x reductie	Elektrische rendements- reductie	Capaciteit- reductie
	%	%	%
<u>Uitgestelde ontsteking</u>			
Type A, $\lambda = 1.05$	30	3	3
Type B, $\lambda = 1.25$	40	3	3
Type C, $\lambda = 1.4$	50	3	3
<u>Armere werkingen</u>			
Type A, $\lambda = 1.05$	n.v.		
Type B, $\lambda = 1.25$	50	0	5
Type C, $\lambda = 1.4$	50	2	5
<u>Verrijkte werkingen</u>			
Type A, $\lambda = 1.05$	20	1	-5
Type B, $\lambda = 1.25$	n.v.		
Type C, $\lambda = 1.4$	n.v.		
<u>EGR (max 15% to $\lambda = 1$)</u>			
Type A, $\lambda = 1.05$	30	3	10
Type B, $\lambda = 1.25$	70	6	0
Type C, $\lambda = 1.4$	n.v.		
<u>Katalytische reductie</u>			
Type A, $\lambda = 1.0$	95	1	0
Type B, $\lambda = 1.0 + \text{EGR}$	95	6	0
Type C, $\lambda = 1.0 + \text{SCR}$	85	1	0
n.v. = niet van toepassing.			

Tabel 8.6: Voorbeelden van een globale emissiebalans: vergelijking van warmtekrachtkoppeling met de gescheiden productie van elektriciteit en warmte (resultaten per 100 kWh_e)

Pollutant	Systems under comparison											
	C1 – S1		C1 – S2		C2 – S1		C2 – S2		C3 – S1		C3 – S2	
	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%
CO ₂	-51024	-46.2	-88458	-59.9	-62454	-52.0	-99888	-64.3	-70791	-46.7	-108225	-57.2
CO	+320	+524.6	+357	+1487	-33	-52.4	+4	+15.4	-68	-100.0	-31	-100.0
NO _x	+812	+255.3	+802	+244.5	-290	-85.3	-300	-85.7	-283	-68.7	-293	-69.4
HC	+375	+1875	+388	+5543	-15	-75.0	-2	-28.6	+4	+18.2	+17	+188.9
SO _x	-208	-95.9	-794	-98.9	-273	-99.3	-859	-99.8	-415	-90.0	-1001	-95.6
Particulates	-44	-91.7	-40	-90.9	-51	-91.1	-47	-90.4	-77	-91.7	-73	-91.3
<u>Cogeneration systems</u>												
C1. Dual-fuel Diesel engine (90% of energy from natural gas, 10% from Diesel oil); $\eta_e = \eta_{th} = 0.35$ (PHR = 1).												
C2. New gas turbine fueled with natural gas; $\eta_e = 0.35$, $\eta_{th} = 0.45$ (PHR = 0.778).												
C3. New steam turbine fueled with natural gas; $\eta_e = 0.25$, $\eta_{th} = 0.55$ (PHR = 0.455).												
<u>Systems for separate production of electricity and heat</u>												
S1. Gas turbine fueled with Diesel oil and industrial steam boiler with fuel oil.												
S2. New steam turbine plant fueled with coal and industrial steam boiler with fuel oil.												
Negative sign indicates reduction of emissions with cogeneration.												
Percent values are given with reference to the separate production of electricity and heat.												

Tabel 8.7 :Voorbeeld van een jaarlijkse globale en lokale emissiebalans van een warmtekracht-koppelingssysteem met een gasmotor

System specifications: Natural gas, $\dot{W} = 1000 \text{ kW}_e$, $\dot{Q} = 1300 \text{ kW}_{th}$, $\eta_e = 0.38$, $\eta_{th} = 0.494$
 Operation: 5000 h/a

Specific emissions of systems (gr/kWh of useful energy)

System	CO ₂	CO	NO _x	SO _x	HC	Particulates
Gas engine	531.7	2.5	1.7	≈0	4.5	≈0
Power plant-Lignite	1250	0.18	1.2	1.5	0.05	1.5
Power plant-Fuel oil	900	0.18	1.6	14.5	0.05	1.4
Boiler-Diesel oil (0.2%S)	323	0.06	0.25	0.37	0.02	0.03
Boiler-Natural gas	253	0.03	0.19	≈0	0.02	≈0

Global emissions balances (kg/a)

Case	Power plant	Boiler	CO ₂	CO	NO _x	SO _x	HC	Particulates
1	Lignite	Diesel oil	- 5,691,500	+ 11,210	+ 875	- 9,905	+ 22,120	- 7,695
2	Fuel oil	Diesel oil	- 3,941,500	+ 11,210	- 1,125	- 74,905	+ 22,120	- 7,195
3	Fuel oil	Natural gas	- 3,486,500	+ 11,405	- 735	- 72,500	+ 22,120	- 7,000

Local emissions balances (kg/a)

Case	Power plant	Boiler	CO ₂	CO	NO _x	SO _x	HC	Particulates
1	Lignite	Diesel oil	+ 558,500	+ 12,110	+ 6,875	- 2,405	+ 22,370	- 195
2	Fuel oil	Diesel oil	+ 558,500	+ 12,110	+ 6,875	- 2,405	+ 22,370	- 195
3	Fuel oil	Natural gas	+ 1,013,500	+ 12,305	+ 7,265	0	+ 22,370	0

8.5 Economische en sociale impact

Warmtekrachtkoppeling heeft niet enkel de aandacht getrokken omwille van de voor- of nadelige invloeden op het rendement en het milieu, maar ook omwille van de mogelijke implicaties op de economie en de politiek inzake vraag en aanbod van elektrische en thermische energie. Veel analisten zijn van mening dat, nu de globale olie- en aardgasreserves kleiner worden, er grote veranderingen moeten gebeuren in de technische, economische, en institutionele context van vraag en aanbod van energie in geïndustrialiseerde landen. Warmtekrachtkoppeling zal hierbij waarschijnlijk een rol spelen.

Daarenboven pleiten veel mensen voor het gebruik van verspreide, lokale energieopwekking. Ze doen dit niet alleen omwille van de waargenomen technische, economische, of milieuvoordelen, maar ook omwille van het geloof dat een dergelijk energiesysteem meer concurrentie zal toelaten op de energiemarkten, en dus minder afhankelijkheid zal creëren van niet alleen de technologie maar ook de macht grootschalige gecentraliseerde energieopwekking.

Warmtekrachtkoppeling kan ook voordelig zijn voor de nationale economie, tenminste als het resulteert in de vermindering van de totale kosten voor geïmporteerde brandstoffen. Bovendien kan ze ook belangrijke sociale en economische implicaties hebben in bepaalde sectoren (patronen voor “business development”). Deze worden hierna kort geschetst.

Naargelang geavanceerde warmtekrachtkoppelingstechnologieën met grotere brandstofflexibiliteit opduiken, kunnen nieuwe opportuniteiten ontstaan voor het leveren van alternatieve brandstoffen zoals gemeentelijk afval, biomassa, synthetische vloeibare en gasvormige brandstoffen. Deze kansen worden niet noodzakelijk door de bestaande nutsbedrijven gegrepen, maar door de lokale autoriteiten (gemeenten) of privé-ondernemers.

Uitbaters van een warmtekrachtkoppeling zullen meer waarschijnlijk een volledig warmtekrachtkoppelingssysteem aanschaffen van bedrijven die als tussenschakel optreden tussen producenten en kopers. Deze bedrijven zijn immers in staat een breder pakket ingepakte systemen aan te bieden dan een enkele producent. Ze zullen ook in staat zijn het systeem op maat te maken naar de specifieke behoeften van de gebruiker. Ze kunnen ook evolueren tot geheel dienstbedrijf dat ook herstellingen en onderhoud aanbiedt.

Warmtekrachtkoppelingen kunnen financiële hulp nodig hebben. Traditionele leeninstellingen zoals banken kunnen financiers worden voor dit type projecten, maar nieuwe projecten zoals Third Party Financing (TPF) bedrijven kunnen worden opgericht.

Het is gebruikelijk dat elektriciteitscentrales groot zijn van omvang en gelokaliseerd worden in afgelegen gebieden. De bouw en werking van deze installaties veroorzaakt een verhuizing van veel werkkrachten van hun thuisstad naar de plaats van de installatie. Warmtekrachtkoppelingseenheden zijn daarentegen kleiner en kunnen mogelijks dichter bij bewoonde gebieden opgetrokken worden. Hun verspreiding over vele plaatsen zorgt voor lokale werkgelegenheid. Bijgevolg blijven de werkkrachten in het gebied wonen, en de gehele activiteit die verbonden is met de bouw, werking en onderhoud van het warmtekrachtkoppelingssysteem, alsook met de mogelijkheden die mogelijk ontstaan door de beschikbaarheid van elektriciteit en warmte, draagt bij tot de economische ontwikkeling van de lokale samenleving.

Tenslotte vermelden we nog dat, wanneer een procesbedrijf (in de chemie, de staalsector, de voedingsnijverheid,...) beslist een warmtekrachtinstallatie te bouwen om zijn behoeften te dekken, dit bedrijf een beslissing neemt met een impact op lange termijn. Een bedrijf dat plant of

vreest zijn lokale activiteiten te gaan verminderen in de nabije toekomst, zal niet investeren in een kapitaalsintensieve machine als een WKK, of zal geen lange termijncontract afsluiten met een andere partij die investeert in de WKK op zijn site. De plaatsing van een WKK kan dus betekenen dat het bedrijf zich engageert om nog minstens een tiental jaar lokaal aanwezig te blijven, hetgeen een garantie betekent voor de werkgelegenheid in de regio.

9 ADMINISTRATIEVE ASPECTEN IN VERBAND MET WARMTEKRACHTKOPPELING

9.1 Vergunningen

Voor de realisatie van een WKK-installatie dienen in de meeste gevallen een aantal vergunningen aangevraagd en verkregen te worden. In Vlaanderen zijn de belangrijkste de milieu- en de bouwvergunning, maar voor grotere installaties moeten ook vergunningen aangevraagd worden voor aansluiting op het elektriciteitsnet (bij ELIA) en het gasnet (bij Fluxys), en bij elektrische vermogens groter dan 25 MW eveneens een productievergunning (bij de CREG).

Bij de milieuvergunningsaanvraag kan, zeker voor grotere installaties, ook een milieu-effectenrapport (MER) vereist zijn. Dit is zeker het geval voor installaties met een brandstofvermogen groter dan 300 MW. Ook bij een brandstofvermogen tussen 100 MW en 300 MW is dit in principe nodig, maar kan een aanvraag tot ontheffing van deze verplichting (ontheffingsnota) ingediend worden.

