

50361503-KPS/TCM 04-2086




**Haalbaarheid brandstofcelgebaseerde
warmte-krachtinstallaties bij belichte teel-
ten in de glastuinbouw**

Case-studies 'MCFC' en 'SOFC-GT'

Arnhem, 20 juli 2004

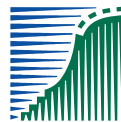
Auteur J.A.F. de Ruijter
KEMA Power Generation and Sustainables

In opdracht van Productschap Tuinbouw en Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

auteur : J.A.F. de Ruijter		04-07-20	beoordeeld : R.J.F. van Gerwen		04-07-22
B 114 blz.	6 bijl.	JAR	goedgekeurd : K.J. Braber		04-07-23

50361503-KPS/TCM 04-2086

Dit rapport is mede mogelijk gemaakt door subsidieverlening door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het kader van het Onderzoeksprogramma Energie (PT-projectnummer 11289).



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**

© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens KEMA Nederland B.V. is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

INHOUD

	blz.
Management Samenvatting	6
1 Inleiding	18
1.1 Achtergrond	18
1.2 Probleemstelling	19
1.3 Aanpak.....	20
1.4 Leeswijzer.....	21
2 Uitgangspunten.....	22
2.1 Teelt en teelttechnische uitgangspunten	22
2.2 Energiesysteemtechnische uitgangspunten	22
2.3 Bedrijfseconomische uitgangspunten	25
3 Jaarrondanalyse	30
3.1 Vraagpatronen	30
3.2 Systemconfiguraties	32
3.3 Inzetstrategieën	37
3.4 Verbruiksberendingen.....	40
3.5 Resultaten energieberendingen.....	40
3.5.1 Belichtingsniveau 45 We/m ² (ca 4880 lux)	40
3.5.2 Andere belichtingsniveaus 45-90 We/m ² (ca 4880 - 9760 lux).....	45
4 Bedrijfseconomische berekeningen.....	51
4.1 Investerings en toekomstig verwachte investeringen	51
4.2 Kasstromen.....	56
4.3 Rentabiliteit	63
4.3.1 Rentabiliteitskentallen.....	63
4.3.2 Berekening rentabiliteit	64
4.4 Gevoeligheidsanalyse / risico	69
4.5 Rentabiliteit bij andere belichtingsniveaus.....	76
4.6 Rentabiliteit bij ander aantal belichtingsuren	82
5 Conclusies en aanbevelingen.....	83
5.1 Conclusies	83
5.2 Aanbevelingen	89

Literatuur	90
Bijlage A Eigenschappen kas	91
Bijlage B Klimaatreferentiejaar.....	92
Bijlage C Bedrijfsvoering met belast↔hot-stand-by-overgangen	95
Bijlage D Details inzetberekeningen	96
Bijlage E Resultaten energieberekeningen bij verschillende belichtingsniveaus.....	103
Bijlage F Cijfers rentabiliteit bij verschillende belichtingsniveaus	112

Lijst met gebruikte afkortingen

BC	= brandstofcel
BCWK	= brandstofcel gebaseerde warmtekrachtinstallatie
GM	= gasmotor
IRR	= interne rendementsgraad (engels: internal rate of return)
JBDK	= jaarbelastingduurkromme
NCW	= netto-contante-waarde
MCFC	= molten carbonate fuel cell (gesmolten carbonaat brandstofcel)
m ³	= kubieke meter (bij gassen gaat het om 'normaal kuubs', dat wil zeggen om het volume dat het gas inneemt (of zou innemen) bij een gastemperatuur van 0°C en een absolute gasdruk van 1.01325 bar, tenzij anders vermeld)
m ³ _{ae}	= kubieke meter aardgas-equivalent
RGR	= rookgasreiniger
SOFC	= solid oxide fuel cell (vast-oxide brandstof cell)
SOFC-GT	= vast-oxide brandstofcel gecombineerd met (micro) gasturbine
TVT	= terugverdiëntijd
VRJ	= verkort referentie jaar (NEN 5060)
VTVT	= verbeterde terugverdiëntijd
WK	= warmtekrachtinstallatie

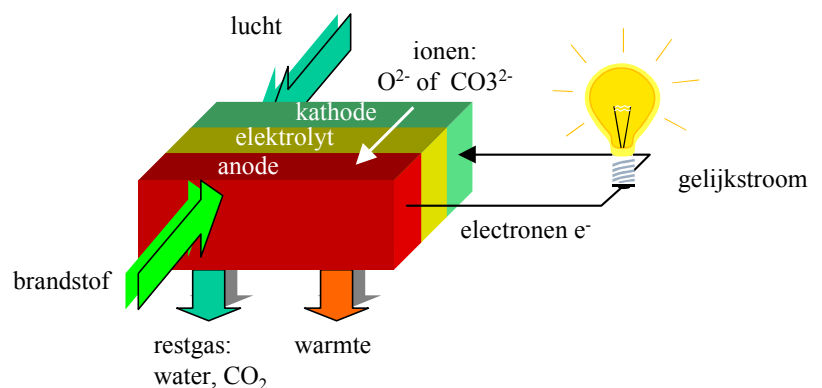
Opmerking: in dit rapport is de internationaal gangbare cijfernotatie gebruikt met een decimale punt in plaats van de in Nederland gebruikelijke komma. Bij grote getallen zijn voor de leesbaarheid duizendtallen, waar dat qua automatische getalopmaak mogelijk was, middels een spatie gescheiden van honderdtallen, bijvoorbeeld "500 000" in plaats van "500000".

Samenvatting

MANAGEMENT SAMENVATTING

Belichte teelten (circa 21% van het glastuinbouwareaal in 2001 [1]) hebben een hoog elektriciteitsverbruik: gemiddeld ca $39 \text{ W}_e/\text{m}^2$ in 2001, met een stijgende tendens. Bij de tegenwoordig gangbare belichtingsniveaus van 8000 à 10000 lux is zelfs 70 à 90 W_e/m^2 nodig. Veelal wordt de benodigde elektriciteit opgewekt met behulp van een (eigen) gasmotor (GM). Deze GMs hebben een – relatief laag - elektrisch rendement van tussen de 30 en 42% (op onderwaarde). De warmte die bij de elektriciteitsopwekking vrijkomt, kan zeker bij hoge belichtingsniveau's maar ten dele gebruikt worden. De rest (vaak meer dan 40%) gaat zonder nuttige toepassing verloren. Een nadeel van gasmotoren is dat de rookgassen niet zonder meer voor bemesting kunnen worden gebruikt, vanwege de te hoge NO_x - en etheenconcentraties. Hiervoor is een dure rookgasreiniger nodig, die ureum verbruikt. Bij niet goed functioneren van deze kritische installatie bestaat het gevaar voor ernstige gewasschade.

Brandstofcellen (BC's) zijn veelbelovende energieconversiesystemen, waarbij brandstof in een soort continue batterij direct in elektriciteit wordt omgezet¹ (zie principeschema in figuur S.1). Hierdoor zijn bij brandstofcellensystemen veel hogere (elektriciteits)conversierendementen mogelijk dan bij conventionele warmtekrachtinstallaties (in theorie tot ca 80%). Behalve elektriciteit produceren brandstofcellen ook warmte en (bij gebruikmaking van bijvoorbeeld aardgas, LPG of dieselolie als brandstof) CO_2 . Omdat bij bepaalde typen brandstofcellen (zie kader) het aandeel elektriciteit hoger en het aandeel warmte (veel) kleiner is dan bij een gasmotor, zal bij toepassing van een BC-gebaseerde warmtekrachtinstallatie (BCWK) voor belichte teelten op jaarbasis veel minder warmte vernietigd hoeven te worden en is er minder primaire energie nodig. Een belangrijk bijkomend voordeel is dat de rookgassen van een BC-



Figuur S.1 Principeschema van een brandstofcellensysteem. Een brandstofcel is een soort continue batterij, waaraan voortdurend brandstof (en lucht) worden toegevoerd en waaruit de 'uitgeputte' restgassen worden afgevoerd. In de praktijk worden meerdere brandstofcellen gestapeld (tot een zogenaamde 'stack') en elektrisch in serie geschakeld om een hogere spanning te krijgen. Bij koppeling aan het net wordt de gelijkspanning eerst omgevormd tot een wisselspanning.

¹ Direct betekent hier zonder de tussenstap van een zogenaamde 'thermische cyclus' die qua omzettingsrendement naar boven begrensd wordt door het zogenaamde Carnotrendement.

Samenvatting

systeem zeer weinig NO_x en andere schadelijke stoffen (<1 ppm in het rookgas) bevatten, waardoor deze direct - zonder rookgasreiniging - bruikbaar zijn voor CO₂-bemesting [2].

Brandstofcellen passen verder bijzonder goed in de door de sector beoogde transitietrajecten naar een duurzame energievoorziening (PT, 2002) daar ze prima in staat zijn duurzame energie te leveren (op basis van bijvoorbeeld biobrandstoffen of duurzaam geproduceerde waterstof). De te verwachten brandstofflexibiliteit van brandstofcellen maakt deze systemen in principe ook geschikt om flexibel in te spelen op actuele brandstofprijzen en specifieke kenmerken van tariefsystemen (bijvoorbeeld limiteren van gascontractcapaciteit in verband met hoge kosten voor weinig gebruikte piekcapaciteit).

In het eerste deel van deze studie² zijn twee brandstofceltechnologieën geïdentificeerd als geschikte kandidaten voor de glastuinbouw. Het betreft:

- gesmolten carbonaatbrandstofcellen (MCFC = molten carbonate fuel cell)
- vast-oxide brandstofcellen gecombineerd met een micro-gasturbine (SOFC-GT = solid oxide fuel cell – gas turbine)

Systemen op basis van *gesmolten carbonaatbrandstofcellen* (engels: molten carbonate fuel cells, afgekort MCFC) produceren elektriciteit met een elektrisch (wisselstroom)systeemrendement van 46 à 50%. Daarnaast kan uit de hete 'afgassen' van het MCFC-systeem (circa 400 °C) warmte worden teruggewonnen, waarmee heet water (of desgewenst stoom) kan worden geproduceerd (circa 40% van het vermogen). De afgassen zijn zo schoon, dat ze (na koeling) direct voor CO₂-dosering kunnen worden gebruikt.

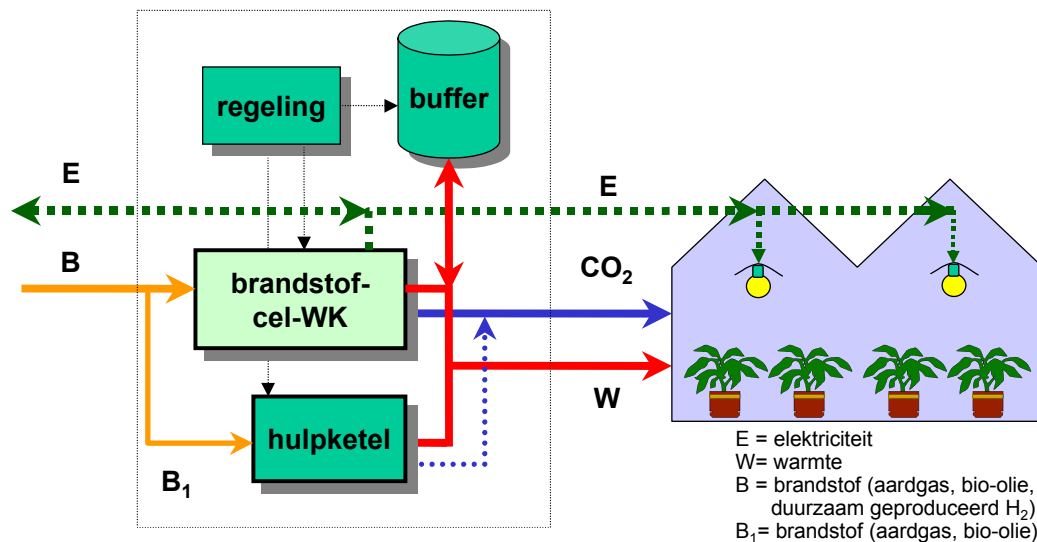
SOFC-brandstofcellen (solid oxide fuel cells) werken op een hogere temperatuur dan MCFC (circa 1000 °C). De afgassen zijn zo heet, dat ze bruikbaar zijn als 'aandrijfmedium' in de expansietrap van een gasturbine die zelf weer een generator aandrijft. Door de combinatie van brandstofcel-elektriciteitsproductie en gasturbine-elektriciteitsproductie is het totale elektrische systeemrendement extra hoog. 55% is al gerealiseerd. In de toekomst worden rendementen tot circa 70% verwacht. Daarnaast kan ca 35 à 20% warmte worden geproduceerd.

In dit rapport is aan de hand van 'case-studies' voor belichte teelten nagegaan, wat de energetische prestatie is van MCFC- respectievelijk SOFC-GT-gebaseerde warmtekrachtsystemen (met aardgas als brandstof) in vergelijking met conventionele, gasmotorgebaseerde WK-systemen. Figuur S.2 toont het principeschema van zo'n BCWK-systeem. De energetische prestatie is uitgedrukt in een besparing op het primaire-energieverbruik en in een reductie van de CO₂-uitstoot. Tevens is een bedrijfseconomische analyse gemaakt van het fi-

² Het eerste deel van de studie waarin de status van de brandstofceltechnologie en de mogelijkheden voor de glastuinbouw zijn beschreven, is apart gerapporteerd in "Brandstofcellen in de glastuinbouw: status en mogelijkheden", R.J.F. van Gerwen, KEMA, rapportnummer 50361503-KPS/SEN 03-3008, 2004.

Samenvatting

nanciële perspectief van de twee typen BCWK's, nu en in de toekomst (2006 – 2015). Ter completering van het beeld zijn ook de belangrijkste risico's van investeren in brandstofcellen in kaart gebracht.



Figuur S.2 Schematische voorstelling van een brandstofcelgebaseerd wamtekrachtsysteem (BCWK). Het WK-systeem levert warmte, elektriciteit en schone CO₂ voor bemesting van het gewas. In deze studie is uitgegaan van aardgas als brandstof voor zowel de BCWK als de ketel

Aanpak

De aanpak van de 'case-studies' bestond uit de volgende stappen:

1. Voor de gekozen referentieteeft (roos, als meest voorkomende belichte teelt) zijn met behulp van een kasmodel (SimKas van KEMA) representatieve vraagpatronen voor elektriciteit, warmte en CO₂ bepaald over een klimaatreferentiejaar. In de patronen komen de kenmerkende seizoens- en dag/nacht-variaties tot uiting. De vraagpatronen zijn berekend voor 4 belichtingsniveaus (tussen 4900-9800 lux overeenkomend met elektrische vermogens van circa 45-90 W_e/m²).
2. Op basis van de vraagprofielen zijn de betreffende BCWK-systemen gedimensioneerd en, rekening houdend met hun eigenschappen, zijn adequate inzetstrategieën gedefinieerd. Energiecomponenten en inzetstrategieën zijn geïmplementeerd in een 'inzetmodel' (FuelCalc). Voor de rendementen van de BCWK's zijn 3 scenario's gehanteerd: 'conservatief', 'realistisch' en 'optimistisch'³
3. Met het inzetmodel zijn, uitgaande van de vraagpatronen, jaarrond het inkooppatroon van aardgas en de inkoop- en terugleverpatronen van elektriciteit berekend, alsmede de patronen van eventuele warmteoverschotten in de buffer en CO₂-tekorten voor bemesting.