Hoedanook dient men met een groot aantal aspecten rekening te houden. Er zijn natuurlijk grenswaarden opgelegd voor de uitstoot van CO, NO_x, SO_x, stof,... en dit afhankelijk van de uitvoeringsvorm van de WKK-installatie en de brandstof die wordt gebruikt. Ook de eisen inzake de lozing van koelwater en de geluidsnormen zijn enkele voor de hand liggende aandachtspunten binnen de milieuvergunning. Geluidsnormen worden mede bepaald door de bestemming van de gronden op en rond de site waar men de WKK wenst in te planten. Hoewel reeds eerder werd vermeld dat motoren op zich veel geluid produceren, kan men door een goede geluidsisolerende omkasting de geluidsemisatie van de installatie sterk beperken.

Uiteraard spelen er nog veel andere zaken (brandweer en bluswater, natuurbescherming, ...) een rol. Velen daarvan zijn specifiek voor een bepaald project. We zullen hier dan ook niet in detail op ingaan. Wel is het ook belangrijk om op te merken dat een bouwvergunning en een milieuvergunning in veel gevallen aan mekaar gekoppeld zijn. Voor meer informatie omtrent de vergunningen kan men uiteraard terecht bij de vergunningverlenende instanties of bij de overheid.

9.2 Europese initiatieven met betrekking tot warmtekrachtkoppeling

Op 4 juni 1993 ontmoetten gezanten van de 23 landen³ van het Internationaal Energie Agentschap (IEA) elkaar in Parijs. In een poging om voorwaarden te creëren waarin de energiesectoren van hun economie de grootst mogelijke bijdrage kunnen leveren aan duurzame economische ontwikkeling en het welzijn van hun volk en de omgeving namen zij de volgende set van “gedeelde doelstellingen” aan [Coroyannakis, 1993]:

- Diversiteit, efficiëntie en flexibiliteit binnen de energiesector als basiscondities voor lange termijn energiewaarborg;
- De mogelijkheid om direct en flexibel te antwoorden op energie noodtoestanden;

³ Australië, Oostenrijk, België, Canada, Denemarken, Finland, Frankrijk, Duitsland, Griekenland, Ierland, Italië, Japan, Luxemburg, Nederland, Nieuw-Zeeland, Noorwegen, Portugal, Spanje, Zweden, Zwitserland, Turkije, Verenigd Koninkrijk, Verenigde Staten.

- De door het milieu te dragen voorziening en gebruik van energie;
- De nood om meer milieuvriendelijke energiebronnen aan te moedigen en te ontwikkelen;
- Verbeterde energie efficiëntie die zowel milieubescherming en energiewaarborg kan promoten op een kosteneffectieve manier;
- Voortdurend onderzoek, ontwikkeling en marktontplooiing van nieuwe en verbeterde energietechnologieën;
- Stabiele energieprijzen die markten toelaten efficiënt te werken;
- Vrije en open handel en een geborgen raamwerk voor investering die bijdragen tot efficiënte energiemarkten en energiewaarborg;
- Samenwerking tussen alle deelnemers aan de energiemarkt helpt informatie en begrip te verbeteren, en de ontwikkeling van efficiënte, milieuvriendelijke en flexibele energiesystemen en markten aan te moedigen.

Het dient opgemerkt te worden dat het streven naar meer warmtekrachtkoppeling in IEA- landen compatibel en consistent is met elk van de negen gedeelde doelstellingen. Daarnaast vermelden we ook de drie EU-doelstellingen voor het energiebeleid:

- Waarborg van levering;
- industrieel concurrentieel zijn;
- milieubescherming.

Net zoals in de gedeelde doelstellingen van de IEA, kan warmtekrachtkoppeling ook in de drie EU-doelstellingen passen. Dit wetende, is het geen verrassing dat de meeste IEA-landen (waarbij alle EU-landen horen) een beleid hebben geïntroduceerd om warmtekrachtkoppeling aan te moedigen. Het is belangrijk om van bij het begin echter vast te leggen dat de graad van aanmoediging en penetratie van WKK-systemen sterk verschilt tussen de IEA landen - en zelfs tussen EU landen zelf - omwille van een aantal redenen. Daarenboven heeft de ontwikkeling van warmtekrachtkoppeling in enkele landen in Centraal- en Oost-Europa, in het verleden plaatsgevonden onder omstandigheden die niet consistent zijn met aanvaarde principes van economische efficiëntie en energiebehoud.

Hoewel de Europese Unie een aantal doestellingen heeft geformuleerd, is energiebeleid een topic dat nog altijd sterk in handen is van de EU lidstaten. Wat zij doen heeft dan ook veel meer effect dan wat de EU doet. De EU landen hebben in het verleden een sterk verschillend energiebeleid gekozen, en dit verklaart de sterk verschillende aandelen van warmtekrachtkoppeling in de elektriciteitsproductie voor de EU-landen. Steeds meer worden echter beslissingen die een cruciale impact op de toekomstige ontwikkeling van warmtekrachtkoppeling zullen hebben, op EU-niveau genomen. We vermelden hierbij slechts enkele van deze Europese initiatieven:

- Liberalisering van de elektriciteits- en gasmarkten;
- Europees systeem van handel in emissierechten
- Richtlijn om WKK te promoten

9.2.1 Liberalisering van de elektriciteits- en gasmarkten

Na zes jaar van onderhandelingen keurden de Europese wetgevende instanties op 19 december 1996 een richtlijn (Richtlijn 96/92/EC van betreffende gemeenschappelijke regels voor de interne markt van elektriciteit) goed met als doel de elektriciteitsmarkt geleidelijk te liberaliseren. In 1998 volgde een soortgelijke richtlijn voor de aardgasmarkt (Richtlijn 98/30/EC van 22 juni 1998 betreffende gemeenschappelijke regels voor de interne markt van aardgas). Door toepassing van deze richtlijnen zouden de Europese energiemarkten in 2007 grotendeels geliberaliseerd moeten zijn.

De vooruitgang bij de implementatie van deze richtlijn is sterk verschillend in elke lidstaat. Sommige lidstaten hebben reeds vrij vroeg zeer sterk geliberaliseerd (Spanje, Duitsland, Nederland, Finland, Zweden, enz.), terwijl anderen besloten hebben om enkel maar te liberaliseren wat de richtlijnen vereisen.

De geliberaliseerde energiemarkt heeft natuurlijk een impact op warmtekrachtkoppeling. Zo wordt de financiële haalbaarheid van warmtekrachtkoppeling beïnvloed door de marktprijzen voor elektriciteit en aardgas, dewelke nu niet langer vastgelegd worden door de overheid. Bovendien zijn er door de vrije markt meerdere spelers geïnteresseerd in het bouwen van warmtekrachtinstallaties in bepaalde landen, teneinde hun productiecapaciteit in die landen te verhogen. Gezien een grote centrale een lange vergunnings- en bouwtijd heeft, kan het voor nieuwe spelers op een markt immers interessant zijn om warmtekrachtinstallaties te bouwen.

9.2.2 Richtlijn om WKK te promoten

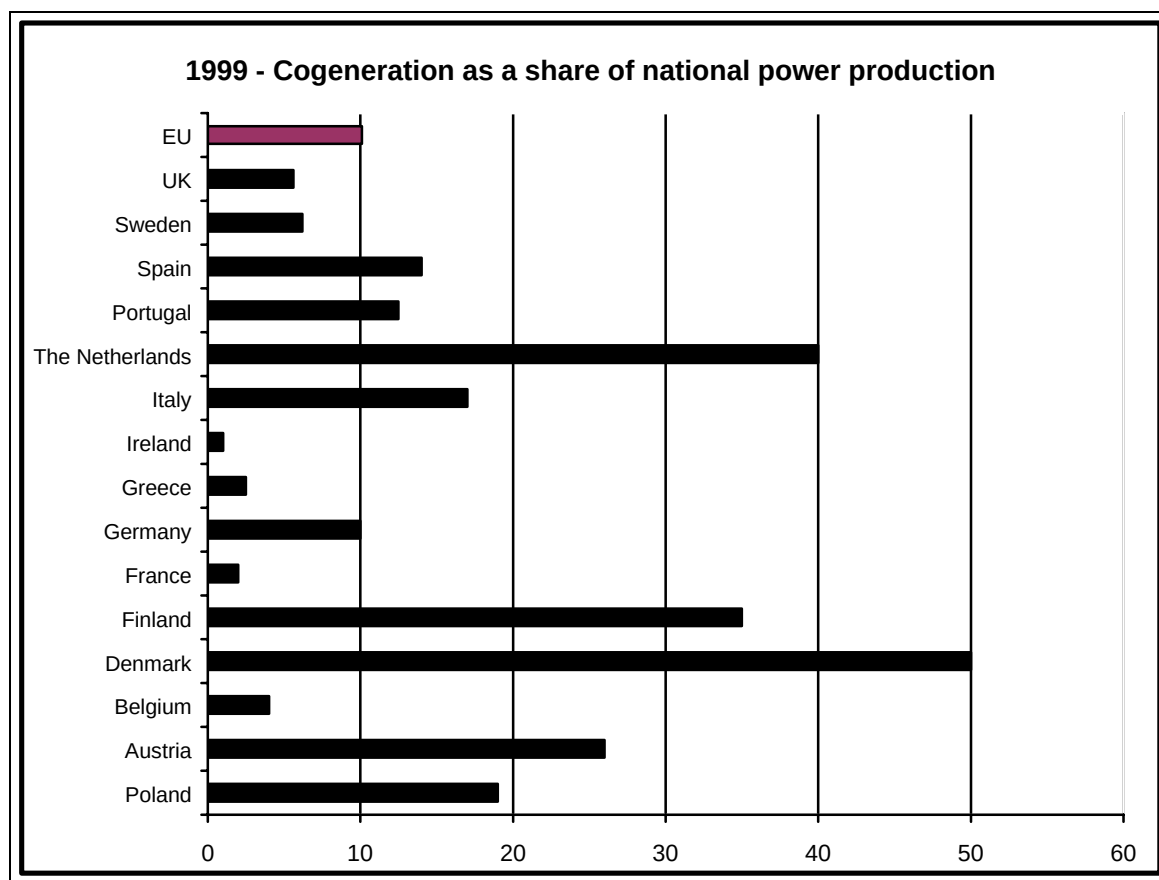
Binnen de EU bestaan beleidsdocumenten die het belang van warmtekrachtkoppeling erkennen om de verbintenissen m.b.t de klimaatverandering te bereiken en die mogelijke instrumenten vastleggen om de technologie op EU niveau te promoten. We vermelden:

- Communiqué van de Commissie omtrent een Strategie om Warmtekrachtkoppeling (Combined Heat and power (CHP)) te Promoten en de barrières tot zijn ontwikkeling te ontmantelen (COM (97) 514 finaal
- Communiqué van de Commissie omtrent een Actieplan om Energie Efficiëntie te verbeteren.
- Richtlijn 2004/8/EG van het Europees Parlement en de Raad, inzake de bevordering van warmtekrachtkoppeling op basis van de vraag naar nuttige warmte binnen de interne energiemarkt en tot wijziging van Richtlijn 92/42/EEG (publicatie 21 februari 2004).

Deze laatste richtlijn, gemakshalve de Richtlijn inzake warmtekrachtkoppeling genoemd, is het belangrijkste van de drie documenten. Deze Richtlijn schept een kader voor de ondersteuning van WKK, en wil er als dusdanig voor zorgen dat het opgesteld vermogen aan WKK in Europa toeneemt. Binnen de twee jaar na publicatie dient deze Richtlijn geïmplementeerd te worden, en omgezet te worden in nationale wetgeving. Bovendien zal door een comité van deskundigen op Europees niveau een invulling gegeven worden aan een aantal eerder technische aspecten uit de richtlijn (Committology-procedure). Dit moet leiden tot een methodologie voor het bepalen van de elektriciteit uit warmtekrachtkoppeling, de energiebesparing en het potentieel van WKK, en tot referentierendementen voor gescheiden productie. De Vlaamse wetgeving werd medio 2006 aangepast aan deze Europese richtlijn, zoals beschreven in paragraaf 7.2.2.2.1 in verband met subsidies.

Waarschijnlijk het meest interessante element is de definitie van een doel in de Strategie en de Richtlijn. Wanneer de Strategie uitkwam in 1997 was het aandeel van elektriciteit geproduceerd via cogeneratie in de EU ongeveer 9%. De Strategie stelt een doel voorop om 18% te bereiken tegen 2010, wat ook in de Richtlijn wordt vermeld. We staan nog even stil bij deze cijfers.

Figuur 9.1 toont het percentage van de elektriciteit die per lidstaat geproduceerd wordt via warmtekrachtkoppeling in 1999. Enkel de toenmalige EU-lidstaten zijn vermeld. Er moet bovendien op gewezen worden dat ondanks, de belangrijke inspanningen die door het Europees bureau voor statistiek (Eurostat) gemaakt worden om tot een gemeenschappelijke manier voor het verzamelen van de data te komen, lidstaten deze data nog altijd op verschillende manieren verzamelen, waardoor de statistieken niet altijd direct vergelijkbaar zijn. Ze kunnen echter wel gebruikt worden om een idee te krijgen van de situatie.



Figuur 9.1: Cogeneratie als aandeel van de nationale vermogenproductie in EU landen in 1999

Er moet ook op gewezen worden dat de hoeveelheden elektriciteit voorgesteld in de grafiek niet altijd de mate weerspiegelen waarin elektriciteitscentrales werkelijk werkten in WKK-mode. Bijvoorbeeld, aangezien centrales ontworpen als extractie/condensatie volledig kunnen werken in condensmode impliceert elektriciteitsoutput van zo'n centrale niet noodzakelijk dat warmte nuttig gebruikt werd. Dit is vooral het geval voor landen waar er een groot aandeel aan stadsverwarming is, waarbij de vraag voor warmte varieert met het seizoen. Nochtans houden een aantal landen hier wel rekening mee bij de berekeningen.

Ondanks de verschillen in de manier waarop de statistieken verzameld worden, wordt één ding onmiddellijk duidelijk: er is een groot diversiteit in de ontwikkeling van cogeneratie in de EU. De

hoofddreden hiervoor waren duidelijk de verschillende politieke keuzes die regeringen hebben gemaakt in energieaangelegenheden.

9.2.3 Europees systeem van handel in emissierechten

De klimaatverandering is een belangrijk aspect van de huidige milieupolitiek. De bijdrage van de belangrijkste sectoren tot de emissies van broeikasgassen in Europa (in 2001) is als volgt:

- Energie industrie (elektriciteiten raffinaderijen) : 28%
- Transport (vooral CO₂ van fossiele brandstoffen, maar tevens N₂O) : 21%
- Industrie (verbranding van fossiel brandstoffen en de procesindustrie) : 20%
- Gebouwen: Verwarming van woningen, KMO, en diensten (vooral CO₂) : 17%
- Landbouw (CH₄ en N₂O) : 10%

In december 1997, in het kader van klimaatverandering onderhandelingen in Kyoto, heeft de EU zich ertoe verbonden zijn broeikasgasuitstoot met 8% te verminderen voor de periode 2008-2010 in verhouding tot het niveau van 1990. Deze verbintenis werd dan verdeeld onder de EU lidstaten, met verschillende doelstellingen voor elke lidstaat.

De emissiedoelstellingen voor de lidstaten van de EU kennen aan elke lidstaat een bepaald quotum toe, een vaste hoeveelheid broeikasgassen die het land in kwestie gemiddeld jaarlijks mag uitstoten in de periode 2008-2012. Voor België komt dit quotum erop neer dat de emissies van broeikasgassen met 7,5% omlaag moeten in vergelijking met 1990. Indien een land een grotere emissiereductie realiseert dan wat het opgelegd kreeg, heeft het een overschot op zijn toegelaten quotum. Het Protocol laat toe dit overschot te verkopen, met name aan landen die zelf meer denken te zullen uitstoten dan wat het Protocol hen toestaat.

Men noemt een dergelijk systeem "emissiehandel" of "handel in emissierechten". Dit systeem zorgt er voor dat de inspanningen op een efficiënte, d.w.z. goedkope manier worden verdeeld. Landen die op een goedkope wijze meer kunnen doen dan wat verplicht is zullen dat ook werkelijk doen, omdat ze de overtollige emissierechten dan kunnen verkopen. Landen die zelfs met zeer grote inspanning de norm niet zouden halen, worden daardoor in staat gesteld om op een betaalbare manier toch in orde te zijn met hun verplichtingen. Het gemeenschappelijke resultaat is hetzelfde, de totale kosten zijn lager.

Vooruitlopend op de inwerkingtreding van het Protocol van Kyoto voert de Europese Unie vanaf 2005 een systeem in dat emissiehandel tussen bedrijven organiseert. De EU heeft daartoe een Richtlijn (2003/87/EG) aangenomen, als onderdeel van het Europese Programma inzake Klimaatverandering. Deze richtlijn is bedoeld om ondernemingen te helpen zo soepel en goedkoop mogelijk de emissienormen te bereiken.

Om hun doelstelling te bereiken, hebben de betreffende ondernemingen de keuze tussen investeringen die hun emissies reduceren, de aanschaf van emissierechten op de Europese markt of een combinatie van beide. Op die manier kunnen ze de kosten optimaliseren (de verhouding tussen de investeringskosten en de prijs van de emissierechten op grond van vraag en aanbod).

Het Europese CO₂-emissiehandelsysteem treedt vanaf 1 januari 2005 in werking, met een proefperiode van 3 jaar. Vooraf moet worden bepaald hoeveel emissierechten elke installatie die CO₂-uitstoot initieel krijgt. Ook bestaat de mogelijkheid om bepaalde installaties tijdelijk uit te

sluiten van het systeem. De Lidstaten moeten daartoe een Nationaal toewijzingsplan voorleggen aan de Europese Commissie.

In het federale België spelen zowel de Federale Overheid als de Gewesten een rol in de opmaak van het Belgische Nationale Toewijzingsplan. De 3 Gewesten zijn bevoegd voor de meeste installaties in België. Voor één specifiek type van installaties, met name de veiligheids- en hulpinstallaties bij kerncentrales, is de Federale Overheid bevoegd.

Elke installatie die CO₂ uitstoot, krijgt in het Nationaal Toewijzingsplan voor emissierechten een aantal emissierechten toegewezen voor de betrokken periode. In eerste instantie is dit de periode 2005-2007, en daarna volgen vijfjaarlijkse periodes (2008-2012, 2013-2017,...). De toewijzing (allocatie) moet voor elke periode door de Europese Commissie worden goedgekeurd.

Warmtekrachtkoppeling is algemeen erkend – zowel op het niveau van de EU als van de lidstaten – als een technologie die een belangrijke bijdrage kan leveren om deze doelstellingen te bereiken. De Europese Commissie schat dat het invoeren van de richtlijn met betrekking tot warmtekrachtkoppeling in Europa zou leiden tot een reductie in de emissies van 65 miljoen ton CO₂-equivalent of 20% van de totale emissiereductie (336 miljoen ton) nodig om de 8% reductie in emissies te halen. Dit biedt een enorme mogelijkheid voor de technologie, zolang de erkenning omgezet wordt in de praktijk bij het vastleggen van het beleid tot een aanmoedigend gebruik ervan. Dit kan al dan niet gebeuren via een gunstige behandeling van warmtekrachtkoppeling in het systeem van handel in emissierechten.

In Vlaanderen heeft men er voor gekozen om warmtekrachtkoppeling genoeg emissierechten toe te kennen, maar het niet te belonen met een overschot. De echte stimulans voor warmtekrachtkoppeling gebeurt via andere systemen, zoals de warmtekrachtcertificaten (zie elders). Wel dienen de vergunningshouders van de warmtekrachtinstallaties mee te doen aan het systeem van handel in emissierechten, en de nodige formaliteiten te vervullen.

10 UITBREIDINGEN OP HET KLASSIEKE CONCEPT VAN WARMTEKRACHTKOPPELING

Hoewel reeds hier en daar kort aangehaald in de vorige hoofdstukken, kan het nuttig zijn enkele uitbreidingen op het klassieke concept van warmtekrachtkoppeling wat meer in detail te bekijken. Daarom wordt in dit hoofdstuk even stilgestaan bij trigeneratie, of dus de productie van zowel elektriciteit, warmte als koude, en bij warmtekrachtkoppeling vertrekkend van hernieuwbare energiebronnen. Beiden worden niet algemeen behandeld, maar bekeken in hun specifieke Vlaamse context.

10.1 Trigeneratie en absorptiekoeling

Traditioneel verstaat men onder “warmtekrachtkoppeling” de gecombineerde productie van warmte en elektriciteit. Hiertoe maakt men meestal gebruik van motoren en turbines. De geproduceerde warmte wordt dan hoofdzakelijk aangewend onder de vorm van warm water of stoom. Maar, de warmte kan ook gedeeltelijk of volledig gebruikt worden in koelmachines. We hebben het dan echter niet over de traditionele koelmachines met een zuiger-, schroef- of centrifugaalcompressor, maar over de zogenaamde absorptiekoelmachines. Deze techniek is in Vlaanderen nog vrij onbekend, en wordt, mede door de nog hoge kostprijs, slechts in zeer beperkte mate toegepast. Recente ontwikkelingen maken het gebruik van absorptiekoeling in combinatie met WKK echter een stuk eenvoudiger.