³ De 'conservatieve' rendementen zijn al gerealiseerd. De 'realistische' worden binnen enkele jaren verwacht. De 'optimistische' rendementen worden op termijn haalbaar geacht (2006 à 2007 voor MCFC en 2010 à 2015 voor SOFC-GT).

Samenvatting

4. Op basis van de inkoop- en terugleverpatronen is het jaarrondverbruik bepaald van elektriciteit en aardgas en tevens van het netto primaire energieverbruik (berekend volgens de methodiek van het Besluit Glastuinbouw) en de daaraan gerelateerde CO₂-emissie. Tevens zijn de piekverbruiken en (bij elektriciteit) de verdeling over dal- en plateau-uren bepaald.
5. Aan de hand van de verbruiks-/terugleverkenmerken zoals bepaald onder 4 en de kenmerken van de tariefsystemen voor inkoop van aardgas en elektriciteit c.q. voor teruglevering van elektriciteit zijn de verwachte jaarlijkse energiekosten per variant bepaald.
6. Stappen 2 tot en met 5 zijn ook uitgevoerd voor een representatief referentie-energiesysteem op basis van een gasmotor.
7. Door de verschillen te nemen tussen de cijfers van referentie en variant zijn de besparingen op het gas-, elektriciteits- en netto primaire energieverbruik bepaald en de reductie van de CO₂-emissie. Tevens is de besparing op netto energiekosten bepaald.
8. Ten behoeve van de rentabiliteitsbepaling zijn de meerinvesteringen geraamd (nu en op de korte/middellange termijn) en de meerkosten voor onderhoud en bedrijfsvoering.
9. Op basis van de meerinvesteringen en de minder-/meerkosten voor energie, onderhoud en bedrijfsvoering zijn per variant de belangrijkste rentabiliteitscijfers bepaald (terugverdientijd (TVT), netto-contante-waarde (NCW) en de 'interne rendementsgraad' (IRR), ook vaak 'interne rentevoet' genoemd). Hierbij is rekening gehouden met energie-investeringsaftrek (EIA) en MEP-subsidie (milieukwaliteit elektriciteitsproductie).
10. Aan de hand van een gevoeligheidsstudie, waarbij de (midden)waarde van de belangrijkste invloedsgrontheden (gasprijs, investeringskosten e.d.) is gevarieerd en het effect op de rentabiliteitskengetallen is bepaald, is inzicht verworven in de risico's van de investering bij afwijkingen van de aangenomen 'beste-schatting'.

Resultaten en conclusies

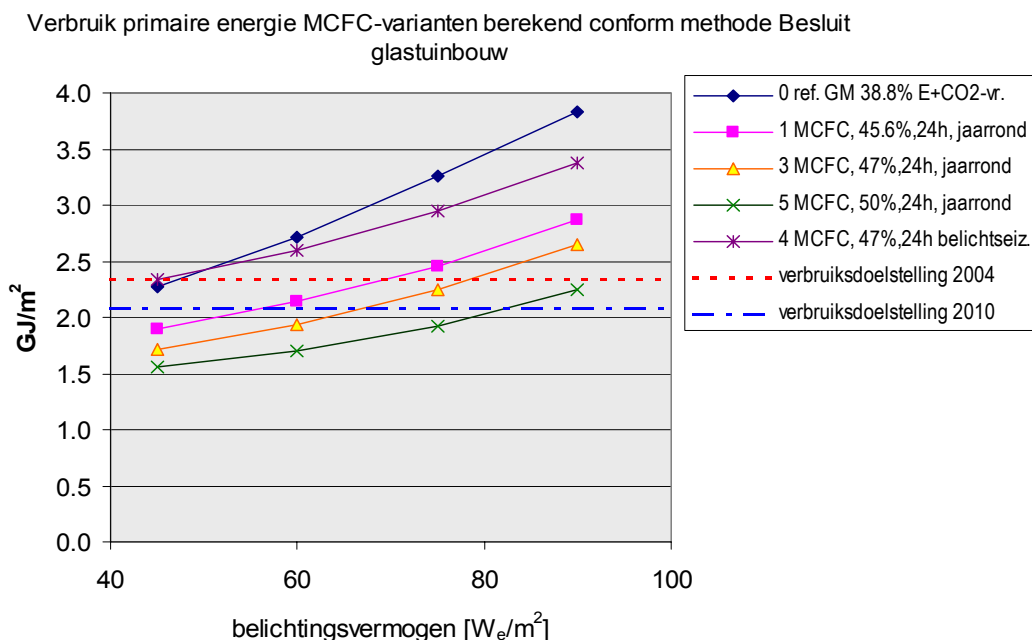
De belangrijkste resultaten en conclusies zijn:

Technisch/energetisch

- MCFC- en SOFC-GT-gebaseerde BCWK's kunnen beiden een forse besparing op het primaire energieverbruik opleveren in vergelijking met gasmotor-WK's. De energieprestatie van de SOFC-GT is daarbij beter dan die van de MCFC. Bij de beste MCFC-variant is een besparing tot circa 41% mogelijk. Bij de SOFC-GT kan dit oplopen tot 80%, een en andere afhankelijk van het bereikte (elektrisch en thermisch) rendement, de wijze van bedrijfsvoeren en het belichtingsniveau.
- Zowel op energetische, bedrijfsvoeringstechnische (in verband met opwarmtijd en regelsnelheid) als bedrijfseconomische gronden kunnen de BCWK's het beste 'altijd-aan' bedreven worden (dat wil zeggen 24 uur per dag het hele jaar door).

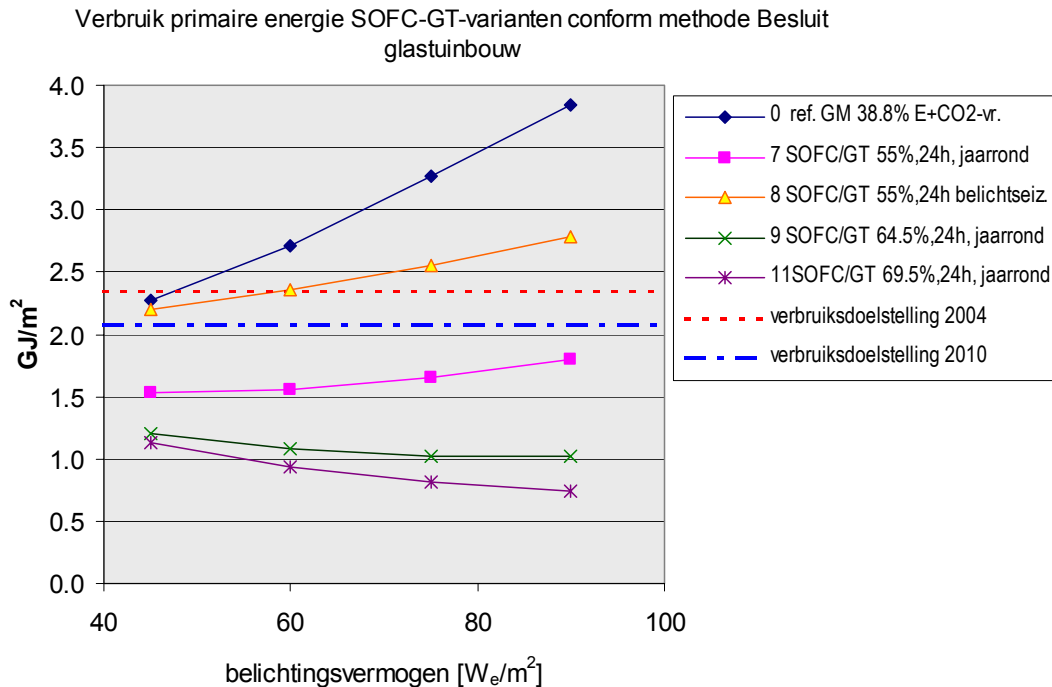
Samenvatting

- Bij een toenemend belichtingsniveau zal bij toepassing van gasmotoren het netto jaarverbruik van primaire energie toenemen. Dit is ook bij MCFC-BCWK's het geval. Het verbruik ligt echter lager dan bij de gasmotor en neemt minder snel toe met het belichtingsvermogen. De gasmotor (GM) kan in 2010 zelfs bij een (relatief) laag belichtingsniveau van $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$ (circa 4880 lux) niet meer aan de energieverbruiksdoelstelling voor belichte rozenteelten uit het Besluit Glastuinbouw voldoen. De 'altijd-aan' MCFC-BCWK-varianten kunnen dat wel. Bij de beste MCFC-variant (met 50% elektrisch rendement) is dit zelfs tot ca $80 \text{ W}_e/\text{m}^2$ (circa 8700 lux) belichting het geval (zie figuur S.3).



Figuur S.3 Primaire energieverbruik van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsvermogen. Tevens is het verbruik van het gasmotorgebaseerde referentiesysteem gegeven (variant 0) en de energieverbruiksdoelstelling voor een belichte rozenteelt in 2004 en 2010. De percentages in de legenda geven de elektrische omzettingrendementen aan (conservatief: 45.6%, realistisch: 47%, optimistisch: 50%).

- Bij de SOFC-GT 'altijd-aan' varianten, blijft het primaire energieverbruik voor alle rendementsscenario's en voor alle onderzochte belichtingsvermogens ($45\text{-}90 \text{ W}_e/\text{m}^2$) ruim onder de verbruiksdoelstelling voor 2010 (zie figuur S.4). Bij de varianten met een elektrisch rendement van 64.5% (realistisch scenario) respectievelijk 69.5% (optimistisch scenario) daalt het primaire energieverbruik zelfs bij een toenemend belichtingsvermogen (dit als gevolg van de verrekeningswijze van teruggeleverde elektriciteit, die in deze situatie zeer efficiënt wordt opgewekt). Deze varianten zijn daardoor goed 'energienorm-bestendig' ook bij verdergaande aanscherping in de toekomst.
- De (gekoelde) rookgassen van een BCWK kunnen direct (zonder rookgasreiniging) worden gebruikt voor CO_2 -bemesting.



Figuur S.4 Primaire energieverbruik van de SOFC-GT-varianten (en de gasmotorreferentie) als functie van het belichtingsvermogen. Tevens zijn de verbruiksdoelstellingen voor 2004 en 2010 gegeven.

- Bij SOFC/GT brandstofcellen met een hoog elektrisch rendement, kan bij relatief lage belichtingsniveaus, en een daarop afgestemd elektrisch vermogen van de BCWK, niet meer altijd de gewenste hoeveelheid CO₂ worden geleverd. Bij een belichtingsniveau van 45 W_e/m² en een 'conservatieve' SOFC/GT – met een elektrisch rendement van 55% - treedt een tekort van circa 40 kg/h per ha (gedurende circa 1300 uur), uitgaande van een maximale gewenste dosering van 205 kg/h per ha. (Bij de optimistische variant met 69.5% elektrisch rendement is het tekort maximaal ca 70 kg/h per ha gedurende circa 1700 uur). Het tekort kan desgewenst additioneel gesuppleerd worden als zuivere CO₂ (aangenomen in deze studie) of met de ketel worden geproduceerd (dit laatste kost echter extra energie).
- Bij hogere vermogens treedt er bij de SOFC-GT-varianten geen CO₂-tekort meer op. Bij de conservatieve variant is dit vanaf 60 W_e/m² en bij de 'realistische' en 'optimistische' variant vanaf 75 W_e/m² het geval.
- De MCFC-varianten hebben geen CO₂-tekort (met uitzondering van een verwaarloosbaar tekort bij 45 W_e/m²)
- Bij gasmotoren en 'altijd-aan' MCFC-BCWK's treedt reeds vanaf belichtingsvermogens van 45 W_e/m² op jaarbasis een flink warmte-overschot op (circa 20 à 38 % van de netto-warmtevraag). Bij een belichtingsvermogens van 90 W_e/m² is dit opgelopen tot 126 à 146%. De overtollige warmte zou bijvoorbeeld nuttig kunnen worden aangewend om

Samenvatting

(grotendeels) in de warmtevraag van een belendend bedrijf te voorzien (dit zou de energieprestatie van het leverende bedrijf verder verbeteren). Bij hogere belichtingsvermogens is er ook voldoende CO₂ beschikbaar om in de CO₂-vraag te voorzien. Als de warmte niet aan derden kan worden geleverd, dan zal ze moeten worden weggekoeld (desnoods via de eigen kas).

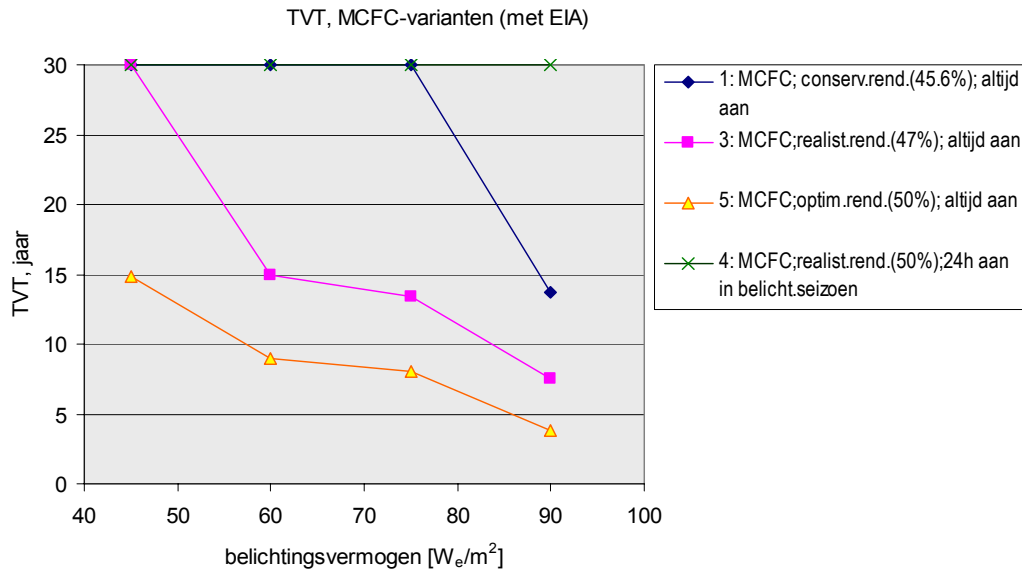
- Bij de SOFC-GT-varianten is het warmteoverschot veel kleiner. Bij 45 W_e/m² belichting is er bij de 'altijd-aan' varianten geen (bij de 'optimistische' en de 'realistische' variant) of slechts een klein overschot (circa 3% bij de 'conservatieve' variant). Bij 90 W_e/m² loopt dit op tot ca 22 à 36% bij de eerste twee varianten, en circa 56% bij de derde.
- De procentuele reductie van de CO₂-emissie die samenhangt met de energievoorziening van de kas, is gelijk aan de procentuele besparing op het primaire energieverbruik. In absolute zin ligt de CO₂-reductie voor de 'altijd-aan' MCFC-varianten tussen ca 19 en 80 kg/m² per jaar en voor SOFC-GT-varianten tussen 37 en 156 kg/m² per jaar. De CO₂-reductie neemt toe met het vermogen van de BCWK en het elektrisch rendement ervan.

Bedrijfseconomisch/commercieel

- SOFC-GT systemen zijn nog niet commercieel leverbaar. De commerciële leverbaarheid wordt verwacht vanaf ongeveer 2010. MCFC-systemen zijn nu al leverbaar. Commercieel aantrekkelijke prijzen hiervoor op basis van serieproductie (circa 1200 EUR/kW_e) worden vanaf 2006 à 2007 verwacht.
- Op basis van de huidige investeringsniveaus zijn zowel MCFC- als SOFC-GT-systemen op dit moment (anno 2004) nog niet rendabel.
- Uitgaande van de door de leveranciers verwachte prijzen (circa 1200 EUR/kW_e voor MCFC in 2006/2007 en 1000 USD/kW_e ≈ 850 EUR/kW_e voor SOFC-GT systemen in 2010 à 2015), zijn wel rendabele (tot zeer rendabele) BCWK-systemen mogelijk.

Economie MCFC

- MCFC-systemen zijn onder voorwaarden rendabel. Zonder subsidies is - uitgaande van het genoemde investeringsniveau voor 2006/2007 - alleen de 'altijd-aan' variant met 'optimistisch rendement' bij een belichtingsvermogen van 90 W_e/m² aantrekkelijk. De terugverdientijd is ca 8 jaar, de netto-contante-waarde (NCW) over 15 jaar bedraagt ca 11 EUR/m² en de interne rendementsgraad bedraagt ca 9%.
- Bij gebruikmaking van energie-investeringsaftrek (EIA) voor de BCWK verbetert het economisch perspectief. De 'optimistische' 'altijd-aan' variant met een elektrisch rendement van 50% is vanaf circa 75 W_e/m² financieel interessant (TVT < 8 jaar, IRR > 10%, NCW > 8 EUR/m²). Bij het MCFC-systeem met het 'realistische rendement' (47%) is dit voor de 90 W_e/m² belichtingssituatie het geval. Bij lagere belichtingsvermogens dan 60 W_e/m² verdient het 'realistische' MCFC-systeem zich niet terug (zie ook figuur S.5).



Figuur S.5 Terugverdiëntijd van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsniveau uitgaande van het investeringsniveau van 2006/2007, in de situatie met EIA. (Een TVT van 30 betekent 30 of meer.)

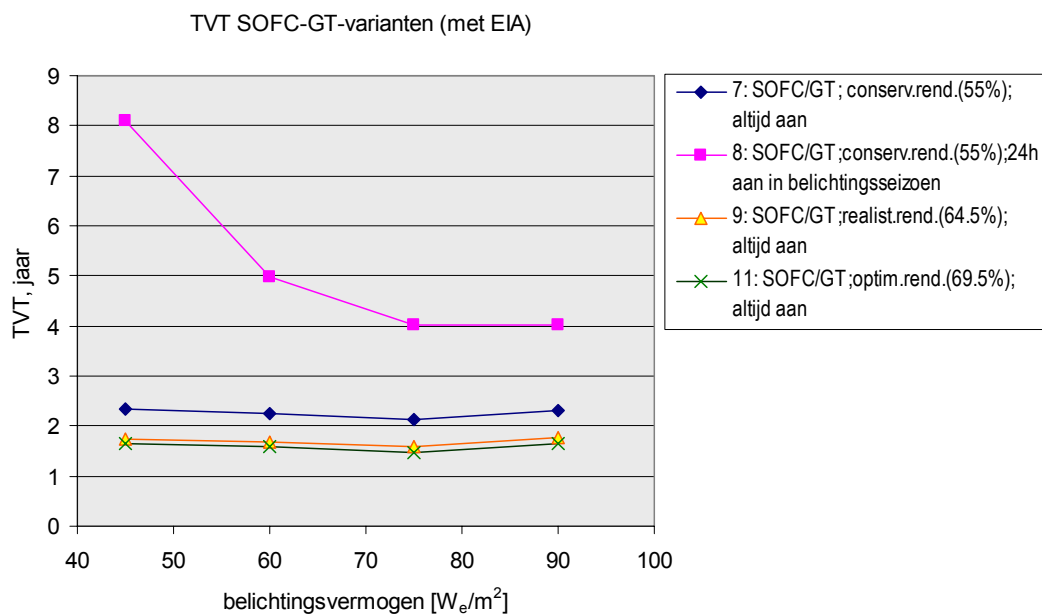
- De beperkte rentabiliteit van MCFC systemen, heeft met name te maken met de (relatief) korte vervangingsperiode van de brandstofcelstack van 5 jaar. Mocht de fabrikant in staat zijn dit te verbeteren naar bijvoorbeeld 7 jaar, dan wordt het economisch perspectief over de hele (belichtings)linie een stuk beter. Mocht de 5 jaar niet worden gehaald, maar al na 3 jaar (≈ 26000 uur) vervanging nodig zijn, dan zijn ook bovengenoemde rendabele situaties niet langer rendabel en de overige situaties zeer onrendabel. De onzekerheid over de levensduur is op dit moment nog een groot risico voor de inzet van MCFC-systemen.
- De MEP-vergoeding voor 'CO₂-vrije' kWh is essentieel voor een rendabel MCFC-systeem. Zonder de MEP zijn de genoemde rendabele MCFC-cases niet langer financieel aantrekkelijk.

Economie SOFC-GT

- Het economisch perspectief van SOFC-GT-systemen is veel beter dan van MCFC-systemen. De 'realistische' en 'optimistische' 'altijd-aan' varianten hebben - bij de aangenomen prijzen in 2010 à 2015 - een terugverdiëntijd van circa 2 jaar (zonder EIA). De 'conservatieve' 'altijd-aan' variant heeft een terugverdiëntijd van 2.7 jaar. De interne rendementsgraden bedragen circa 50 à 60% bij de conservatieve variant, 85 à 105% voor de realistische en 100 à 125% voor de 'optimistische variant! De NCW ligt afhankelijk van het belichtingsniveau tussen 26 en 80 EUR/m² voor de conservatieve, tussen 40 en 115 EUR/m² voor de realistische en tussen 44 en 128 EUR/m² voor de optimistische 'altijd-aan' variant.

Samenvatting

- In het geval dat gebruik gemaakt wordt van EIA verbeteren bovengenoemde cijfers nog wat. De terugverdiëntijd neemt ca 0.3 à 0.4 jaar af (zie figuur S.6). De NCW ligt circa 3 à 7 EUR/m² hoger. De IRR ligt voor de conservatieve 'altijd-aan' variant tussen 73 en 88%, voor de realistische variant tussen 130 en 170% en voor de optimistische variant zelfs tussen 153 en 212%!



Figuur S.6 Terugverdiëntijd (TVT) van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2010 à 2015, in de situatie met EIA).

- De SOFC-GT BCWK's scoren zoveel beter dan de MCFC-varianten als gevolg van:
 - langere stackvervangingsperiode (10 jaar in plaats van 5)
 - hoger elektrisch rendement, waardoor er minder gas nodig is voor een bepaalde elektrisch vermogen
 - (op termijn) lagere investeringskosten
- De MEP-vergoeding is voor de SOFC-GT-cases niet essentieel. Zonder MEP zou de TVT van de 'altijd-aan' varianten met ca 0.4 jaar stijgen en de NCW met circa 11 tot 31 EUR/m² dalen (afhankelijk van het belichtingsvermogen).
- Investeren in SOFC-GT BCWK's onder het verwachtingspatroon (qua investeringen, rendementen en energieprijzen) zoals gemotiveerd en aangenomen in deze studie is (vanaf ongeveer 2010) zeer lucratief. Dit vereist wel dat de fabrikanten in staat zullen zijn door nieuwe fabricagetechnieken het geprognostiseerde prijsniveau (1000 USD/kW_e) te realiseren met behoud van de kwaliteit van de SOFC-brandstofcellen. Overigens zijn alle 'altijd-aan' SOFC-GT-varianten ook bij een 50% hoger investeringsniveau nog rendabel, en de meeste zelfs ook nog bij een 100% hoger niveau.

Samenvatting

Resumerend geeft tabel S.1 geeft een overzicht van de kenmerken en de rentabiliteit van een aantal relevante brandstofcel-WK-cases. De kaders in tabel S.2 geven voor 2 belichtingssituaties voor zowel referentie als de MCFC- en SOFC-GT-BCWK een overzicht van de belangrijkste cijfers betreffende energieverbruik, energiekosten, investeringen en rentabiliteit.

Tabel S.1 Overzicht van de rentabiliteit van de 'belangrijkste' BCWK/regelstrategie/belichtingsniveau-combinaties

Nr	systeem	nom. elektrisch rendement	nom. thermisch rendement	regelstrategie	Belichtingsniveau W _e /m ²	investeringsjaar	Rentabiliteit ¹⁾		
							TVT jaar	NCW EUR/m ²	IRR %
1a	MCFC-conservatief	45.6%	35.5%	continu aan ²⁾	45	2004	-	-117.3	-22.6%
1b	MCFC-conservatief	45.6%	35.5%	continu aan	45	2006	-	-27.2	-16.45
3a	MCFC- realistisch	47%	43%	continu aan	45	2006	-	-12.66	-4.0%
3b	MCFC- realistisch	47%	43%	continu aan	90	2006	7.5	19.14	12.6%
5a	MCFC-optimistisch	50%	41%	continu aan	45	2007	14.8	-7.0	0.4%
5b	MCFC-optimistisch	50%	41%	continu aan	60	2007	8.9	-1.34	5.3%
5c	MCFC-optimistisch	50%	41%	continu aan	90	2007	3.8	36.5	18.9%
7a	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	continu aan	45	2003	-	-567	-21.5%
7b	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	continu aan	45	2012 ³⁾	2.4	29.0	73%
7c	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	continu aan	90	2012	2.3	87.4	76%
8a	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	alleen in belichtingsseizoen aan	45	2012	8.1	-1.0	4.1%
9a	SOFC-GT-realistisch	64.5%	25.5%	continu aan	45	2012	1.7	43.9	136%
9b	SOFC-GT-realistisch	64.5%	25.5%	continu aan	90	2012	1.8	123.4	129%
11a	SOFC-GT-optimistisch	69.5%	22.5%	continu aan	45	2014	1.6	46.8	153%
11b	SOFC-GT-optimistisch	69.5%	22.5%	continu aan	90	2014	1.6	135.7	155%

¹⁾ Bij de rentabiliteitsbepaling is uitgegaan van maximale energie-investeringsaftrek (EIA) en een stackvervangingsperiode van 5 jaar voor de MCFC en 10 jaar voor het SOFC-GT systeem

²⁾ gedurende 24 uur per dag het hele jaar door (de '24 h in belichtingsseizoen aan' varianten zijn hier niet getabelleerd, m.u.v. 8a, omdat ze energetisch en bedrijfseconomisch veel slechter scoren)

³⁾ bedoeld is periode 2010 à 2015, e.e.a. afhankelijk van snelheid van ontwikkelingen

- Een hogere olieprijs is gunstig voor de rentabiliteit van de BCWK. Een 50% hogere 'P-factor' dan de aangenomen middenwaarde van 170 EUR/ton (resultierend in een 50% hogere commodity-gasprijs: 18.7 EURct/m³ in plaats van de 'middenwaarde' van 12.3 EURct/m³) zou de terugverdientijd van bijvoorbeeld variant 3b verkorten van 7.5 tot 3.6 jaar en van variant 3a van meer dan 30 naar 13.3 jaar. Een 25% lagere P-factor zou bij variant 3b de terugverdientijd verlengen tot 8.3 jaar. Hierbij is verondersteld dat bij stijgende olie- en daaraan gerelateerde gasprijzen, de elektriciteitsproducenten de hogere brandstofkosten in hun (commodity) kWh-prijzen zullen verdisconteren (voor zowel te verkopen als in te kopen elektriciteit).

Samenvatting

Tabel S.2 Overzicht van de belangrijkste energie-, energiekosten-, investerings- en rentabiliteitscijfers van enkele typische BCWK/regelstrategie/belichtingsniveau-combinaties (en van de gasmotorreferentie)

<u>Belichte rozenteelt (met gasmotor WK, referentie)</u>		<u>Belichte rozenteelt (met gasmotor WK, referentie)</u>	
Belichtingsniveau	45 W_g/m^2 (4880 lux)	Belichtingsniveau	90 W_g/m^2 (9760 lux)
Gasverbruik	91 m^3/m^2	Gasverbruik	132 m^3/m^2
Elektriciteitsinkoop	4 kWh/ m^2	Elektriciteitsinkoop	3 kWh/ m^2
Elektriciteitsverkoop	106 kWh/ m^2	Elektriciteitsverkoop	93 kWh/ m^2
Primair energieverbruik	2.27 GJ/ m^2	Primair energieverbruik	3.83 GJ/ m^2
Energienorm 2010	2.08 GJ/ m^2	Energienorm 2010	2.08 GJ/ m^2
Warmteoverschot buffer	0.33 GJ/ m^2	Warmteoverschot buffer	1.19 GJ/ m^2
Gaskosten	16.67 EUR/ m^2	Gaskosten	22.47 EUR/ m^2
Netto elektriciteitskosten	-4.68 EUR/ m^2	Netto elektriciteitskosten	-4.07 EUR/ m^2
Netto energiekosten	11.99 EUR/ m^2	Netto energiekosten	18.20 EUR/ m^2
<u>Belichte rozenteelt (met MCFC-WK, 'altijd-aan', 'optimistisch', 2007, nr 5a)</u>		<u>Belichte rozenteelt (met MCFC-WK, 'altijd-aan', 'optimistisch', 2007, nr 5c)</u>	
Belichtingsniveau	45 W_g/m^2 (4880 lux)	Belichtingsniveau	90 W_g/m^2 (9760 lux)
Gasverbruik	102 m^3/m^2	Gasverbruik	181 m^3/m^2
Elektriciteitsinkoop	2 kWh/ m^2	Elektriciteitsinkoop	1 kWh/ m^2
Elektriciteitsverkoop	228 kWh/ m^2	Elektriciteitsverkoop	458 kWh/ m^2
Primair energieverbruik	1.57 GJ/ m^2 (\rightarrow -31%)	Primair energieverbruik	2.25 GJ/ m^2 (\rightarrow -41%)
Energienorm 2010	2.08 GJ/ m^2	Energienorm 2010	2.08 GJ/ m^2
Warmteoverschot buffer	0.29 GJ/ m^2	Warmteoverschot buffer	1.38 GJ/ m^2
Gaskosten	18.44 EUR/ m^2	Gaskosten	25.95 EUR/ m^2
Netto elektriciteitskosten	-9.73 EUR/ m^2	Netto elektriciteitskosten	-20.01 EUR/ m^2
Netto energiekosten	8.71 EUR/ m^2	Netto energiekosten	5.94 EUR/ m^2
Besparing energiekosten	3.28 EUR/ m^2 (=27%)	Besparing energiekosten	12.26 EUR/ m^2 (=67%)
Meerinvestering (2007)	29.8 EUR/ m^2	Meerinvestering (2007)	69.3 EUR/ m^2
Herinvestering (stack na 5 jaar)	27.4 EUR/ m^2	Herinvestering (stack na 5 jaar)	54.4 EUR/ m^2
Terugverdientijd (met EIA)	15 jaar	Terugverdientijd (met EIA)	3.8 jaar
Netto-contante-waarde (15 jaar)	-7.0 EUR/ m^2 (incl.EIA)	Netto-contante-waarde (15 jaar)	36.5 EUR/ m^2 (incl.EIA)
Interne rendementsgraad (IRR)	0.4% (incl.EIA)	Interne rendementsgraad (IRR)	19%
<u>Belichte rozenteelt (met SOFC-GT-WK, 'altijd-aan', 'realistisch', 2010, nr 9a)</u>		<u>Belichte rozenteelt (met SOFC-GT-WK, 'altijd-aan', 'realistisch', 2010, nr 9b)</u>	
Belichtingsniveau	45 W_g/m^2 (4880 lux)	Belichtingsniveau	90 W_g/m^2 (9760 lux)
Gasverbruik	92 m^3/m^2	Gasverbruik	146 m^3/m^2
Elektriciteitsinkoop	2 kWh/ m^2	Elektriciteitsinkoop	1 kWh/ m^2
Elektriciteitsverkoop	228 kWh/ m^2	Elektriciteitsverkoop	458 kWh/ m^2
Primair energieverbruik	1.21 GJ/ m^2 (\rightarrow -47%)	Primair energieverbruik	1.02 GJ/ m^2 (\rightarrow -73%)
Energienorm 2010	2.08 GJ/ m^2	Energienorm 2010	2.08 GJ/ m^2
Warmteoverschot buffer	0.01 GJ/ m^2	Warmteoverschot buffer	0.34 GJ/ m^2
Gaskosten	16.97 EUR/ m^2	Gaskosten	24.75 EUR/ m^2
Netto elektriciteitskosten	-9.73 EUR/ m^2	Netto elektriciteitskosten	-20.06 EUR/ m^2
Netto energiekosten	7.22 EUR/ m^2	Netto energiekosten	4.69 EUR/ m^2
Besparing energiekosten	4.77 EUR/ m^2 (=40%)	Besparing energiekosten	13.51 EUR/ m^2 (=74%)
Meerinvestering (2010)	12.3 EUR/ m^2	Meerinvestering (2010)	34.6 EUR/ m^2
Herinvestering (stack na 10 jaar)	12.7 EUR/ m^2	Herinvestering (stack na 10 jaar)	25.2 EUR/ m^2
Terugverdientijd (met EIA)	1.7 jaar	Terugverdientijd (met EIA)	1.8 jaar
Netto-contante-waarde (15 jaar)	44 EUR/ m^2 (incl.EIA)	Netto-contante-waarde (15 jaar)	123 EUR/ m^2 (incl.EIA)
Interne rendementsgraad (IRR)	136%	Interne rendementsgraad (IRR)	129%