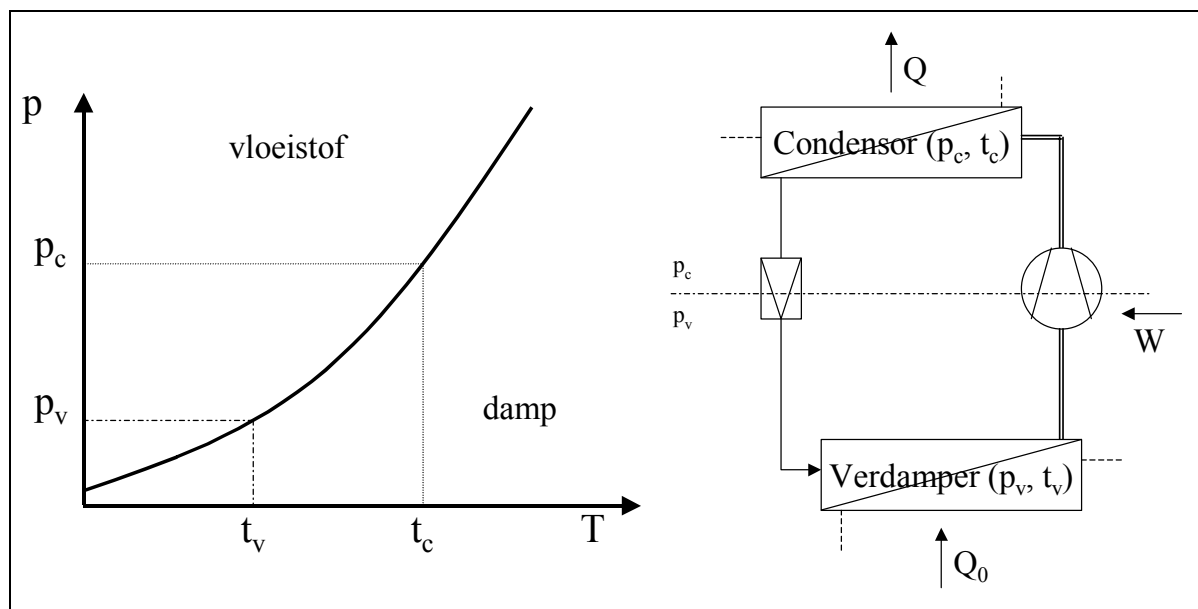
10.1.1 Algemeen werkingsprincipe van een koelmachine met dampen.

Wanneer een vloeistof verdampt, neemt deze een aanzienlijke hoeveelheid warmte op uit de omgeving. Dit is precies wat wordt toegepast in de verdamper van een koelmachine. Daar heerst een lage druk p_v , waardoor de koelstof bij een lage temperatuur kan verdampen. Precies dit verdampen zorgt ervoor dat warmte wordt onttrokken aan een ruimte, of dus dat koude wordt geproduceerd. De koelstofdamp wordt daarna, in een klassieke koelmachine althans, door een compressor aangezogen en op hogere druk p_c gebracht. Bij deze hogere druk (en hogere temperatuur) wordt de koelstof weer vloeibaar gemaakt in een condensor. Hierbij wordt warmte vrijgesteld naar de omgeving. De vloeibare koelstof wordt vervolgens weer naar het lagere druk- en temperatuurniveau geëxpandeerd, waardoor ze opnieuw kan verdampen in de verdamper.

De hiervoor beschreven cyclus van een koelstof, is dus gebaseerd op het gegeven dat de verdampingstemperatuur van een vloeistof stijgt wanneer de druk van de vloeistof stijgt. Dit verband wordt weergegeven door de dampspanningskromme. Deze is stofspectief, hetgeen impliceert dat een koelstof zal moeten gekozen worden in functie van de koude temperatuur die men wenst te bereiken. Figuur 10.1 toont een dampspanningscurve en de bijhorende koelcyclus. Q_0 is de hoeveelheid warmte die wordt onttrokken aan de koelruimte, en is dus eigenlijk de “koude” die geproduceerd wordt. Aan de compressor wordt een hoeveelheid arbeid W geleverd, en door de verdamper wordt een hoeveelheid warmte Q aan de omgeving afgestaan. De wet van energiebehoud geeft dan: $Q = Q_0 + W$.

De verhouding tussen de geleverde koude (Q_0) en de benodigde mechanische arbeid (W), meestal geleverd door een elektrische motor, noemt men de COP (coefficient of performance). Dit is een maat voor de prestatie van de koelmachine. Momenteel liggen de courante waarden voor de COP tussen 3 en 6, afhankelijk van het temperatuurverschil tussen verdamper en condensor en in

mindere mate ook van het type compressor en koelmiddel. Bijvoorbeeld, machines met watergekoelde condensor die gebruikt worden voor invriezen, hebben een groter temperatuurverschil tussen verdamper en condensor, en dus een lagere COP. Hoe lager de COP, hoe minder koude wordt geproduceerd uitgaande van een gegeven hoeveelheid mechanische arbeid of elektriciteit.



Figuur 10.1: Dampspanningscurve (links) en schematische voorstelling van een koelcyclus (rechts)

10.1.2 Werkingsprincipe van een absorptiekoelmachine

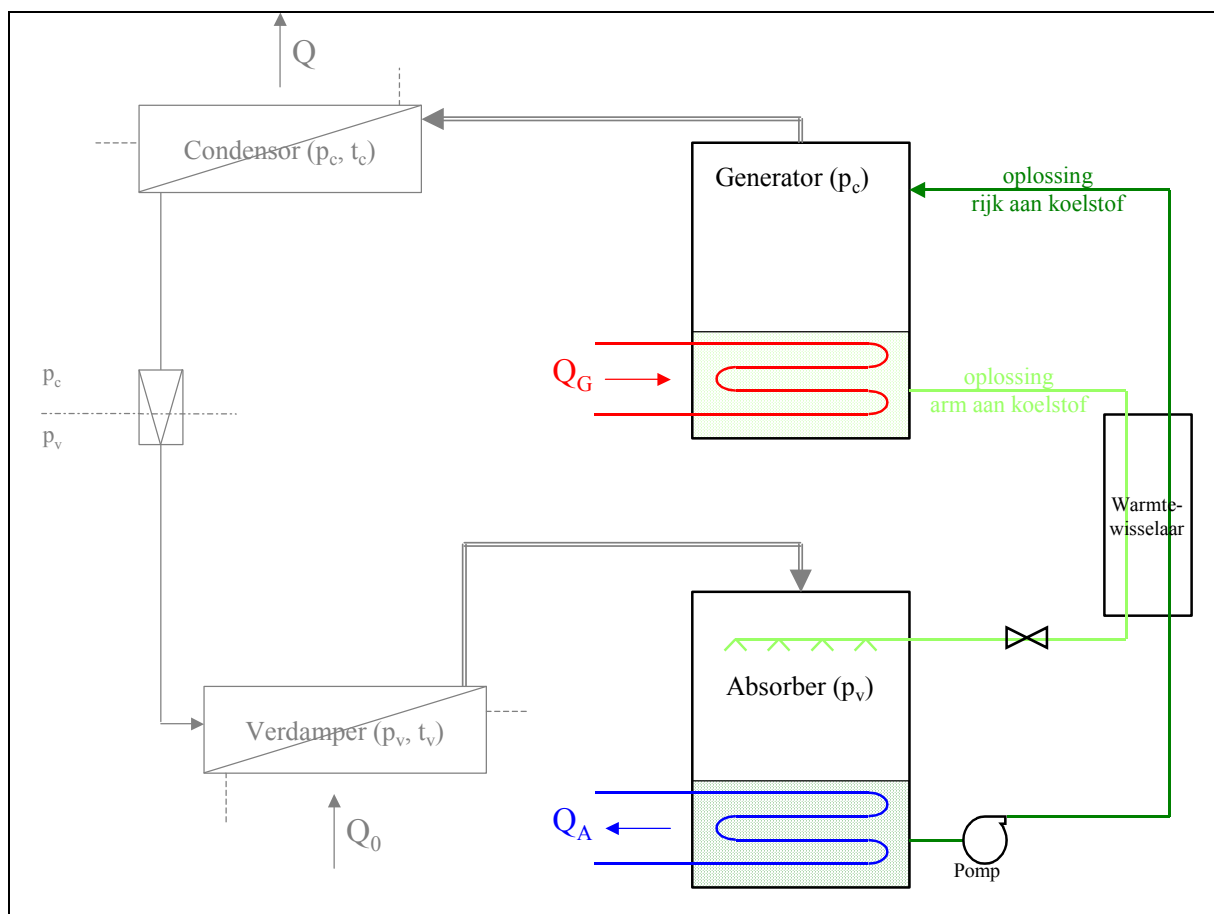
Een absorptiekoelmachine heeft een kringloop die voor een groot deel analoog is aan de hierboven besproken kringloop. Men maakt immers eveneens gebruik van een verdamper en een condensor, maar er is geen compressor aanwezig. In plaats daarvan vinden we een combinatie van een absorber (waar de koelstofdamp absorbeert in een vloeistof), een pomp, een generator (waar koelstofdamp uit de vloeistof wordt verdreven) en een warmtewisselaar. Bij het absorberen van de damp in de vloeistof komt warmte vrij, maar voor het verbreken van de absorptie is dan weer warmte nodig. Daarom zegt men soms ook wel dat de absorptiekoelmachine met een “thermische compressor” werkt.

Het ontbreken van een zuiger-, turbo- of schroefcompressor biedt een aantal voordelen. Dit is in een klassieke compressorkoelmachine immers het onderdeel dat het meest aan slijtage onderhevig is, en het meest nazicht vereist. In plaats daarvan komen nu een aantal statische apparaten en een pomp, die minder delicaat is en minder nazicht vereist dan een compressor. Bovendien is de pomparbeid per kilogram koelstof kleiner dan de compressorarbeid. Hoewel bij de absorptiekoelmachine ook het absorptiemiddel mee moet verpompt worden, blijkt toch dat uiteindelijk het pompvermogen beduidend kleiner is dan het compressorvermogen.