Resumerend

Resumerend kan worden gesteld, dat op termijn (6 à 10 jaar) SOFC-GT-systemen een zeer aantrekkelijk perspectief bieden als vervanging van gasmotorgebaseerde warmtekrachtinstallaties. Voorwaarde is wel dat de fabrikanten er in slagen om de fabricagekosten van de vast-oxide brandstofcellen (SOFC) drastisch te reduceren (circa een factor 20 naar het 'targetniveau' van USD 1000 per kWe).

MCFC-systemen zijn al eerder marktrijp en bieden met name bij hogere belichtingsniveaus bedrijfseconomisch perspectief. Belangrijke voorwaarden hiervoor zijn: brandstofcel-WK continu in bedrijf, MEP-vergoeding voor 'CO₂-vrije' elektriciteitsproductie en energie-investeringsaftrek (EIA). Het belangrijkste risico is de levensduur van de MCFC-stack.

Aanbevelingen

- Overtollige warmte, die bij de verschillende BCWK-varianten in meer of mindere mate optreedt, zou nuttig op een belendend bedrijf kunnen worden aangewend, waardoor de energetische benutting van het verbruikte gas en de energie-efficiency van het bedrijf verder toeneemt. Daarnaast kan dit met name bij MCFC-BCWK's de rentabiliteit significant verder vergroten. Dit effect is in de onderhavige studie nog niet meegenomen. Het verdient aanbeveling het effect van een dergelijke clustering op energieprestatie en rentabiliteit nader in kaart te brengen.
- Bij een voorgenomen aankoop van een MCFC-systeem zou de koper garanties kunnen bedingen voor de levensduur van de stack. Indien dit zou lukken voor 5 jaar (of meer), dan zou het risico van een investering in deze techniek flink afnemen.
- Het verdient aanbeveling om binnen 2 à 3 jaar in samenwerking met een tuinder op een (gedeeltelijk) belicht glastuinbouwbedrijf een demonstratiesysteem met één of meerdere MCFC-modules te realiseren om voor de sector (bouw- en bedrijfs)ervaring op te doen en het energetische potentieel en de bruikbaarheid van het brandstofcelsysteem in de praktijk te bewijzen.

1 INLEIDING

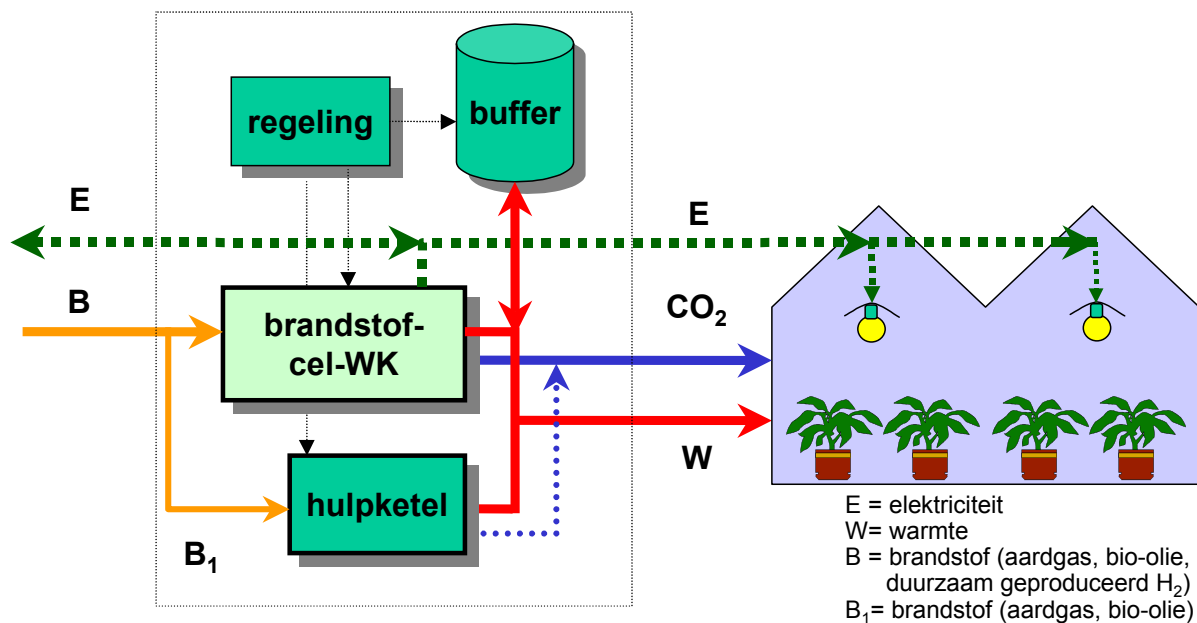
1.1 Achtergrond

Belichte teelten (circa 21% van het glastuinbouwareaal in 2001 [1], 'verantwoordelijk' voor circa 30 à 35% van het energieverbruik van de sector) kennen een hoog elektriciteitsverbruik: gemiddeld circa $39 \text{ W}_e/\text{m}^2$ in 2001, met een stijgende tendens. Bij de tegenwoordig gangbare belichtingsniveaus van 8000 à 10000 lux is zelfs 70 à 90 W_e/m^2 nodig. Veelal wordt de benodigde elektriciteit opgewekt met behulp van een (eigen) gasmotor (GM). Deze GMs hebben een - relatief laag - elektrisch rendement van tussen de 30 en 42% (op onderwaarde). De warmte die bij de elektriciteitsopwekking vrijkomt, kan zeker bij hoge belichtingsniveau's maar ten dele gebruikt worden. De rest (vaak meer dan 40%) gaat zonder nuttige toepassing verloren. Verder kunnen de rookgassen van een gasmotor niet zonder meer voor bemesting worden gebruikt, vanwege de te hoge NOx- en etheen-concentraties.

Brandstofcellen (BC's) zijn veelbelovende energieconversiesystemen, waarbij brandstof direct in elektriciteit wordt omgezet (zonder de tussenstap van een 'thermische cyclus' die qua omzettingsrendement naar boven begrensd wordt door het zogenaamde Carnotrendement). Hierdoor zijn bij dergelijke systemen veel hogere (elektriciteits-)conversierendementen mogelijk (in theorie tot ca 80%, in de praktijk wordt al meer dan 55% gerealiseerd voor een demonstratiesysteem van circa 250 kW_e bestaande uit een combinatie van een brandstofcel en een nageschakelde microturbine). Behalve elektriciteit produceren de brandstofcellen ook warmte en (bij gebruikmaking van bijvoorbeeld aardgas, LPG of dieselolie als brandstof) CO_2 . Omdat bij bepaalde typen brandstofcellen het aandeel warmte veel kleiner is dan bij een gasmotor, zal bij toepassing van zo'n BC-gebaseerde warmtekrachtinstallatie (BCWK, zie figuur 1.1) veel minder warmte vernietigd behoeven te worden en is er naar verwachting minder primaire energie nodig. Een belangrijk bijkomend voordeel is dat de rookgassen van een BC-systeem zeer weinig NOx en andere schadelijke stoffen (<1 ppm in het rookgas) bevatten, waardoor deze direct - zonder rookgasreiniging - bruikbaar zijn voor CO_2 -bemesting [2].

Brandstofcellen passen verder bijzonder goed in de door de sector beoogde transitietrajecten naar een duurzame energievoorziening (PT, 2002) daar ze prima in staat zijn duurzame energie te leveren (op basis van bijvoorbeeld biobrandstoffen of duurzaam geproduceerde waterstof). De te verwachten brandstofflexibiliteit van brandstofcellen maakt deze systemen in principe ook geschikt om flexibel in te spelen op actuele brandstofprijzen en specifieke kenmerken van tariefsystemen (bijvoorbeeld limiteren van gascontractcapaciteit in verband met hoge kosten voor weinig gebruikte piekcapaciteit). Een perspectief dat wat verder in de toekomst ligt, is het afscheiden van CO_2 . In bepaalde typen brandstofcellen is het relatief

eenvoudig om CO₂ in geconcentreerde vorm (>90%) te verkrijgen. Shell ontwikkelt momenteel een dergelijk systeem met als doel een CO₂-neutraal energievoorzieningssysteem. In de glastuinbouw kan de afgevangen CO₂ nuttig worden gebruikt voor bemestingsdoeleinden. Verder zal de CO₂-emissiereductie (als gevolg van efficiëntere opwekking plus eventueel afvangen van CO₂) naar verwachting in een toekomstig CO₂-emissiehandelbestel een significante financiële 'CO₂-reductie-waarde' gaan vertegenwoordigen, hetgeen de rentabiliteit ten goede komt.



Figuur 1.1 Schematische voorstelling van een brandstofcelgebaseerd warmtekrachtsysteem. Het WK-systeem levert warmte, elektriciteit en schone CO₂ voor bemesting van het gewas. Eventuele overtollige elektriciteit wordt teruggeleverd aan het net. Overtollige warmte wordt opgeslagen in een warmtebuffer. In deze studie is uitgegaan van aardgas als brandstof voor zowel de BCWK als de hulpketel.

1.2 Probleemstelling

In dit rapport zal aan de hand van een case-study (voor belichte teelten) worden nagegaan wat de energetische prestatie is van brandstofcelgebaseerde WK-systemen met aardgas als brandstof in vergelijking met conventionele, gasmotorgebaseerde energiesystemen. De energetische prestatie zal worden uitgedrukt in een besparing op het primaire energieverbruik en in een reductie van de CO₂-uitstoot. Tevens wordt een bedrijfseconomische analyse gemaakt van het financiële perspectief van de BCWK nu en in de toekomst (2006-2015). Ter completering van het beeld worden ook de belangrijkste risico's van investeren in brandstofcellen in kaart gebracht.

1.3 Aanpak

Dit rapport sluit aan bij en gaat uit van de informatie verstrekt in het deelrapport "Brandstofcellen in de glastuinbouw: status en mogelijkheden" [2], dat eveneens in het kader van dit project is opgesteld. In dat rapport is een overzicht gegeven van de huidige status van de brandstofceltechnologie en is op basis van een programma van eisen een (voor)selectie gemaakt voor twee typen brandstofceltechnologieën, die naar verwachting in de glastuinbouw het meest kansrijk zullen zijn. Het betreft:

1. MCFC-technologie (molten carbonate fuel cell, gesmolten carbonaat brandstofcel)
2. SOFC-GT technologie (solid oxide fuel cell with gas turbine, vast-oxide brandstofcel).

Voor beiden typen brandstofcellen zal de energetische prestatie en de rentabiliteit van een hierop gebaseerd WK-systeem (met aardgas als brandstof) worden onderzocht. Hiertoe worden case-studies uitgevoerd voor beide typen BCWK-systemen voor een belichte rozen-teelt. De keus voor de roos is gemaakt omdat vrijwel het volledige areaal (ca 900 ha) wordt belicht en ook in absolute zin de meest voorkomende belichte teelt is in Nederland. Als referentiesysteem wordt een gasmotorgebaseerd WK-systeem gebruikt, met warmtebuffer en hulpketel.

BC-energieconversiesystemen zijn vooral geschikt voor belichte teelten. Op dit moment komt assimilatiebelichting met name voor bij snijbloemteelten en potplantenteelten, alhoewel belichting ook bij groenteteelten in opkomst is (en dan met heel hoge lichtniveaus, vaak meer dan 10000 lux $\sim 90 \text{ W}_e/\text{m}^2$). De grootste snijbloem-arealen in Nederland betreffen de roos (ca 932 ha in 2000) en de chrysant (ca 774 ha). Totaal belicht areaal in 2001 is ca 2223 ha, waarvan de rozenteelt het grootste deel voor zijn rekening neemt.

Voor de analyse wordt voor een 4-tal belichtingsniveaus de 'jaarrond' warmte-, elektriciteits- en CO₂-vraagprofielen bepaald. Op de vraagprofielen wordt het BCWK-systeem gedimensioneerd. Rekening houdend met de eigenschappen van de systemen wordt een inzetstrategie gedefinieerd, die wordt geïmplementeerd in een inzetmodel. Met dit model wordt, uitgaande van de vraagprofielen, de benodigde gas- en elektriciteitsinkoop- en terugleverprofielen bepaald. Op basis van de kenmerken van de meest voorkomende gas- en elektriciteitstarief-systemen wordt een raming gemaakt van de gas- en elektriciteitskosten. Verder wordt van de BCWK-systemen een schatting gemaakt van de hoogte van de benodigde investeringen (nu en in de nabije/middellange toekomst) en van de verwachte onderhoudskosten. De bovenstaande procedure wordt ook uitgevoerd voor het referentiesysteem. Op basis van de reductie van de energiekosten en de verschillen in onderhoudskosten wordt bepaald hoe snel de meerinvestering kan worden terugverdiend. Aanvullend wordt een gevoeligheidsana-

lyse uitgevoerd, die inzicht geeft in de risico's van de investering. Uit de resultaten van de inzetberekeningen wordt ook de reductie van het primaire-energieverbruik en de CO₂-reductie bepaald.