De werking van de machine steunt op het principe dat de absorbeerbaarheid van een damp in een vloeistof een dalende functie is van de temperatuur. In de verdamper verdampt een koelstof bij een lage temperatuur en een lage druk. Deze lage druk wordt verkregen doordat het absorptiemiddel in de absorber een sterke aantrekkingskracht uitoefent op de gevormde damp, en deze dus aanzuigt en absorbeert. Bij deze absorptie komt warmte vrij, en deze wordt met behulp

van koelwater afgevoerd, zodat de temperatuur in de absorber constant blijft. De oplossing wordt door de absorptie rijker aan koelstof. De aangerijkte oplossing wordt vervolgens door de pomp naar de generator gebracht. Doordat warmte wordt toegevoegd aan de generator, heerst daar een hogere temperatuur dan in de absorber. Dit betekent dat een deel van de geabsorbeerde koelstof opnieuw verdampt. De damp gaat dan, doorgaans via een vloeistofafscheider, naar de condensor. De arme oplossing wordt van de generator terug naar de absorber gebracht, waar ze opnieuw koelstof absorbeert.

Om de warmtetoevoer naar de generator en het koelwaterverbruik van de absorber zo laag mogelijk te houden, voorziet men meestal een warmtewisselaar, waarin de arme oplossing afkoelt en de rijke opwarmt. Daarnaast wordt meestal ook een ontspanningskraan voorzien in de leiding met de arme oplossing, gezien de generator op een hogere druk (condensordruk) staat dan de absorber. Figuur 10.2 illustreert schematisch de opbouw van de machine.



Figuur 10.2: Schema absorptiekoelmachine

Op een vrijwel analoge manier als bij compressorkoelmachines definieert men de COP of koudefactor, als de verhouding van de geproduceerde koude Q_0 tot de toegevoerde warmte in de generator Q_G . De koudefactor geeft dus aan hoeveel kJ kan onttrokken worden aan de koelruimte, bij toevoegen van 1 kJ arbeid (bij de compressorkoelmachine) of 1 kJ warmte (bij de absorptiekoelmachine). Ook bij absorptiekoelmachines is deze afhankelijk van de temperaturen in condensor en verdamper, van het koelmiddel en van het temperatuurniveau van de toegevoerde warmte. Courante waarden liggen tussen 0,5 en 1,2. Voor dezelfde condensor- en

verdampertemperaturen bekomt men met een compressorkoelmachine een koudefactor die ongeveer 5 keer hoger ligt dan bij een absorptiekoelmachine. Echter, 1 kJ arbeid is een stuk duurder dan 1 kJ warmte. Dat brengt de prijs van 1 kJ koude, of dus warmte onttrokken op lage temperatuur, voor de beide machines op ongeveer hetzelfde niveau.

Door het koelwater dient in de condensor, en bij een absorptiekoelmachine ook in de absorber, een hoeveelheid warmte afgevoerd te worden. Deze hoeveelheid is gelijk aan de som van het koeffect Q_0 en de aan de compressor toegevoerde arbeid W of de aan de generator toegevoerde warmte Q_G . Zoals hierboven uiteengezet, is Q_G ongeveer 5 keer groter dan W , zodat de hoeveelheid warmte die door het koelwater moet afgevoerd worden bij een absorptiekoelmachine ongeveer 3 keer groter is dan bij een compressorkoelmachine. Dit is een belangrijk aandachtspunt! Men zal dan ook de parameters (temperatuurstoename van het koelwater, logaritmisch temperatuursverschil in de condensor,...) oordeelkundig moeten kiezen om de koelwaterkosten binnen redelijke grenzen te houden en de condensoroppervlakte te beperken.

10.1.3 Gebruik van absorptiekoelmachines

In een absorptiekoelmachine is de koelstof meestal water. Water verdampt onder atmosferische omstandigheden bij 100°C , en vereist dus een sterk verlaagde druk om te verdampen bij lage temperatuur. Een koelmachine met water als koelstof zal dus onder vacuum moeten werken om verdamping mogelijk te maken.

Door gebruik te maken van een absorbent kan de vereiste lage druk gerealiseerd worden. Dit absorbent is in dit geval een stof die het vermogen in zich heeft om water aan te trekken als de waterdampdruk boven een bepaalde waarde stijgt, bijvoorbeeld een zout. Als illustratie kunnen we een zoutstrooier beschouwen. Indien deze in een vochtige omgeving wordt geplaatst, neemt het zout vocht op, waardoor het zout niet meer strooibaar zal zijn. In de absorptiekoelmachines met water als koelstof gebruikt men een oplossing van het zout lithiumbromide (LiBr) in water. Een zoutoplossing is immers makkelijker te verpompen, en dit bevordert de werking van de machine.

De absorptiekoelmachine met water en lithiumbromide is echter beperkt in toepassingsgebied. Temperaturen lager dan $4,5^\circ\text{C}$ zijn niet te realiseren. Dit maakt dat dergelijke machines wel geschikt zijn voor airconditioningsystemen en koudwatertoepassingen in de industrie, maar niet voor invriezen, voor koelcellen of ijswatersystemen. Toch kan men ook voor deze toepassingen absorptiekoelmachines gebruiken, maar dan wel met ammoniak (NH_3) als koelstof en water of calciumchloride als absorbent.

De warmtetoevoer naar de generator van een absorptiekoelmachine kan op verschillende manieren gebeuren. Figuur 2 toont een indirect gestookte installatie, waarbij de warmte wordt toegevoerd onder de vorm van CV-water, heet water (120 tot 140°C), stoom of hete uitlaatgassen van een gasturbine of een oven. Anderzijds kan ook een direct gestookte generator voorkomen, met een gas- of oliebrander. Het spreekt voor zich dat in trigeneratietoepassingen (zie verder) steeds sprake is van een indirect gestookte machine.

Machines met lithiumbromide hebben in Azië reeds een groot aandeel in de totale koelmachinemarkt. De grootste fabrikanten van absorptiekoelmachines zijn dan ook in dit werelddeel te vinden, en niet in Europa of Amerika. Bovendien vindt in Azië heel veel technologische ontwikkeling plaats op gebied van absorptiekoeling. Deze richten zich onder meer op een verbetering van het rendement, een meer compacte bouw, een betere besturing en

een combinatie van koeling en verwarming in één toestel. Bovendien vergemakkelijken de nieuw ontwikkelde machines het benutten van afvalwarmte uit de industrie of restwarmte van een WKK voor de productie van koude.

Toch zijn ook de evoluties bij direct gestookte, en meer bepaald gasgestookte, absorptiekoelmachines aanzienlijk, vooral op gebied van energiegebruik. In Japan worden installaties ontwikkeld die een COP halen tot 1,5. Bovendien worden machines geïntroduceerd die kunnen omschakelen van functie tussen koelmachine en verwarmingsketel. Dat men in Japan veel aandacht besteedt aan het verfijnen van de absorptiekoeltechniek hoeft eigenlijk weinig verwondering te wekken. De elektriciteit is er immers beperkt beschikbaar, en het net is zwaar belast.

De geschetste ontwikkelingen komen natuurlijk stilaan ook richting Europa, en bieden mogelijks perspectieven voor een groei van de markt van absorptiekoeling in onze streken. De sterk verbeterde prestaties dwingen er ons immers toe om de effecten op het milieu en de economische haalbaarheid van absorptiekoelmachines te herbekijken.

10.1.4 Absorptiekoelmachines in combinatie met WKK: trigeneratie

Absorptiekoeling wordt vooral interessant waar grote hoeveelheden goedkope warmte beschikbaar zijn, bijvoorbeeld onder de vorm van afgewerkte stoom of warm water. Het kan daarbij gaan over afvalwarmte uit de industrie of restwarmte van een warmtekrachtkoppeling. Door gebruik te maken van goedkope warmtestromen, wordt de prijs per geproduceerde kJ koude vergelijkbaar met of zelfs kleiner dan bij een compressorkoelmachine.

Indien we het over toepassingen bij warmtekrachtkoppeling hebben, moeten we niet alleen vanuit de positie van de koelmachine kijken, maar ook eens vanuit WKK-oogpunt. Een warmtekrachtkoppelingsinstallatie, in dit geval meestal een motor, produceert immers warmte en elektriciteit. Met het oog op een zo groot mogelijke beperking van het energiegebruik en de uitstoot van schadelijke stoffen, wordt de WKK meestal op de warmtevraag gedimensioneerd. Wanneer de warmtevraag in bepaalde periodes echter beperkt is, hetgeen zeker voorkomt bij installaties voor gebouwenverwarming, stelt zich een probleem: de WKK draait dan niet, en produceert derhalve ook geen elektriciteit.

Door trigeneratie toe te passen, kan men tijdens de zomerperiode de WKK toch laten draaien, en de geproduceerde warmte in de absorptiekoelmachine gebruiken om koude te produceren. Op deze manier kan men de gebouwen koelen, en haalt de WKK een hoger aantal draaiuren en dus ook een grotere jaarlijkse elektriciteitsproductie.

Gebouwenverwarming is een typisch voorbeeld van een toepassing waar soms een hoge warmtevraag is, en op andere momenten een grote koudevraag. Maar ook voor toepassingen waar permanent een behoefte aan zowel warmte als koude heerst, kan een absorptiekoelmachine gebruikt worden. Voorbeelden hiervan vinden we in slachthuizen, in de farmaceutische industrie of de voedingsnijverheid. Meestal is de koude nodig in koelruimtes voor opslag van producten, en de warmte in het productieproces of voor de verwarming van de werkruimtes.

Toch is trigeneratie een slechts beperkt toegepaste techniek. Absorptiekoelmachines waren tot hiertoe immers vooral geschikt voor het gebruik van stoom of heet water, op ongeveer 120 à 140°C. Wanneer warmtebronnen op lagere temperaturen werden gebruikt, stelde men een sterke afname van het vermogen en een moeizamer regelgedrag vast. Toepassingen in trigeneratie-units,

met het koelwater van een gasmotor (90°C) als warmtebron in de generator, waren dan ook minder aangewezen. Door recente ontwikkelingen wordt, zoals hoger reeds vermeld, het gebruik van warmtebronnen op lagere temperatuur vergemakkelijkt. Het combineren van een absorptiekoelmachine en een warmtekrachtkoppelingsinstallatie wordt op deze manier een stuk interessanter.

Een voorbeeld van een dergelijke toepassing vinden we in het Provinciehuis van het Nederlandse Assen. De restwarmte van een standaard WKK met een elektrisch vermogen van 165 kW wordt als warmtebron gebruikt voor een speciale koelmachine, die specifiek voor de combinatie met WKK op basis van gasmotoren of microturbines werd ontwikkeld. Het warme water gaat op 90°C naar de generator van de koelmachine, en keert op 80°C terug naar de WKK. Dit was namelijk de ontwerptemperatuur van de WKK, die reeds een aantal jaren voor de absorptiekoelmachine werd geplaatst. De koelmachine levert koud water op 6°C, en krijgt dit water terug op 12°C. Het aldus gerealiseerde koelvermogen bedraagt 180 kW.

10.1.5 Milieuvoordelen

Dat een goed gedimensioneerde WKK een primaire-energiebesparing oplevert wanneer warmte en elektriciteit worden geproduceerd, hoeft geen betoog meer. We bekijken dit hierna ook voor een trigeneratie-unit.