1.4 **Leeswijzer**

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de belangrijkste technische en bedrijfseconomische uitgangspunten. Hoofdstuk 3 analyseert de warmte-, CO₂ en elektriciteitsvraag. Op basis daarvan worden de BCWK's gedimensioneerd en worden de inzetstrategieën bepaald. Verder worden de 'inzetberekeningen' beschreven en de resultaten daarvan gegeven (gas- en elektriciteitsverbruik, elektriciteitsteruglevering, primair energieverbruik, warmte-overschotten en dergelijke). Hoofdstuk 4 behandelt de bedrijfseconomische aspecten (energiekosten/opbrengsten, investering, rentabiliteit en risico-analyse). Tot slot worden in hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies gegeven en enkele aanbevelingen gedaan.

2 UITGANGSPUNTEN

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste uitgangspunten voor de case-studies opgesomd en waar nodig toegelicht. Ze zijn onderverdeeld in teelt(technische), energiesysteemtechnische en bedrijfseconomische uitgangspunten.

2.1 Teelt en teelttechnische uitgangspunten

1. Als modelteelt is gekozen voor de roos. In de rozenteelt is belichting gemeengoed. Nagenoeg het hele Nederlandse areaal van circa 930 ha wordt belicht. De rozenteelt is de meest voorkomende belichte teelt in Nederland (circa 9% van het totale glasoppervlak).
2. De belichting wordt gebruikt in de periode van 1 september tot 30 april. De lampen worden ingeschakeld als de lichtintensiteit (globale instraling buiten de kas) zakt onder de 125 W/m^2 . Van 20:00 tot 24:00 uur zijn de lampen uitgeschakeld (in verband met de eisen ten aanzien van lichtuitstoot).
3. De instellingen van het kasklimaat zijn samengevat in tabel 2.1. Deze zijn gebaseerd op [3].
4. De rozenteelt vindt plaats in een venlo-kas (oppervlak 2 ha). De voor de energievraag relevante bouwfysische kenmerken van de referentiekas zijn samengevat in bijlage A.
5. Om het effect van het belichtingsniveau op energiebesparing en rentabiliteit te kunnen inschatten, zullen de analyses voor verschillende waarden van de belichtingsintensiteit worden gemaakt (variant 1 tot en met 4, zie tabel 2.1).

2.2 Energiesysteemtechnische uitgangspunten

1. **Capaciteit warmtekrachtinstallatie (WK)**
De WK-capaciteit of BCWK-capaciteit (BCWK=brandstofcel-warmtekrachtinstallatie) wordt gedimensioneerd op de elektriciteitsbehoefte van de assimilatiebelichting + een gering extra vermogen voor de gemiddelde 'vaste' elektriciteitsvraag.
2. **Bedrijfsvoeringswijze WK**
Bij de energetische en bedrijfseconomische analyses wordt er van uitgegaan, dat er een netkoppeling bestaat. Via deze koppeling kan de in de (BC)WK-opgewekte elektriciteit desgewenst worden teruggeleverd aan het net. Dit maakt het (BC)WK-systeem flexibeler

Tabel 2.1 Teeltdata en teeltcondities voor referentieteel roos

Teelt	Specificatie	Opmerkingen
Gewas	roos	steenwol (jaarrond)
Assimilatiebelichting	variant 1: 45 W _e /m ² (ca 4880 lux*) variant 2: 60 W _e /m ² (ca 6500 lux) variant 3: 75 W _e /m ² (ca 8130 lux) variant 4: 90 W _e /m ² (ca 9760 lux)	niet tussen 20 en 24 uur; als globale instraling buiten < 125 W/m ² periode 1 sept – 30 april → totaal 3650 uur
Kasoppervlak	2 ha	
Teeltklimaat		
Verwarmingstemperatuur	01-12 t.m. 28-02: dag 18°C, nacht 17 °C 01-03 t.m. 07-09: dag 19.5°C, nacht 18.5°C 08-09 t.m. 30-11: dag 18°C, nacht 17 °C	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m ² globale instraling wordt de verwarmings- temperatuur lineair met 0 tot 6 °C ver- hoogd
Ventilatietemperatuur	3 °C boven verwarmingstemperatuur	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m ² globale instraling wordt de ventilatie- temperatuur lineair met 0 tot 6 °C ver- hoogd
RV	streefwaarde: max. 85%	
Minimum buis temp.	geen	
Energiescherm	transparant; vochtdoorlatend	dicht als buitentemperatuur 8 °C lager is dan kastemperatuur, mits globale instraling minder dan 50 W/m ² (3410 schermuren bij verkort ref.jaar)
CO ₂ -bemesting	door WK; gewenste waarde: 800 ppm	maximale dosering bij vraagbepaling: 205 kg/ha.h

^{*)} uitgaande van Philips Master SON-T Green Power lampen 600 W/ 230 V, rekening houdend met leidingverliezen. Het gemiddelde belichtingsniveau in de rozenteelt bedroeg in 2001 5400 lux. [13].

inzetbaar. In het bijzonder kan hierdoor in het warme deel van het jaar, als de belichting niet in bedrijf is, toch met de (BC)WK CO₂ worden gedoseerd. CO₂-dosereren met (BC)WK zorgt – uitgaande van een bepaalde, nog bruikbare warmteproductie – voor een grotere CO₂-stroom, dan mogelijk was met de ketel. (Een bijkomend voordeel is, dat dit – dankzij de energetische verrekening van de teruglevering – leidt tot een lager verbruik aan primaire energie). Buiten het belichtingsseizoen draait de (gasmotor)WK niet in de nachturen (23 – 7 uur). De reden hiervoor is de lage terugleververgoeding in dat deel van het etmaal. Indien 's nachts de hoeveelheid warmte die aan de warmtebuffer kan worden

onttrokken onvoldoende is, zal de extra warmte worden geproduceerd met de ketel. De regelstrategie van de brandstofcel-WK-varianten zal in hoofdstuk 4 worden behandeld.

3. **Keuze capaciteit (hulp)ketel**

In principe is het voldoende dat de ketel de verwachte piekvraag bij extreme condities (circa 4000 kW_{th}) minus de thermische vermogens van de WK (voor zover van toepassing) kan leveren. Uit betrouwbaarheidsoverwegingen kan een ketelinstallatie worden gekozen die de volledige piekvraag kan dekken. In deze studie wordt van de laatste situatie uitgegaan. Het ketelrendement (inclusief rookgascondensators) wordt gesteld op 98% (op onderwaarde).

4. **Buffergrootte**

Warmtebuffer: 100 m³/ha (dit is een gangbaar volume bij CO₂-bemesting [4]; een buffer van deze omvang kan in de zomermaanden in de nacht doorgaans worden geleegd).

5. **CO₂-bemesting**

Zoals in punt 2 al impliciet aangegeven, wordt de CO₂ bij voorkeur geproduceerd met de WK-installatie. In het geval van een gasmotor zal deze worden uitgerust met een rookgasreiniger om het rookgas te ontdoen van etheen en NO_x. Bij een BC-WK is dit niet nodig [2]. De maximale doseerstroom bij CO₂-dosereren wordt bepaald door het maximale gasverbruik van de WK- (of ketel-) installatie, die de CO₂ levert. Bij de bepaling van de CO₂-vraag is uitgegaan van een maximale doseercapaciteit van 205 kg/ha per uur, overeenkomend met 116 m³ aardgas per uur (zie ook [4]). Of deze hoeveelheid ook kan worden geleverd hangt af van de kenmerken van de WK-installatie. Indien de CO₂-vraag bij bepaalde condities (vooral 's zomers, als er flink geventileerd moet worden om de kas op de gewenste 'ventilatietemperatuur' te houden) groter is dan de maximale doseercapaciteit, dan zal de gewenste CO₂-concentratie niet worden gehaald.

6. **Energetische jaarrondberekening**

De energetische 'jaarrondberekening' wordt gebaseerd op de energieproductie- en brandstofconsumptie van de hoofdcomponenten in het energievoorzieningssysteem (de gasmotor of BCWK, en de ketel). De inzet van deze productiemiddelen (zie paragraaf 3.3) wordt afhankelijk gekozen van de energievraag bij de gekozen teelt en teeltcondities (zie paragraaf 3.1). Hulpsystemen zoals pompen en motoren, die t.o.v. de hoofdcomponenten een marginaal elektriciteitsverbruik hebben, worden in de energetische jaarrondberekening niet expliciet meegemodelleerd, omdat dit de berekeningen aanzienlijk complexer zou maken. Wel is een geschat elektriciteitsverbruik voor deze componenten in de energievraag verdisconteerd.

2.3 Bedrijfseconomische uitgangspunten

Bij de berekening van de rentabiliteit worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. De (fictieve) tuinder is qua gas- en elektriciteitsinkoop een vrije klant, die zijn energiecontracten op de vrije markt afsluit. In de praktijk kunnen de contracten van klant tot klant, afhankelijk van zijn feitelijke situatie en inkoopkracht, verschillen. In deze studie is een realistische inschatting gemaakt van de marktprijzen van gas en elektriciteit (prijsniveau begin 2004).
2. Voor de inkoop van gas wordt uitgegaan van gasinkoop volgens het "Gas Verkoop Systeem 2004" van de Gasunie Trade & Supply (Gasunie T&S) voor vrije afnemers [5]. Net als in de voorloper het CDS (commodity-dienstensysteem) wordt hierin onderscheid gemaakt tussen een "commodity-component" en een "dienstcomponent" in de gasprijs. De diensten omvatten zowel transport- als capaciteitsdiensten.
3. Voor de commodity-prijs werd tot en met 2003 een prijsformule gehanteerd, waarbij de gasprijs één op één bepaald werd door de stookolieprijs, volgens de volgende formule [5]:

$$\text{Commod_prijs}^4 = (37.4/500) * P - 0.36302 \text{ (EURct/m}^3\text{)}$$

Hierin is P gelijk aan de waarde - gemiddeld over de drie maanden direct voorafgaande aan het kwartaal waarvoor de gasprijs geldt - van stookolie met een zwavelgehalte van 2 gewichtsprocent, uitgedrukt in euro per ton. (De factoren gelden bij een verbrandingswaarde van het aardgas (bovenwaarde) van 35.17 MJ/m³). De gehanteerde P-waarde bedraagt: 169.6 EUR/ton (prijs 4-de kwartaal 2003, [3]). Dit resulteert in een 'kale' commodity-prijs (exclusief energiebelasting (EB), zie punt 6) van 12.32 EURct/m³. Vanaf 2004 hanteert Gasunie T&S geen standaardprijsformule meer. De nieuwe prijsformules gaan uit van stookolieprijs en gasolieprijsbinding (en desgewenst ook kolenprijsbinding). De waarden van de parameters in de prijsformules zijn afhankelijk van het moment waarop een offerte wordt aangeboden. In deze studie zullen we uitgaan van een commodityprijs van 12.32 EURct/m³. Om het effect van wijzigingen in die prijs na te gaan zal bij de gevoeligheidsberekeningen van hoofdstuk 4 ook worden gerekend met een 50% hogere en een 25 % lagere commodity-prijs.
4. Bij de commodity dient de afnemer diensten te bestellen. De in rekening te brengen diensten zijn op te delen in een capaciteits- en een transportdienst. Bij deze diensten speelt

⁴ Soms wordt hier nog een korting opgegeven (bijvoorbeeld door AgroEnergy 0.227 EURct/m³)

de verdeling van de maximaal te contracteren uurhoeveelheid (de zogenaamde Contractcapaciteit) in Basislastcapaciteit en Additionele Capaciteit een belangrijke rol.

De Basislastcapaciteit is gelijk aan het jaarvolume gedeeld door 8760⁵ uur. Het verschil tussen de Contractcapaciteit en de Basislastcapaciteit wordt de Additionele Capaciteit genoemd. Voor de beschikbaarstelling van Additionele Capaciteit moet separaat worden betaald, voor de Basislastcapaciteit niet. Naarmate het gasverbruik grotere pieken vertoont, dient, als gevolg van de kosten voor additionele capaciteit, meer betaald te worden voor dezelfde hoeveelheid gas.

5. Transportdiensten: voor gas dat door Gasunie T&S geleverd wordt, brengt het transportkosten in rekening volgens het zogenaamde 'entry-exitsysteem'. Dit tariefensysteem is door Gastransport Services (GtS) op 1 januari 2003 ingevoerd voor transport van gas door het voormalige 'gasunie-net'. Dit systeem, dat zowel voor gastransport voor Gasunie T&S als voor transporten van derden geldt, is gebaseerd op 'entry-points' waar gas op het net wordt gezet en 'exit-points' waar gas aan het net wordt onttrokken. De volgende 'fees' worden in rekening gebracht:
 - *entry-fee*: voor de 'entry-zijde' van het transport heeft Gasunie T&S een vertaalslag gemaakt van de transportkosten, die het door GtS in rekening gebracht krijgt, naar een zogenaamde systeemfee. Deze capaciteitsgerelateerde systeemfee bestaat uit twee delen:
 - voor de basislastcapaciteit: EUR 15 per m³/uur per jaar
 - voor de additionele capaciteit: EUR 22 per m³/uur per jaar
 - *exit-fee*: afhankelijk van de locatie wordt (conform de systematiek van GtS) een exit-fee in rekening gebracht. Er zijn tussen de 750 en 800 verschillende exit-punten, die elk een eigen fee kennen. Voor deze studie wordt uitgegaan van gaslevering in midden Zuid-Holland en - meer in de detail - in Bleiswijk. De exit-fee hiervoor bedraagt EUR 22.58 per m³/uur per jaar (verschuldigd over de gecontracteerde capaciteit)
 - *connection fee*: de connection omvat het laatste deel van het transportnet richting de aangeslotene en omvat de aansluitleiding en de aansluiting, beter gezegd: de verbinding tussen het net van de aangesloten partij en dat van GtS. Voor bestaande gasontvangststations (onder de 3515 m³/uur) geldt een tarief van EUR 20.56 per m³/uur per jaar en dit tarief is verschuldigd over de gecontracteerde capaciteit.
6. Capaciteitsdienst: voor het beschikbaar stellen van capaciteit zijn de volgende vergoedingen verschuldigd [5]:
 - *basislast capaciteit*: hiervoor worden geen capaciteitskosten in rekening gebracht

⁵ tot 31 december 2003 was dit 8000 uur

- *additionele capaciteit*: hiervoor wordt een tarief van EUR 99.83 per m³/uur per jaar in rekening gebracht. Dit tarief wordt jaarlijks geïndexeerd. Voor het jaar 2004 bedraagt het geïndexeerde tarief voor additionele capaciteit EUR 104.40 per m³/uur per jaar.

7. Toeslag voor diensten van het regionale energiebedrijf: hier ingeschat op 1.36 EURct/m³ [6].

8. Belastingen aardgas: in 2004 zijn de brandstoffenbelasting (BSB) en de regulerende energiebelasting (REB) samengevoegd tot de energiebelasting (EB). Voor de tuinbouw gelden speciale (lage) tarieven (prijsniveau 2004):

0-5000 Nm ³ :	1.295 EURct/m ³
5000-170000 Nm ³ :	1.207 EURct/m ³
170000-1mln Nm ³ :	1.144 EURct/m ³
1-10 mln m ³ :	1.130 EURct/m ³
> 10 mln m ³ :	0.750 EURct/m ³ .

Voor eventuele vrijstelling zie punt 9.

9. *Stimuleringsmaatregelen WK 2004*: voor aardgas gebruikt in een WK-installatie (met een elektrisch rendement >30% en een minimale capaciteit van 60 kW_e) geldt een vrijstelling van energiebelasting (aan te vragen via gasleverancier). Verder wordt WKK gestimuleerd via de MEP-regeling (Milieukwaliteit ElektriciteitsProductie). Voor de 1-ste helft van 2004 geldt een tijdelijke regeling: vaste vergoeding voor aan het net geleverde elektriciteit van 0.57 EURct/kWh, zie ook punt 14. (Verder geldt voor eigen verbruik dat in dit half jaar uitkomt boven 5 mln kWh een zelfde vergoeding). Na 1 juli 2004 wordt de vaste vergoeding voor WKK vervangen door de zogenaamde CO₂-index-regeling. Het beginsel achter de MEP voor WKK is dat er een vergoeding komt voor zogenaamde CO₂-vrije kWh-en ('blauwe elektriciteit' genoemd). Hiertoe wordt WKK vergeleken met gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit. Voor de laatste 2 zijn referentie-installaties vastgelegd met een bepaald thermisch respectievelijk elektrisch rendement (afhankelijk van het jaar van inbedrijfname van de WKK). Bij de bepaling van het milieuvoordeel van WKK wordt uitgegaan van de hoeveelheid CO₂ die de WKK uitstoot. Vervolgens wordt nagegaan hoeveel CO₂ de referentieketel zou produceren, indien deze dezelfde hoeveelheid warmte zou produceren als de WKK. Het verschil van beide CO₂ hoeveelheden is hoeveelheid die 'over' is voor de referentie-elektriciteitscentrale, die binnen die uitstoot een bepaalde hoeveelheid elektriciteit kan produceren. Het verschil tussen de hoeveelheid elektriciteit opgewekt door de WKK en die door de referentiecentrale is de CO₂-vrije hoeveelheid. De CO₂-index is het percentage CO₂-vrije kWh-en betrokken op de totale elektriciteitsproductie van de WKK. Voor gasmotoren is de CO₂-index in verband met de uitvoerbaarheid

van de regeling sterk vereenvoudigd. De CO₂-index wordt niet gemeten, maar wordt 'forfaitair' bepaald en hangt af van motortype, bouwjaar en spanning van de netverbinding. Voor de bepaling van de uitkering hoeft alleen de hoeveelheid elektriciteit te worden gemeten. Voor de MEP-vergoeding komen in aanmerking:

- alle kWh-en geleverd aan het net (of aan derden)
- eigen gebruik > 10 mln kWh

De hoogte van de vergoeding is nog niet bekend, maar de verwachting is dat dit circa 2.1 Eurocent per "kWh CO₂-vrij" is (vergoeding = kWh_{MEP} * CO₂-index * 2.1 EURct).

Voor de BCWK is nog geen CO₂-index vastgesteld. Deze zal bepaald worden op basis van de hiervoor geschetste procedure.

10. Elektriciteitsprijzen: er wordt onderscheid gemaakt tussen plateau- en daluren (plateauren zijn de uren op maandag tot en met vrijdag van 7:00 uur 's ochtends tot 23:00 uur 's avonds; de overige uren zijn daluren). De volgende 'volumeprijzen' worden voor elektriciteitsinkoop gehanteerd (marktprijzen begin 2004, exclusief EB, zie punt 13):

- plateautarief: 6.0 EURct/kWh
- daltarief: 2.3 EURct/kWh.

Inclusief kWh-afhankelijke transportdiensten (zie 11) en systeemdiensten (zie 12) wordt dit:

- plateautarief: 6.9 EURct/kWh
- daltarief: 3.2 EURct/kWh.

11. Transporttarieven voor levering elektriciteit. De volgende 3 componenten worden meegenomen:

- vastrecht transportdienst: 480⁶ EUR/jr (MS: 136-2000 kW gecontracteerd vermogen)
- kW gecontracteerd: 12.18 EUR/kW
- kW max per maand: 1.21 EUR/kWmax per maand
- transportdienst per kWh 0.75 EURct/kWh

Voor teruglevering zijn geen 'transportafhankelijke kosten' ('kW gecontracteerd' en 'kW max per maand' en 'transportdienst per kWh') verschuldigd, wel het vastrecht.

12. Systeemdienstentarief: 0.112 EURct/kWh

Systeemdiensten zijn niet verschuldigd voor teruglevering (de eindverbruiker betaalt deze).

⁶ tarieven Continuon, januari 2004

13. EB elektriciteit: 0-10000 kWh: 6.54 EURct/kWh (exclusief BTW, 2004)
10000-50000 kWh: 2.12 EURct/kWh
50000-10 mln.kWh: 0.65 EURct/kWh
> 10 mln.kWh (zakelijk): 0.05 EURct/kWh

14. Terugleverprijzen elektriciteit:

- plateautarief: 5.2 EURct/kWh
- daltarief: 1.8 EURct/kWh

Prijzen zijn exclusief afdrachtskorting EB van 0.57 EURct/kWh (tot 30 juni 2004) of MEP-vergoeding conform CO₂-index-regeling (na 1 juli 2004). In deze studie is met de MEP-vergoeding gerekend onder de aanname van 2.1 EURct per kWh_CO₂-vrij⁷.

15. Projectevaluatieperiode: 15 jaar (periode waarover de kasstromen worden meegenomen in rentabiliteitsberekeningen)

16. (Technische) afschrijvingstermijn kapitaalgoederen: 15 jaar m.u.v. brandstofcelstack
vervangingsperiode MCFC-brandstofcelstack: 5 jaar
vervangingsperiode SOFC-brandstofcelstack: 10 jaar

17. Verdisconteringsrente: 6%

18. Bouw- en financieringsrente: 6%

19. Verzekeringspercentage: 0%

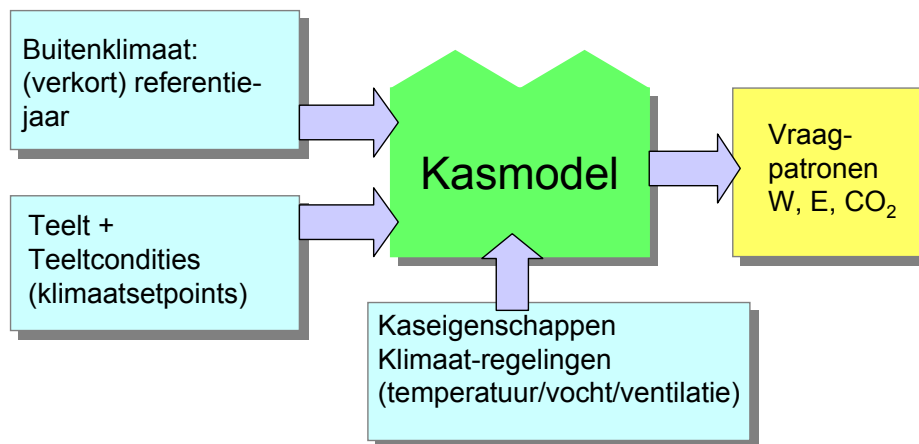
20. Er wordt geen rekening gehouden met inflatie

⁷ Kort voor het ter perse gaan van dit rapport is bekend geworden dat de MEP-vergoeding voor de tweede helft van 2004 is vastgesteld op 2.6 EURct/kWh. Dit valt ruim binnen de bandbreedte (0 – 4 EURct/kWh), die is gehanteerd in de gevoeligheidsberekeningen van paragraaf 4.4.

3 JAARRONDANALYSE

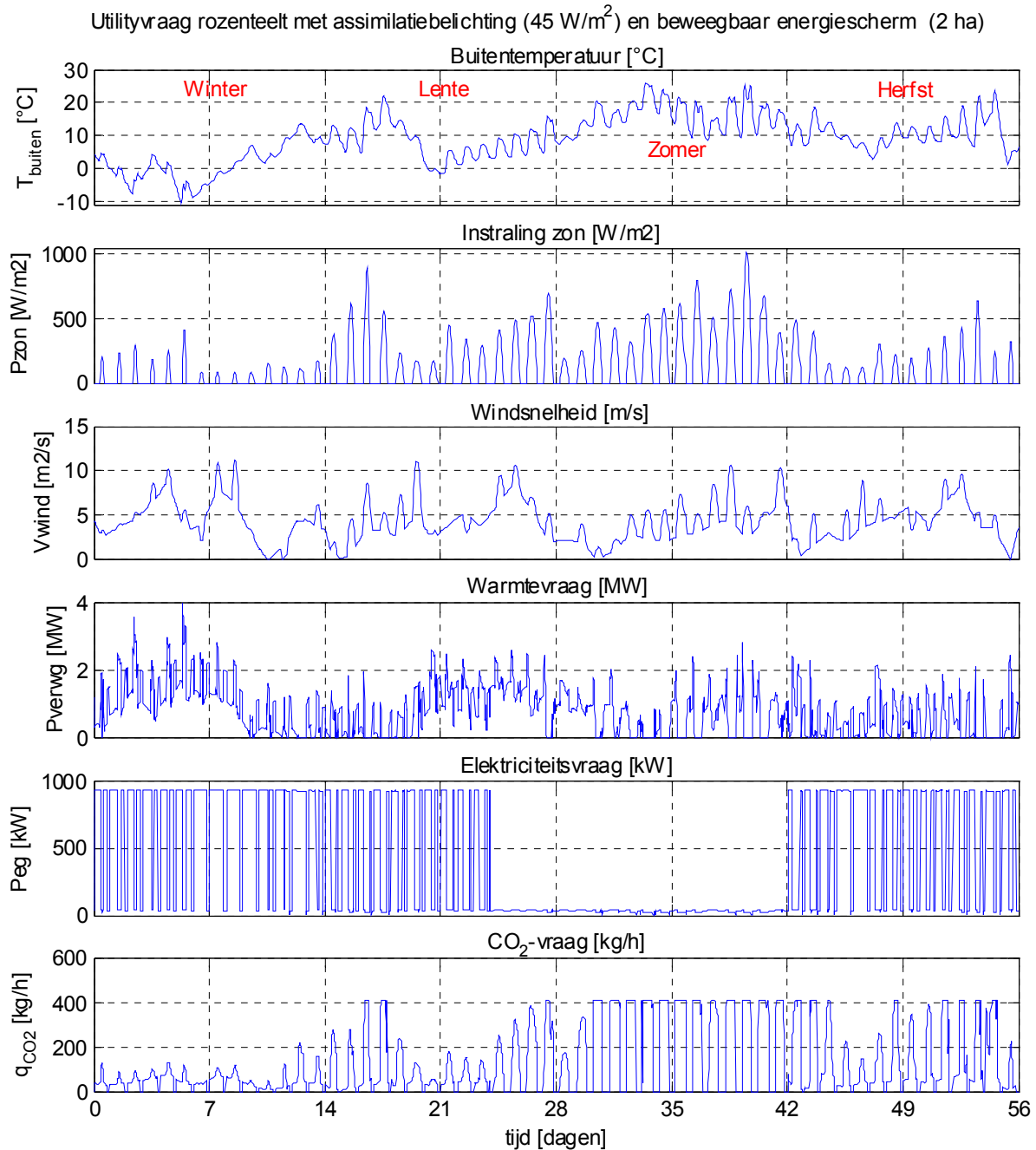
3.1 Vraagpatronen

Voor een goede bepaling van de gas- en elektriciteitsbehoefte is het een eerste vereiste te beschikken over representatieve vraagprofielen van warmte, elektriciteit en CO₂. Hierin moeten de kortstondige dag/nachtvariaties en de lange-termijn variaties (op seizoentijdschaal) voldoende in zijn verdisconteerd. De vraagprofielen zijn bepaald met behulp van een dynamisch kasmodel (i.c. SimKas, ontwikkeld door KEMA), dat afhankelijk van de bouwfysische kaskenmerken (zie bijlage A), de gewenste kasklimaatsetpoints (zie tabel 2.1) en een representatief buitenklimaat, de benodigde warmte-, CO₂- en elektriciteitsstromen berekent. De werkwijze is schematisch getekend in figuur 3.1. Voor het buitenklimaat is uitgegaan van het Verkort Referentiejaar (volgens NEN 5060). De achtergronden hiervan zijn gegeven in bijlage B.



Figuur 3.1 Schematische voorstelling berekeningswijze van vraagpatronen voor warmte (W), elektriciteit (E) en CO₂ voor een kas. Centraal staat een dynamisch procesmodel van de kas.

Figuur 3.2 geeft een voorbeeld van een set vraagpatronen zoals bepaald voor belichting met een elektrisch vermogen van 45 W_e/m².



Figuur 3.2 Vraagpatronen voor een rozenteelt (2 ha) met assimilatiebelichting ($45 \text{ W}_e/\text{m}^2$) voor het Verkort Referentiejaar. De CO_2 -vraag is begrensd op een maximumwaarde van 410 kg/h . De vijfde 'stripplot' van boven laat duidelijk zien wanneer de assimilatiebelichting in bedrijf is.

De belangrijkste kenmerken van de energie- en CO_2 -vraag voor de verschillende belichtings-situaties zijn samengevat in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Overzicht jaarvraag warmte, elektriciteit en CO₂ bij de verschillende belichtingsniveaus

Jaarvraag 'utilities' voor belichte rozenteelt	niveau 1	niveau 2	niveau 3	niveau 4	Opmerking
belichtingsniveau (W _e /m ²)	45	60	75	90	elektr.vermogen incl.kabelverliezen
belichtingsniveau (lux)	4880	6500	8130	9760	o.b.v. SON-T Green Power
aantal uren belichten (uur)	3650	3650	3650	3650	aan in periode 1 sept-30 april als globale instraling buiten <125 W/m ² (niet tussen 20 en 24 uur)
warmtevraag (GJ/m ²)	1.216	1.088	1.003	0.944	aanvullend aan verwarming die door belichting wordt geleverd
elektriciteitsvraag (kWh/m ²)	175	229	283	338	belichting + pompen / ventilatoren
(GJ _e /m ²)	0.63	0.824	1.02	1.22	
CO ₂ -vraag (kg/m ²)	51.0	51.6	56.0	61.7	vraagniveau begrensd op 205 (kg/h)/ha

3.2 Systeemconfiguraties

De volgende systeemconfiguraties zijn doorgerekend:

1. alternatief systeem 1: MCFC-WK + ketel + warmtebuffer⁸
2. alternatief systeem 2: SOFC-GT-WK + ketel + warmtebuffer
3. referentie systeem: gasmotor-WK + rookgasreiniging + ketel + warmtebuffer

Ad 1 MCFC-WK + ketel + warmtebuffer: voor het gesmolten-carbonaat brandstofcel-warmtekrachtsysteem (MCFC-WK) wordt uitgegaan van het zogenaamde "Hot-Module" systeem dat door MTU uit Duitsland op de markt gebracht wordt. De brandstofcellen die hierin worden toegepast, zijn/worden gefabriceerd door Fuel Cell Energy Inc. (USA). Eén hot-module (type HM300) heeft een elektrisch vermogen van circa 250 kW_e. Voor systemen met een groter elektrisch vermogen worden meerdere modules parallel geplaatst. Figuur 3.3 geeft een 'artist-impression' van een Hot-Module BCWK systeem. Eind 2003 waren er wereldwijd circa 15 Hot Modules geplaatst bij verschillende bedrijven en instellingen als praktijkdemonstraties. Vanaf 2006 wordt serieproductie van de Hot Module verwacht.