We beschouwen een gasmotor, met een operationeel elektrisch rendement van 36%, en een operationeel thermisch rendement van 45%. Veronderstellen we dat 40% van de geproduceerde warmte gebruikt wordt in de absorptiekoelmachine, en dat deze een COP heeft van 0,7. Uitgaande van 100 eenheden brandstof levert dit ons dan 36 eenheden elektriciteit, 27 eenheden warmte en 13 eenheden koude op.

Voor de alternatieve, gescheiden opwekking gaan we uit van een centrale met elektrisch rendement van 50%, een ketel met thermisch rendement van 90% en een compressorkoelmachine met COP 3,5. Om dezelfde hoeveelheden elektriciteit, warmte, en koude te produceren als hiervoor vermeld, hebben we dan $72 + 30 + 7 = 109$ eenheden brandstof nodig. De trigeneratie-unit levert voor dit geval dus een relatieve primaire energiebesparing op van 9%.

Uiteraard verschilt dit resultaat naargelang de gebruikte referentierendementen en de verdeling tussen warmte- en koudeproductie. Bovendien is het verloop van de energievraag specifiek voor elk bedrijf, en moet de energiebesparing van een trigeneratie-unit geval per geval bekeken worden. Ook indien de absorptiekoelmachine niet in een trigeneratie-opstelling wordt gebruikt, kan een aanzienlijke besparing op het energiegebruik bekomen worden als afvalwarmte gebruikt wordt, of een brandbaar gas dat anders afgefakkeld dient te worden.

Gekoppeld aan de primaire energiebesparing, kunnen we ook de uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen vermelden. Net als een warmtekrachtkoppelingsinstallatie op zich, zal ook een trigeneratie-unit een reductie van de CO₂-emissies realiseren ten opzichte van de gebruikelijke werkwijze om dezelfde hoeveelheden koude, warmte en elektriciteit te produceren.

Een bijkomend milieuvoordeel van de absorptiekoelmachines is de onschadelijkheid van de koelstof. Vroeger was dit een zeer belangrijk argument. De ontwikkeling van minder schadelijke koelstoffen voor compressorkoelmachines en het verbod op het gebruik van stoffen zoals freon,

verzwakken dit argument enigszins. Desalniettemin blijft het natuurlijk zo dat de in absorptiekoelmachines gebruikte koelstoffen onschadelijk zijn voor het milieu.

10.1.6 Besluit

Door de recente ontwikkelingen is het een stuk interessanter geworden om de restwarmte van een gasmotor te gebruiken in absorptiekoelmachines. Warmtebronnen op een relatief lage temperatuur, zoals het koelwater van gasmotoren, brachten vroeger heel wat problemen met zich mee. Recent heeft men echter machines ontwikkeld die ook hiermee zeer goed overweg kunnen, waardoor de combinatie gasmotor-absorptiekoelmachine ook bij variërende bedrijfsomstandigheden stabiel kan functioneren.

Trigeneratie, of de gecombineerde productie van elektriciteit, warmte en koude, biedt aanzienlijke milieuvoordelen ten opzichte van de conventionele productiewijze, waarbij voor de koudeproductie een compressorkoelmachine wordt gebruikt. Daarbij hoort ook de energiebesparing die men met een dergelijke installatie kan realiseren.

Het bijplaatsen van een absorptiekoelmachine kan, zeker bij gebouwenverwarming, de rendabiliteit van een warmtekrachtkoppelingsinstallatie verbeteren. Het complementair zijn van warmte- en koudevraag leidt immers tot een hoger aantal draaiuren. Toch wordt de economische rendabiliteit van trigeneratie-units momenteel beperkt door de hoge investeringskost van absorptiemachines. Een frequentere toepassing ervan zou de prijs naar beneden kunnen halen.

10.2 Warmtekrachtkoppeling met hernieuwbare energiebronnen

Dat goede warmtekrachtkoppeling, ten opzichte van de conventionele, gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit, primaire energie bespaart en emissies kan reduceren, hoeft geen betoog meer. Toch gebruikt een klassieke WKK nog steeds fossiele brandstoffen, en worden dus nog steeds broeikasgassen uitgestoten. Men kan de WKK dus niet op één lijn zetten met windmolens of zonnepanelen. Deze laatsten maken immers elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen. Het is echter ook mogelijk om een WKK te laten werken met hernieuwbare energiebronnen. Hierbij denken we dan niet zozeer aan wind of zonlicht, maar vooral aan biogas, biodiesel, bio-olie, hout, afval, mest, ... Het gebruik van deze brandstoffen in een WKK levert een dubbel voordeel op inzake emissiereductie en energiebesparing: niet alleen wordt een zogenaamd 'groene' brandstof gebruikt, maar bovendien wordt deze op een zeer efficiënte manier aangewend via het principe van warmtekrachtkoppeling.

10.2.1 Allerlei biogassen

Wanneer men over groene brandstoffen in WKK-toepassingen spreekt, denkt men bijna automatisch aan biogas. Er bestaan inderdaad diverse manieren waarop gasvormige bio-brandstoffen kunnen worden bekomen. Enkele hiervan worden hierna verder toegelicht. Bovendien kunnen deze brandstoffen worden aangewend in een gasmotor, een zeer gekende technologie die in verschillende vermogensgroottes op de markt te vinden is. Eventueel kan ook een dual-fuel motor gebruikt worden, een soort dieselmotor waarbij de brandstof voor 5 tot 20% bestaat uit diesel en voor de rest uit (bio)gas. Recent diende zich echter ook een interessant alternatief aan voor de motor, met name de microturbine, het kleine broertje van de reeds veelvuldig toegepaste gasturbine. Microturbines werken bij een grote luchtovermaat (wat wil

zeggen dat zij veel meer lucht aanzuigen dan nodig voor de verbranding), wat hen een stuk flexibeler maakt op het gebied van brandstofsamenstelling. Ze kunnen verschillende brandstoffen aan, en ook schommelingen in de calorische waarde van de brandstof stellen geen problemen. Mede hierdoor zijn ze dan ook uitstekend geschikt voor de verbranding van bijvoorbeeld laagcalorisch biogas en stortgas.

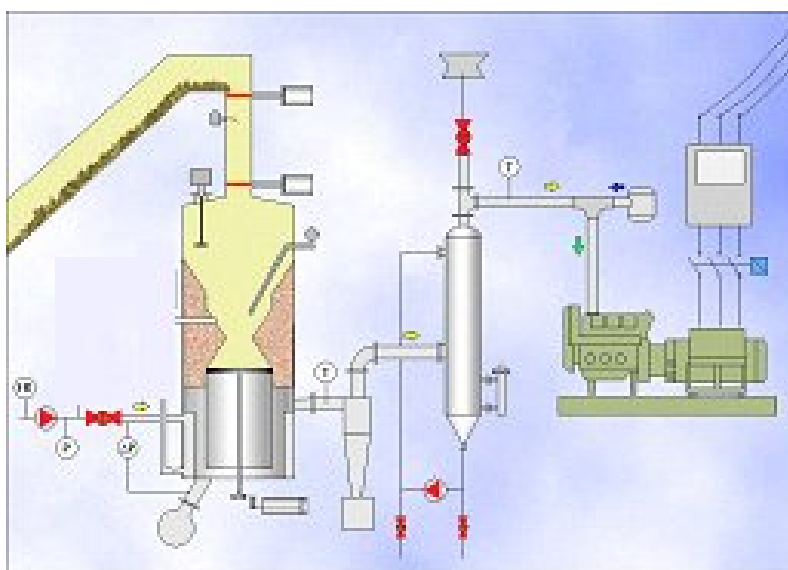
10.2.1.1 Vergassing

Vergassing is een thermochemische conversie van biomassa naar biogas. Essentieel hierbij is dat de luchttoevoer tot het proces gecontroleerd verloopt, zodat steeds onvoldoende lucht aanwezig is om een volledige verbranding mogelijk te maken. Er treedt bij vergassing dus een gedeeltelijke oxidatie van de koolstof uit de biomassa op. Het resultaat is een syngas, bestaande uit CO, H₂ en N₂, en in mindere mate ook CO₂ en CH₄. De assen die ontstaan bij het proces, kunnen gerecycleerd worden, bijvoorbeeld als kunstmeststof in de landbouw wegens het hoge N-gehalte.

In Wallonië zijn al enkele houtvergassingsinstallaties operationeel. Het feit dat het potentieel aan hout als biobrandstof in Wallonië vrij hoog ligt, zal hieraan wel niet vreemd zijn. Toch zijn er ook toepassingsmogelijkheden voor een dergelijke technologie in Vlaanderen. De werking van een dergelijke installatie wordt hieronder kort toegelicht.

Om biogas te bekomen, kan het hout (onder verschillende vormen: boompjes, planken, schors, zagemeel) gedroogd worden en vervolgens naar een verticale vast-bedreactor gebracht worden. Daar wordt ook een hoeveelheid lucht toegevoerd, onvoldoende voor een volledige verbranding van het hout. Via verschillende chemische processen (pyrolyse, oxidatie en reductie) wordt een gas geproduceerd uit het hout. De belangrijkste bestanddelen van dit gas zijn H₂ en CO, en de onderste stookwaarde van het gas ligt tussen 4.5 en 5.8 MJ/m³. Na de vergassing is een gasreiniging nodig, omdat het gas nog een zekere fractie partikels en teren bevat, die problemen zouden kunnen opleveren bij verbranding.

Vervolgens wordt het biogas verbrand in een gasmotor om elektriciteit en warmte te produceren. De warmte is hierbij niet alleen afkomstig uit de hete rookgassen, maar ook van de koeling van het motorblok en eventueel ook van de turbokoeler.



Figuur 10.3: Schema houtvergassingsinstallatie met WKK (Bron: Xylowatt sa, <http://www.xylowatt.com>)

10.2.1.2 Vergisting

Veruit de bekendste techniek voor het produceren van biogas is de anaërobe vergisting. Als basis voor de vergisting kunnen verschillende producten aangewend worden, bijvoorbeeld organische afvalstoffen uit de voedingsindustrie, rioolwaterzuiveringsslib, planten of mest.

Vooraleer deze producten in de vergister gebracht worden, worden meestal een aantal voorbehandelingen uitgevoerd, met als doel de vergistingssnelheid te verhogen, het rendement van de vergisting te verbeteren en vervuiling tot een minimum te beperken. Het kan bijvoorbeeld gaan om het verwijderen van toxische stoffen of om hygiënisatie (pasteurisatie, sterilisatie) van de inputstromen.