De belangrijkste eigenschappen van het Hot-Module systeem zijn samengevat in tabel 3.2. De tweede kolom geeft cijfers van één van de eerste praktijkdemo's (conservatief scenario), de derde die van het ontwerp van het (HM300) systeem (realistisch scenario). Verder is een inschatting gemaakt voor de kenmerken van een geoptimaliseerd toekomstig systeem ('optimistisch scenario').

⁸ MCFC = molten carbonate fuel cell (gesmolten carbonaat brandstofcel), SOFC = solid oxide fuel cell (vast-oxide brandstofcel). De werking van de brandstofcellen is uitgelegd in hoofdstuk 3 van [2].

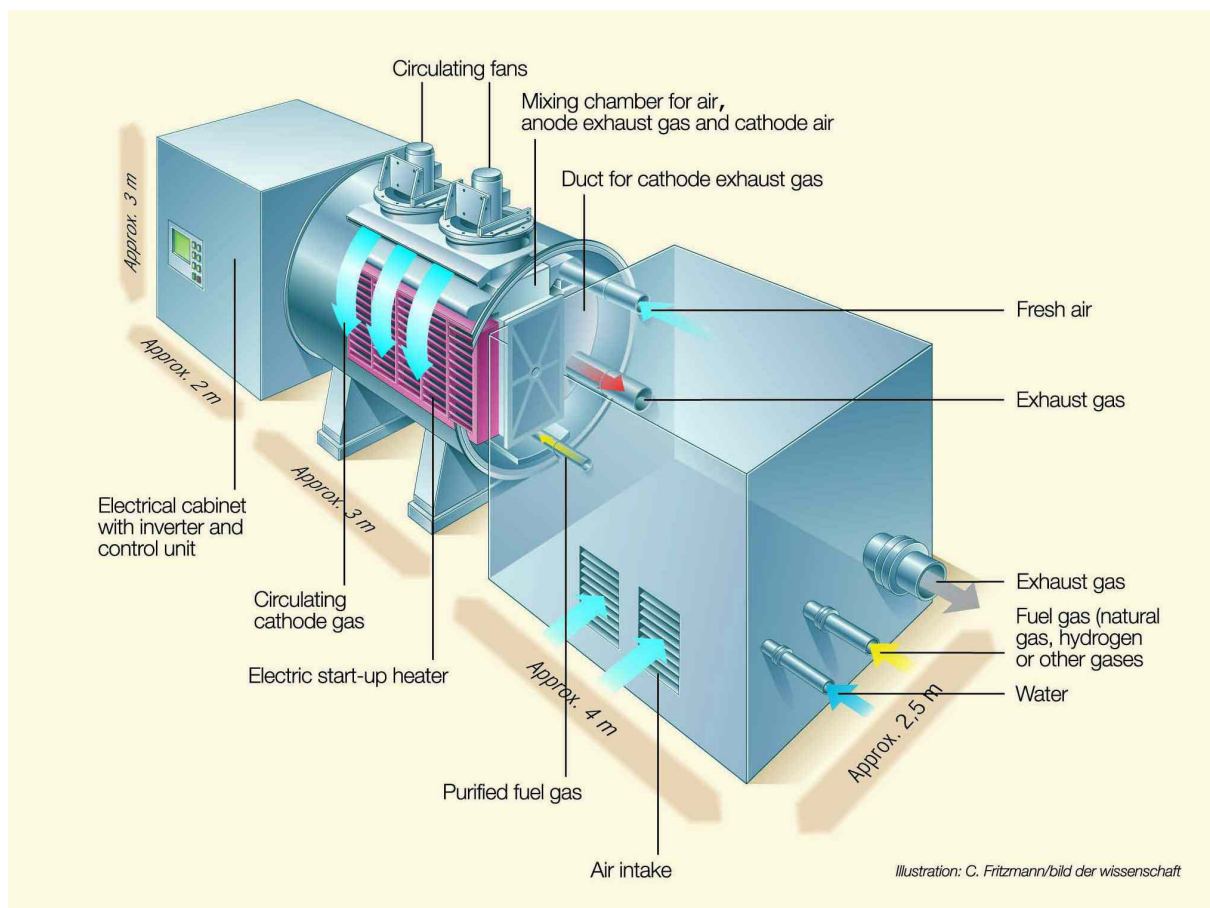
Tabel 3.2 Overzicht belangrijkste eigenschappen van Hot-Module MCFC-WK (voor 3 verschillende scenario's)

eigenschap	praktijkdemo (conservatief)	ontwerp (realistisch)	toekomstig (optimistisch)	Opmerking
elektrische vermogen	238 kWe	245 kWe	260 kWe	wisselspanning na wisselrichter
thermisch vermogen	180 kW *)	224 kW **)	214 kW	bij afkoeling van rookgassen tot ca 50 °C
elektrisch rendement (vollast)	45.6%	47%	50%	betrokken op wisselspanning
thermisch rendement	35.5% ***)	43%	41%	bij elektrische vollast situatie

*) Dit vermogen is vermeld op het datablad van de HM300, waarbij een (rookgas?)temperatuur genoemd is van ca 55 °C. Dit vermogen is kleiner dan het eveneens vermelde maximale systeemrendement suggereert (90% → 224 kW)

**) Dit vermogen is afgeleid van het op het datablad vermelde maximale systeemrendement en het elektrisch rendement.

***) Op basis van het getabelleerde thermische vermogen zou het thermisch rendement 34.5% bedragen. Op basis van andere informatie lijkt een iets hoger thermisch rendement nu al haalbaar. In de 'cases' is gerekend met 35.5% (zie ook *).



Figuur 3.3 Artist impression van de Hot-Module BCWK van MTU. Het systeem bestaat uit 3 onderdelen: een stalen vat met de brandstofcel-stack, een gasbehandelingsstelsysteem en een 'elektrokast' met de wisselrichter en regelenheid. Voor de productie van heet water wordt een rookgaskoeler in de 'exhaust gas' stroom geplaatst (bron: MTU).

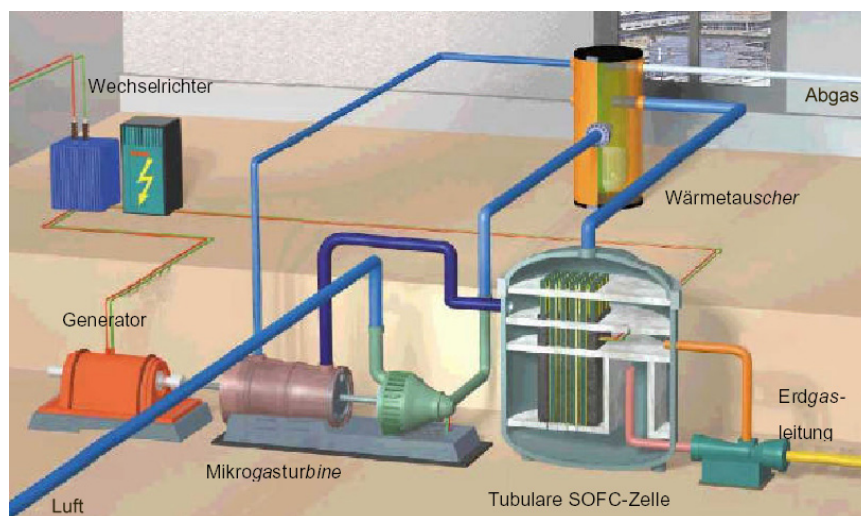


Figuur 3.4 Assemblage van Hot-Module (bron: MTU)

De verbruiksberekeningen van §3.4 zullen worden uitgevoerd voor zowel het conservatieve, het realistische en optimistische scenario. Voor de elektrische en thermische rendementen zullen de waarden worden gehanteerd zoals vermeld in tabel 3.2.

Ad 2: SOFC-GT+ketel+buffer

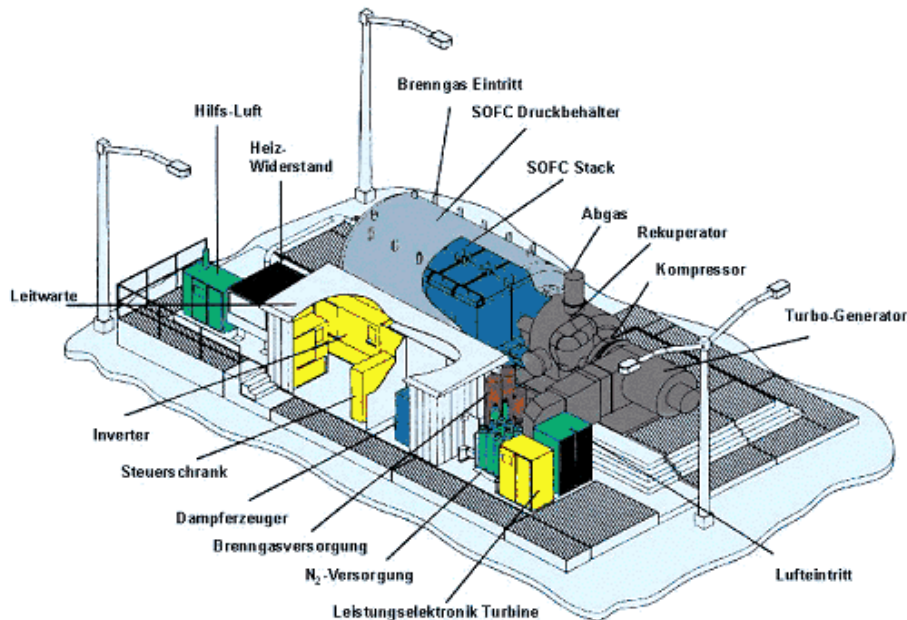
Het hybride SOFC-GT systeem bestaat, zoals in [2] §4.6 is aangegeven, uit een combinatie van een hoge-temperatuur 'vast-oxide brandstofcelstack' (SOFC-stack) en een microturbine. De SOFC-stack fungeert als een soort verbrandingskamer voor de microturbine. Zowel de SOFC-stack als de generator van de microturbine produceren elektriciteit. Het principe van het systeem is schematisch weergegeven in figuur 3.5.



Figuur 3.5 Principeschema SOFC-GT-systeem. (bron: [14])

Figuur 3.6 geeft een 3D-impresie van een ontwerp van een 1 MW SOFC-GT systeem.

Siemens Westinghouse 1 MW SOFC/GT Hybrid-Anlage



Figuur 3.6 3D-impresie van een ontwerp van een hybride brandstofcel-microturbine systeem van 1 MW (bron: Siemens-Westinghouse).

SOFC-GT systemen zijn nog volop in ontwikkeling. In het National Fuel Cell Research Center (NFCRC) in Californië is een 220 kWe SOFC-GT systeem gedemonstreerd. Bij deze (eerste) demo, waarbij de grootte van de SOFC-stack en de microturbine nog niet goed op elkaar waren afgestemd, is een elektrisch rendement van 52.4% aangetoond. Bij een goede afstemming had het rendement volgens het NFCRC zeker 57% kunnen bedragen. Bij ontwerpstudies voor nieuwere generatie SOFC-GT systemen – met elektrische vermogens van ca 300 kW respectievelijk 1 MW - wordt uitgegaan van nog veel hogere elektrische rendementen. 70% wordt haalbaar geacht. In deze haalbaarheidsstudie zullen we bij de evaluatie van de SOFC-GT-installatie - net zo als bij die van de MCFC-installaties - uitgaan van een conservatief, een realistisch en een optimistisch scenario. De belangrijkste kenmerken van elk van de scenario's is gegeven in tabel 3.3. Het elektrische vermogen is daarbij geschaald naar de elektriciteitsvraag van 2 ha kas met $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$ geïnstalleerd vermogen voor belichting (zie tabel 2.1 en tabel A.1). Voor de andere belichtingsniveaus zijn uiteraard andere vermogens nodig. Het nominale vermogen van de BCWK zal dan overeenkomstig het belichtingsniveau worden verhoogd.

SOFC-GT systemen zijn op dit moment nog niet commercieel verkrijgbaar, De marktintroductie waarbij de systemen tegen een enigszins concurrerende prijs leverbaar zullen zijn, wordt verwacht vanaf 2008 à 2010.

Tabel 3.3 Overzicht belangrijkste eigenschappen van SOFC-GT-WK-installatie (voor 3 verschillende scenario's) geschaald naar het benodigde vermogen voor 2 ha kas met een geïnstalleerd belichtingsvermogen van $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$.

eigenschap ↓	scenario →	conservatief	realistisch	optimistisch	Opmerking
elektrische vermogen		914 kWe	914 kWe	914 kWe	wisselspanning na wisselrichter
thermisch vermogen		435 kW	361 kW	296 kW	bij afkoeling van rookgassen tot ca 50 °C
elektrisch rendement (vollast)		55.0%	64.5% ^{*)}	69.5% ^{**)}	betrokken op wisselspanning
thermisch rendement		26.6%	25.5%	22.5%	bij elektrische vollast situatie
totaal rendement		81.6%	90%	92%	

^{*)} Bij ca 85% van het vollast (elektrisch) vermogen is het elektrisch rendement maximaal (ca 65%), zie [7]

^{**)} Bij ca 85% van het vollast (elektrisch) vermogen is het elektrisch rendement maximaal (ca 70%).

Ad 3 referentiesysteem: gasmotor-WK + rookgasreiniging + ketel + warmtebuffer: Voor de eigenschappen van de gasmotor in het referentiesysteem is (voor het realistische scenario) uitgegaan van de prestatiekenmerken van een Jenbacher JGS 316 GS-NL. Ook hier worden de vermogens herschaald naar de grootte van de kas en het geïnstalleerde belichtingsvermogen. Voor de $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$ case, zijn de vermogens (en rendementen) gegeven in tabel 3.4.

Tabel 3.4 Overzicht belangrijkste eigenschappen van gasmotor-WK-installatie (voor 3 verschillende scenario's) geschaald naar het benodigde vermogen voor 2 ha kas met een geïnstalleerd belichtingsvermogen van $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$. Als primaire referentie zal het realistische scenario worden gehanteerd (gebaseerd op Jenbacher JGS 316 GS-NL).

eigenschap ↓	scenario →	conservatief	realistisch	optimistisch	Opmerking
elektrische vermogen		914 kWe	914 kWe	914 kWe	wisselspanning
thermisch vermogen		1179 kW	1175 kW	1022 kW	bij afkoeling van rookgassen tot ca 50 °C
elektrisch rendement (vollast)		38.0%	38.8% ^{*)}	42.5% ^{**)}	
thermisch rendement		49.0%	49.9%	47.5%	bij elektrische vollast situatie
totaal rendement		87.0%	88.7%	90.0%	

^{*)} Bij deellast loopt het elektrisch rendement relatief hard terug. Bij 50% is het rendement ca 35.9% en bij 25% nog maar 31.1%.