De vergisting zelf gebeurt vervolgens bij temperaturen in de orde van 35 tot 40°C (mesofiel) of 50 tot 55°C (thermofiel). Door toedoen van steeds verschillende bacteriën worden de organische stoffen via opeenvolgende transformaties omgezet, tot uiteindelijk methaan en koolstofdioxide worden gevormd. Gedurende deze transformaties wordt de complexe materiaalstructuur van de ingebrachte organische stoffen (vetten, proteïnen, koolhydraten) omgevormd tot minder en minder complexe structuren (vluchtige organische zuren, alcoholen en vervolgens acetaten). Het uiteindelijk gevormde biogas bestaat voor 55 tot 75% uit methaan en voorts overwegend uit CO₂, met enkele sporen van H₂S, water,... De energie-inhoud (onderste stookwaarde) situeert zich klassiek tussen 20 en 25 MJ/m³.

Vergisting van rioolwaterzuiveringsslib en organische afvalstoffen uit de (voedings-)industrie wordt in Vlaanderen reeds toegepast. Meer dan de helft van alle warmtekrachtkoppelingsinstallaties op 'groene' brandstof in Vlaanderen zijn van dit type (toestand op 1 januari 2004). Het gaat hierbij om een opgesteld elektrisch vermogen van ongeveer 4.5 MW, overeenkomend met een thermisch vermogen rond 6 MW.

Mestvergisting daarentegen blijft in Vlaanderen een zorgenkind, temeer omdat door de mestoverschotten in Vlaanderen er een verplichting bestaat om verwerkte mest uit te voeren. In landen waar deze verplichting niet bestaat, zien we dergelijke installaties wel veelvuldig gerealiseerd worden. Nemen we als voorbeeld een installatie in het Luxemburgse Redange. In deze installatie wordt vloeibare en vaste mest samen met maïs vergist, en wordt het biogas aangewend in een gasmotor (met een elektrisch vermogen van 500 kW) en twee dual-fuelmotoren (met een elektrisch vermogen van elk 100 kW). De geproduceerde elektriciteit wordt op het net geplaatst, en de warmte wordt gebruikt voor het op temperatuur houden van de vergisters en voor de verwarming van een sportcentrum en zwembad in de buurt. De vergisting gebeurt in drie voordigesters en drie nadigesters. De voordigesters werken onder mesofiele omstandigheden (30-38°C), de nadigesters onder thermofiele omstandigheden (50-55°C). Door de combinatie van de twee types wordt de vergisting geoptimaliseerd. Er wordt bewust gebruik gemaakt van meerdere vergisters. Indien men slechts één vergister zou hebben, en er doet zich een probleem voor, dan moet men de vergister leegmaken en opnieuw vanaf nul heropstarten. In deze configuratie, waarbij kan verpompt worden tussen de verschillende vergisters, is dit niet het geval, en is een meer continue werking mogelijk.

De mest is afkomstig van 29 boerderijen uit de buurt, waarvan de meeste rundveebedrijven zijn. Door het bijmengen van maïs, en in de toekomst mogelijk ook organisch afval, verbetert de vergisting en kan bovendien een constante biogasproductie bekomen worden. Het digestaat, het restproduct van de vergisting, wordt uitgereden op de akkers van de betrokken boerderijen. Het digestaat heeft immers een hoog stikstofgehalte. Door de vergisting is de stikstof bovendien in

het digestaat aanwezig onder ammoniumvorm en niet onder de schadelijkere ammoniakvorm. Bovendien wordt het digestaat beter door de plant opgenomen dan onbehandelde mest, en is het reukloos.

Vergelijkbare, maar kleinere installaties zijn ook te vinden in Duitsland en zelfs in de Oostkantons. Meestal, gaat het niet om een vergisting van enkel mest, maar worden ook andere producten toegevoegd, zoals energieteelten, groenvoer of organisch afval. Een dergelijke covergisting is in veel gevallen noodzakelijk om het project rendabel te maken. Toch blijken ook subsidies (certificaten, vaste vergoedingen per kWh groene stroom, investeringssubsidies,...) essentieel voor het welslagen van een dergelijk project.

In Vlaanderen is het uitrijden van het digestaat niet toegelaten, en kan een installatie zoals hierboven beschreven dus niet geplaatst worden. Om hieraan een oplossing te bieden, is het nodig te voorzien in een behandeling van het digestaat. Op deze manier moet mestvergisting in de toekomst ook in Vlaanderen realiseerbaar worden.

Een mogelijke oplossing hiervoor wordt hierna beschreven, hoewel er ook andere oplossingen zijn. In eerste instantie zal het digestaat gescheiden worden in een dikke fractie en een dunne fractie. Voorts wordt de dikke fractie verder gedroogd met behulp van de warmte van de warmtekrachtkoppeling. Vervolgens wordt de gedroogde dikke fractie gepelletiseerd en bekomt men organische mestkorrels die worden uitgevoerd naar het buitenland. De dunne fractie wordt op haar beurt verwerkt tot losbaar water en een concentraat, dat terug bij de dikke fractie wordt gevoegd.

10.2.1.3 Stortgas

In stortplaatsen voor huishoudelijk en industrieel afval, bevindt zich doorgaans een aanzienlijke fractie organisch-biologische stoffen. Door rottings- en vergistingsreacties kunnen deze stoffen ook omgezet worden in een biogas, met hoog methaangehalte. Dit gas is in zekere zin vergelijkbaar met het gas uit vergistingsinstallaties.

Naast biogas uit vergisting van rioolwaterzuiveringsslib en industrieel organisch afval, is stortgas vrijwel de enige andere biogasstroom voor WKK in Vlaanderen. Het opgesteld elektrisch vermogen besloeg op 1 januari 2004 ongeveer 4 MW.

10.2.2 Vloeibare en vaste brandstoffen

Warmtekrachtinstallaties kunnen niet enkel werken op biogas, maar ook op vloeibare en vaste bio-brandstoffen. Vaste brandstoffen worden doorgaans direct verbrand, en worden daarom eerder gebruikt voor warmteproductie. Met behulp van stoomturbines kan echter ook aan elektriciteitsproductie en aan warmtekrachtkoppeling gedaan worden. De hoogwaardige warmte die vrijkomt bij de verbranding van de biomassa wordt dan omgezet in stoom, en deze stoom wordt ontspannen over een turbine. Hierbij krijgt de turbine een draaiende beweging, die via een alternator in elektriciteit kan worden omgezet. Om te kunnen spreken van WKK dient de stoom na het verlaten van de turbine nog nuttig gebruikt te worden om een warmtevraag in te vullen (tegendrukstoomturbine), of dient een deel van de stoom afgetapt te worden uit de turbine om eveneens nuttig aangewend te worden, terwijl de rest van de stoom enkel voor elektriciteitsopwekking wordt gebruikt (aftapcondensatiestoomturbine).

Bij de vloeibare bio-brandstoffen denken we in eerste instantie aan bio-olie en biodiesel. Bio-olie is een plantaardige olie, bijvoorbeeld olie die wordt geperst uit koolzaad. Deze kan rechtstreeks

gebruikt worden in licht omgebouwde dieselmotoren. Voor bio-diesel kunnen dezelfde plantaardige oliën als basis gebruikt worden, maar bijvoorbeeld ook gebruikte frituurolie of dierlijke vetten. Na toevoeging van methanol kunnen deze stoffen door transesterificatie omgezet worden in bio-diesel en glycerine. De bio-diesel bevat lichtere componenten dan de originele oliën en vetten, en kan eveneens gebruikt worden als brandstof in een dieselmotor.

De dieselmotor kan verder ook als WKK gebruikt worden. Ten opzichte van een gasmotor heeft hij een hoger elektrisch rendement. Net als bij de gasmotor wordt echter ook warmte vrijgesteld in de rookgassen en via de motorblokkenkoeling en de turbokoeler (indien aanwezig). Het thermisch rendement ligt echter in de meeste gevallen wel ietwat lager dan bij de gasmotor. Doordat diesels ook gebruikt worden voor transporttoepassingen en als noodgeneratoren, zijn zij bovendien op de markt beschikbaar in diverse types en vermogensgroottes, tegen redelijke prijs.

Toch bestaat er ook een vloeibare bio-brandstof voor benzinemotoren, namelijk bio-ethanol. Deze minder bekende brandstof wordt meestal gemaakt uit organische stoffen als suikerbieten, suikerriet, graan, maïs,... Andere stoffen zoals stro, groenafval en papierafval zijn ook mogelijk, maar moeilijker. Met behulp van enzymen worden uit deze stoffen suikers gehaald, die vervolgens door vergisting en distillatie worden omgezet in ethanol en CO₂. Deze kan rechtstreeks als brandstof gebruikt worden in een aangepaste motor, of verder bewerkt worden tot een brandstof die geschikt is voor klassieke benzinemotoren, zonder aanpassing.

10.2.3 Goede prestaties beloond?

Met behulp van de groenestroomcertificaten moedigt de Vlaamse Overheid reeds een drietal jaar de elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen aan. Zoals in de inleiding al vermeld, is het vanuit energetisch oogpunt zeer interessant om zich niet te beperken tot zuivere elektriciteitsproductie, maar warmtekrachtkoppeling te overwegen, tenminste indien er een lokale warmtevraag is. Daarom bestaat de mogelijkheid om hiervoor een extra financieel steuntje te krijgen via het systeem van warmtekrachtcertificaten. De wetgeving voorziet immers dat een warmtekrachtinstallatie met biobrandstof zowel groenestroomcertificaten als warmtekrachtcertificaten kan bekomen. Bovendien gelden soepelere regels voor het bekomen van warmtekrachtcertificaten indien hernieuwbare energiebronnen worden gebruikt, zoals hierboven reeds toegelicht.

REFERENTIES

- ASHRAE (1992), “*ASHRAE Handbook, HVAC systems and Equipment*,” Chapter 7: “*Cogeneration systems*,” American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA.
- Beghi (1982), “*Thermal Energy Storage*,” Lectures of a Course Held at the Joint Research Centre, Ispra, Italy, June 1-5, 1981, Kluwer Academic Publishers Group.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M. (1996), “*Thermal Design and Optimisation*,” J. Wiley & Sons, Inc., New York.
- BELCOGEN (2004), “*Handboek warmtekrachtkoppeling - Addendum 2004*,” Energik, Mechelen.
- Belding, J. A. (1982), “Cogeneration,” in “*Industrial Energy Conservation – Manual 15*,” E. P. Gyftopoulos, ed., The MIT Press, Cambridge, Ma.
- Beltran, J. L., and Martinez, G. C. (1992), “*A Review of Cogeneration Equipment and Selected Installations in Europe*,” Institut Valencia de l'Energia – OPET, For the Commission of the European Communities, Valencia, Spain, September.
- Blomen, L. J. M. J., and Mugerva, M. N. (1993), “*Fuel Cell Systems*,” Plenum Press, New York.
- CADDET (1993), CADDET Analysis Series No. 9, “*Learning from Experiences with Gas-Turbine-Based CHP in Industry*,” Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, Sittard, Netherlands.
- Cerri, G., Evans, R., Frangopoulos, C. A., Parrella, M., Pitt, R. U., Psychogios, J., Salvador, S., Sepielli, M., Seyedan, B. (2000), “Optimum Management System with Environmental Monitoring,” Paper 2000-GT-310, *International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition*, ASME, Munich, Germany, May 8-11.
- CHPA (1992), “*CHP Powering the Future*,” Conference and exhibition, Combined Heat and Power Association, Stratford upon Avon, 30–31 March.
- Cogen Europe et al. (2002), “*EDUCOGEN. An educational tool on cogeneration*”, Cogen Europe, Brussels.
- Cogen Vlaanderen (2004), “*Wegwijzer 2004*”, Cogen Vlaanderen, Leuven.
- Coroyannakis, P. (1993), “Rules, Regulation, Financing Schemes and Obstacles to the Development of Cogeneration in OECD Countries,” *Cogeneration of Heat and Power – The Way Forward*, Athens, Greece, 3-5 November, Greek Productivity Center, pp. 41-57.
- Drenckhan, W., Lezuio, A., and Reiter, K. (1990), “Technical and Economic Aspects of Using Fuel Cells in Combined Heat and Power (CHP) Cogeneration Plants,” Siemens Power Generation, *VGB Conference*, Essen, 20 September.
- EEO (1992), “Remote Monitoring of Second Generation Small-Scale CHP Units,” *Best Practice Programme*, New-Practice-Report, Energy Efficiency Office, Department of Energy, London, February.
- EEO (1993), “A Technical and Economic Assessment of Small Stirling Engines for Combined Heat and Power”, Future Practice Report No. 32, *Best Practice Programme*, Energy Efficiency Office, Department of the Environment, London, January.

- EPRI (1981), "Forecasting In-Plant Electricity Generation in the Industrial Sector, 1980-2000", Research Project 942-1 Final Report, Palo Alto, Ca., December.
- EPRI, (1988), "*COGENMASTER – A model for Evaluating Cogeneration Options*," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- ERA (1998), "*A Guide to Cogeneration/CHP and On-Site Generation*," issue 2, Report prepared by C. L. Escombe, G. C. Smith and F. M. Escombe, ERA Technology Ltd., Leatherhead, Surrey, UK, January.
- ETSU (1992), Good Practice Guide 43, "*Introduction to Large-Scale Combined Heat and Power*," Energy Technology Support Unit, Harwell, UK.
- Everett, R., and Andrews, D. C. (1986), "*An Introduction to Domestic Micro-C.H.P.*", Open University, Milton Keynes, England, September.
- Floudas, C. A. (1995), "*Nonlinear and Mixed-Integer Optimization – Fundamentals and Applications*," Oxford University Press, New York.
- Frangopoulos, C. A. (1991a), "Intelligent Functional Approach: A Method for Analysis and Optimal Synthesis-Design-Operation of Complex Systems," *International Journal of Energy•Environment•Economics*, Vol. 1, No. 4, 267-274.
- Frangopoulos, C. A. (1991b), "Optimization of Synthesis-Design-Operation of a Cogeneration System by the Intelligent Functional Approach," *International Journal of Energy•Environment•Economics*, Vol. 1, No. 4, 275-287.
- Frangopoulos, C. A., and Monanteras, N. C. (1997), "Performance Evaluation of a Fuel-Cell based Plant producing its own Fuel by Solar Energy," *International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems, TAIES '97* (Cai, Ruixian et al., eds.), Beijing, China, June 10-13, pp. 573-581.
- Frangopoulos, C. A., ed. (1993), "*Cogeneration of Heat and Power – The Way Forward*," Proceedings of a European Conference, Athens, 3-5 November, Greek Productivity Centre.
- Frangopoulos, C. A., Karidoyannis, E. P., and Caralis, Y. C. (1994), "*Cogeneration of Heat and Power*," Greek Productivity Centre, Athens (in Greek).
- Frangopoulos, C. A., Lygeros, A. I., Markou, C. T., and Kaloritis, P. (1996), "Thermoeconomic Operation Optimization of the Hellenic Aspropyrgos Refinery Combined-Cycle Cogeneration System," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 949-958.
- Frank A Woodbury, "Grounding considerations in Cogeneration", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-21 No. 6, Nov 1985.
- Garg, H. P., Bhargava, A. K., and Mullick, S. C. (1985) "*Solar Thermal Energy Storage*," Kluwer Academic Publishers Group.
- Goran Strbac, Jenkins N., "Calculation of Cost and Benefits to the Distribution Network of Embedded Generation", Colloquium: Economics of Embedded Generation, 29 Oct. 1998.
- Griffiths, R. (1995), "*Combined Heat and Power: A Practical Guide to the Evaluation, Development, Implementation and Operation of Cogeneration Schemes*," Energy Publications.
- Horlock, J. H. (1997), "*Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP)*," Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

- IEA (1988), “*Workshop on the Regulatory and Institutional Aspects of Combined Heat and Power Production and District Heating*,” International Energy Agency, Copenhagen, June 15-17.
- IEA (1993), “Cogeneration Policies in IEA Countries”, Appendix A in *Cogeneration of Heat and Power – The Way Forward*, Athens, Greece, 3-5 November, Greek Productivity Centre, pp 491-551.
- IME (1986), “*Technical and Economic Impact of Cogeneration*,” Institution of Mechanical Engineers, London.
- JENBACHER Energie, “*Cogeneration with Gas Engines*,” Technical brochure.
- Jenkins N, et al., “Embedded Generation”, IEE, ISBN 0 85296 774 8, 2000.
- Jennekens, M. (1989), “*Learning from Experiences with Small-Scale Cogeneration*,” Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADET), Den Haag.
- Kordesch, K., and Simader, G. (1996), “*Fuel Cells and Their Applications*,” VCH, Weinheim.
- Kotas, T. J. (1995), “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- Lane, N. W., and Beale, W. T. (1996), “Stirling Engines for Gas fired Micro-Cogen and Cooling,” in *Strategic Gas Forum*, Detroit, Michigan, 19-20 June.
- Ljubomir Kojovic, “World roundup: Solving Grounding”, *Electrical World*, January/February 2001, pp 28-30.
- Lovin, G. H. (1987), “Cogeneration,” *J. of District Heating and Cooling*, Vol. 72, No. 3, 1st Quarter.
- Manolas, D. A., Frangopoulos, C. A., Gialamas, T. P., and Tsahalis, D. T. (1997), “Operation Optimization of an Industrial Cogeneration System by a Genetic Algorithm,” *Energy Conversion & Management*, Vol. 38, No. 15-17, pp. 1625-1636.
- Mertens, D. (2003), “Trigeneratie en absorptiekoeling”, *Cogen Vlaanderen Nieuwsbrief*, Jg. 3, No. 2, pp. 4-8.
- Mertens, D. (2004), “Nieuwe technologieën voor kleinschalige warmtekrachtkoppeling”, *Kluwer Milieutechnologie*, Vol. 11, No. 8, pp 4-8.
- Mertens, D. (2004), “Groene energie uit warmtekrachtkoppeling” *Kluwer Milieutechnologie*, Vol. 11, No. 9, pp 1-4.
- Mertens, D. (2004), “Trigeneratie en absorptiekoeling”, *Kluwer Milieutechnologie*, Vol. 11 No. 11, pp 2-6.
- Mertens, D. (2004), “Hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling”, *Cogen Vlaanderen Nieuwsbrief*, Jg. 4, No. 4, pp. 3-7.
- Mertens, D., De Paepe M., Stroobandt, A., D’haeseleer W. (2005), “The economics of cogeneration in a liberalised energy market”, PowerGen Europe Conference, Milan, Italy, 28-30 June.
- Mertens, D., De Paepe M., D’haeseleer W., Stroobandt, A. (2005), “Cogeneration in a liberalised energy market: evaluation of different plant types”, HEFAT2005 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid mechanics and Thermodynamics, Cairo, Egypt, 19-22 September.
- Mitchell, R. L. (1980), “*Engineering Economics*,” J. Wiley & Sons, Chichester.

- Monanteras, N. C, and Frangopoulos, C. A. (1999), "Towards Synthesis Optimization of a Fuel-Cell based Plant," *Energy Conversion & Management*, Vol. 40, pp. 1733-1742.
- Orlando, J. A. (1996), "*Cogeneration Design Guide*," ASHRAE, Atlanta, Ga.
- OTA (1983), "*Industrial and Commercial Cogeneration*," U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Peters, M. S., and Timmerhaus, K. D. (1980), "*Plant Design and Economics for Chemical Engineers*," 3rd ed., McGraw – Hill Book Co., New York.
- Prengle, H. W., Hunt, J. C., Mauk, C. E., and Sun, E. (1980), "Solar Energy with Chemical Storage for Cogeneration of Electric Power and Heat," *Solar Energy*, Vol. 24, pp 373-384.
- PROSMACO, interim report (2000), "Promotion of Small Scale Cogeneration in rural areas", co-ordination Giraud D.
- Reklaitis, G. V., Ravindran, A., and Ragsdell, K. M. (1983), "*Engineering Optimization – Methods and Applications*," J. Willey & Sons, New York.
- SES (1993), "*The SES Stirling Engine Programme*," Sustainable Engine Systems Ltd., London January.
- Sirchis, J., ed., (1990), "*Combined Production of Heat and Power (Cogeneration)*," Commission of the European Communities, Elsevier Science Publishers, London.
- Thermal Energy Storage (1984), Springer-Verlag, Vienna.
- Thuesen, G. J., and Fabrycky, W. J. (1984), "*Engineering Economy*," 6th ed., Prentice – Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Urieli, I., and Berchowitz, D. M. (1984), "*Stirling Cycle Engine Analysis*," Adam Hilger Ltd., Bristol.

Copyright © 2006 – COGEN Vlaanderen vzw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze publicatie mag worden gereproduceerd, opgeslagen in de computer, overgenomen onder gelijk welke vorm (elektronisch, mechanisch, magnetisch) of gefotokopieerd zonder de schriftelijke toelating van COGEN Vlaanderen vzw, Zwarte Zustersstraat 16/9, 3000 Leuven.

Elke auteur is verantwoordelijk voor de inhoud van zijn/haar teksten. COGEN Vlaanderen vzw wijst alle aansprakelijkheid af wanneer gebeurlijke foutieve gegevens zouden leiden tot discussies of geschillen.