Voor de ketel wordt in alle drie gevallen een capaciteit gekozen, waarmee de volledige warmtevraag kan worden gedekt (nodig voor het geval dat de (BC)WK niet beschikbaar is, zie uitgangspunt 3 in §2.2). Voor de buffer wordt een capaciteit genomen van 100 m³/ha (zie uitgangspunt 4 in §2.2).

3.3 Inzetstrategieën

Uitgangs- en aandachtspunten bij de bepaling van geschikte inzetstrategieën voor de BCWK zijn de elektriciteits-, CO₂- en warmtevraagprofielen van de teelt (zie §3.1) en de intrinsieke eigenschappen van de brandstofcelsystemen ten aanzien van onder meer regelbaarheid, regelbereik, vollast/deellast-rendement en start/stop gedrag (zie ook [2], §4.3 en §4.6). De belangrijkste facetten waarmee rekening gehouden moet worden, zijn:

warmte/elektriciteitsvraag

- de elektriciteitsvraag in de situatie van belichting is relatief groot ten opzichte van de situatie zonder belichting (verhouding > 10). Dit betekent dat de WK in principe uit kan als er niet belicht wordt (tenzij de WK ook gebruikt wordt voor CO₂-dosering). Als de WK toch in bedrijf is of komt op tijden dat er niet wordt belicht, dan wordt vrijwel alle geproduceerde elektriciteit teruggeleverd aan het net.
- de warmtevraag kan sterk fluctueren over een dag (er kunnen veranderingen van meer dan 1 MW/ha per uur optreden (bij bijvoorbeeld het opentrekken van het scherm)).

regelbaarheid brandstofcelsystemen

- het regelbereik van een MCFC-eenheid is ca 8%-100% van het nominale elektrische vermogen
- de op- en afregelsnelheid van een MCFC is relatief (ten opzichte van bijvoorbeeld een gasmotor) zeer laag. De leverancier van de Hot Module verwacht voor toekomstige systemen voor de overgang van minimumlast naar vollast een tijdsduur in de ordegrrootte van enige uren (idem voor de overgang van vollast naar minimumlast). Voor de huidige generatie is dat nog 1 à 2 dagen (zie [2], §4.3).
- een MCFC unit kan niet zomaar worden ingeschakeld. Een koude start kost ca 16 à 20 uur (zie [2], §4.3).
- een MCFC-systeem kan met behulp van een (elektrische) heater op temperatuur worden gehouden ('hot-stand-by'). Bij een 250 kW_e-eenheid is circa 20 kW_e nodig voor het op temperatuur houden (dit vermogen kan desgewenst ook door de stack zelf geleverd worden). Starten vanuit een 'hot-stand-by'-toestand en opregelen naar 20 kW_e kost enkele minuten.
- het regelbereik van een SOFC/GT-systeem is circa 60-100% van de nominale elektrische belasting
- het opstarten van een koude SOFC-stack vanaf kamertemperatuur kost circa 24 uur
- een SOFC-stack kan in ca 10 minuten van minimumlast naar vollast worden opgeregeld
- om een SOFC-systeem op hot-stand-by te houden, is het, naast het middels elektrische verwarming op temperatuur houden, nodig het stacksysteem continu te 'purgen' met zogenaamde schutgassen (reducerend gas, bijvoorbeeld waterstof/stikstof mengsel, voor

de anode en oxiderend gas (lucht) voor de kathode. Het reducerende mengsel zou bijvoorbeeld met een electrolyser kunnen worden gemaakt. Dit vraagt echter een extra installatie en besturing en verder extra elektrische energie naast het al forse verbruik voor de elektrische heater. Gezien de complexiteit en kosten van de extra voorzieningen en het hoge elektrische energieverbruik, stellen we dat 'hot-stand-by' bedrijf voor de SOFC/GT-combinatie niet zinvol is.

- een overzicht van het 'hot-stand-by' bedrijf en de op- en afregelkenmerken is gegeven in tabel 3.5.

Tabel 3.5 Overzicht van minimumlast, 'hot-stand-by' bedrijf en op- en afregelsnelheid van MCFC en SOFC-GT systeem.

	Koude start-up tijd	Warme start-up tijd (van hot-stand-by naar min.last)	Minimum deel-last	Hot stand-by E-verbruik	Snelheid opregelen hot-stand-by naar full-load	Snelheid opregelen full-load naar hot-stand-by
	uur	minuten		kW _e		
MCFC*) (Hot Module)	16-20	enkele	8%	20 kW _e (eventueel opgewekt door stack)	nu: 1-2 dagen in de toekomst: enkele uren	nu: ca 1 dag toekomst: enkele uren
SOFC-GT	24	**)	60% ***)	onbekend**)	nog onbekend	nog onbekend

*) data afkomstig uit correspondentie met MTU, d.d. 24-11-03

**) voor een combinatie van een SOFC en GT is het nog onduidelijk of een hot-stand-by toestand mogelijk is. Bij een lage deellast horen lage lucht- en uitlaatgassnelheden. Als de luchtsnelheid te laag wordt, kan de compressor van de gasturbine in een gebied terechtkomen waarin deze niet kan functioneren ('surge-gebied'). Om het benodigde thermische vermogen voor hot-stand-by van de SOFC-stack op te wekken met diezelfde stack, zal de daarvoor benodigde luchtstroom met een aparte ventilator moeten worden aangevoerd (daar de GT-compressor dan niet goed werkt).

***) opregelen van minimumlast naar vollast naar verwachting in circa 10 à 15 minuten [2].

Uit het bovenstaande volgt, dat het geen zin heeft om met een MCFC of SOFC/GT systeem start-stopbedrijf te voeren. In de toekomst kan overwogen worden met de MCFC 'belast'↔ 'hot-stand-by' bedrijf te voeren of 'vollast'↔ 'minimum-last' bedrijf. Op dit moment is de modulerbaarheid van het MCFC-systeem nog zodanig, dat eigenlijk alleen 'fixed-load' bedrijf mogelijk is. We zullen hier vooralsnog dan ook van uit gaan. (In bijlage C zijn enkele overwegingen gegeven die een rol spelen, zodra in de toekomst 'belast'↔ 'hot-stand-by' bedrijf mogelijk wordt met acceptabele af- en opregelsnelheden).

'Fixed-load' bedrijf betekent in het geval van assimilatiebelichting, dat de BCWK op vollast wordt bedreven en in het belichtingsseizoen na uitschakeling van de belichting in bedrijf blijft. De installatie kan dan zodra de belichting weer in bedrijf moet, onmiddellijk de benodigde elektriciteit leveren. In de tussentijd zal de elektriciteit echter elders moeten worden verbruikt. Het ligt voor de hand de elektriciteit in deze situatie terug te leveren aan het openbare net. In

het belichtingsseizoen zal deze ‘overtollige’ elektriciteitsproductie vooral overdag plaats vinden. Dit heeft het voordeel dat (op door-de-weekse dagen) de hogere terugleververgoeding mag worden verwacht, die hoort bij de zogenaamde ‘plateau-uren’. Voor de bedrijfseconomische analyses zullen we wat betreft het ‘fixed-load’ bedrijf nog twee varianten onderscheiden:

1. *vollastbedrijf gedurende het belichtingsseizoen*. Daarbuiten is de BCWK uit bedrijf. In het belichtingsseizoen wordt de benodigde CO₂ (voor zover mogelijk) met de BCWK geleverd. Daarbuiten met de ketel. Een eventueel tekort in het belichtingsseizoen wordt additioneel als zuivere CO₂ bijgesuppleerd.
2. *vollastbedrijf gedurende het hele jaar (‘altijd aan’)*. CO₂-dosering geschiedt met de BCWK. Een eventueel tekort wordt additioneel als zuivere CO₂ bijgesuppleerd.

Tabel 3.6 geeft een overzicht van de uitgevoerde simulaties (per belichtingsniveau). Voor elk van de BCWK-alternatieven worden voor beiden hierboven genoemde inzetstrategieën 3 scenario’s onderzocht (die verschillen in elektrisch en thermisch rendement). Dit betekent 2x3x2=12 (jaarrond)simulaties per belichtingsniveau (+ 1 voor het referentiesysteem).

Tabel 3.6 Overzicht uitgevoerde simulaties per belichtingsniveau

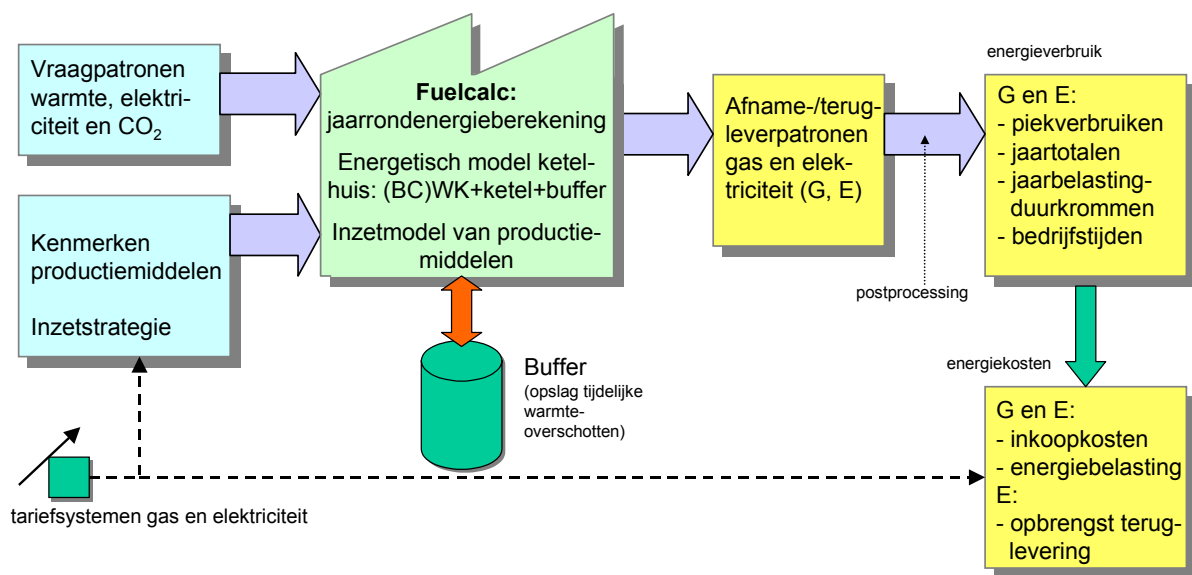
nr	systeem	nominaal elektrisch rendement	nominaal thermisch rendement	inzetstrategie	opmerking Scenario
0	gasmotor WK	38.8%	49.9%	gasmotor in bedrijf voor belichting, CO ₂ (en eventueel resterende warmtevraag als buffer leeg is)	realistisch
1	MCFC-nu	45.6%	35.5%	continu aan	conservatief
2	MCFC-nu	45.6%	35.5%	alleen in belichtingsseizoen aan ^{*)}	conservatief
3	MCFC- 2005 ^{**)}	47%	43%	continu aan	realistisch
4	MCFC- 2005	47%	43%	alleen in belichtingsseizoen aan	realistisch
5	MCFC-2006/2007	50%	41%	continu aan	optimistisch
6	MCFC-2006/2007	50%	41%	alleen in belichtingsseizoen aan	optimistisch
7	SOFC-GT-nu	55%	26.6%	continu aan	conservatief
8	SOFC-GT-nu	55%	26.6%	alleen in belichtingsseizoen aan	conservatief
9	SOFC-GT-2010	64.5%	25.5%	continu aan	realistisch
10	SOFC-GT-2010	64.5%	25.5%	alleen in belichtingsseizoen aan	realistisch
11	SOFC-GT-2015	69.5%	22.5%	continu aan	optimistisch
12	SOFC-GT-2015	69.5%	22.5%	alleen in belichtingsseizoen aan	optimistisch

^{*)} gedurende 24 uur per dag

^{**)} het jaartal geeft aan wanneer het rendement wordt verwacht

3.4 Verbruiksberendingen

Op basis van een 'inzetmodel' (genaamd "FuelCalc") waarin de belangrijkste kenmerken van de energieproductiemiddelen zijn opgenomen en tevens de gekozen inzetstrategie is geïmplementeerd, wordt de inzet van elk van de productiemiddelen over het (verkorte) referentiejaar bepaald en het bijbehorende gas- en elektriciteitsverbruik. De structuur van de energieberekeningen is schematisch getekend in figuur 3.7. De energieberekeningen leveren als eindresultaat onder meer de jaartotalen van de gas- en elektriciteitsinkoop en elektriciteitsverlevering evenals de piekverbruiken en verdeling over dal- en piekuren. De hoofdresultaten zijn gegeven in paragraaf 3.5. In hoofdstuk 4 zijn uitgaande van de kenmerken van het energieverbruik en van de verwachte energiecontracten de energiekosten berekend, die een cruciale rol spelen in de rentabiliteitsberendingen.



Figuur 3.7 Schematische voorstelling van de jaarrond energieberekeningen

3.5 Resultaten energieberekeningen

3.5.1 Belichtingsniveau 45 We/m² (ca 4880 lux)

In deze paragraaf worden voor de verschillende simulaties de hoofdresultaten van de energieberekeningen gegeven, zoals geschetst in figuur 3.7. Tabel 3.7 geeft voor een belichtingsvermogen van 45 W/m² de jaarrond-energiecijfers van de belangrijkste MCFC-varianten in vergelijking met die van het referentiesysteem. Het referentiesysteem bestaat uit een gasmotor-WK, een ketel en een warmtebuffer (§3.2). Voor het elektrisch en thermisch rende-

ment van de gasmotor zijn de waarden van het realistische scenario genomen (zie tabel 3.4). Deze waarden gelden voor een commercieel verkrijgbare gasmotor van ca 900 kWe.

De MCFC-varianten die met de referentie zijn vergeleken in tabel 3.7 zijn⁹:

1. MCFC-WK met conservatief rendement; regelstrategie: BCWK altijd aan
3. MCFC-WK met realistisch rendement; regelstrategie: BCWK altijd aan
5. MCFC-WK met optimistisch rendement; regelstrategie: BCWK altijd aan
4. MCFC-WK met realistisch rendement; regelstrategie: BCWK altijd aan in belichtingsseizoenen en uit daarbuiten (de CO₂ wordt dan met de ketel geproduceerd).

Tabel 3.7 Overzicht jaarrondenergiecijfers MCFC-varianten voor belichtingsniveau van 45 W/m²

Jaarrondcijfers belichte roze teelt met MCFC-WK	Referentie					per m ² per jaar
	0	1	3	5	4	
Energiesysteem: ↓ type →	gasmotor	MCFC-WK	MCFC-WK	MCFC-WK	MCFC-WK	
referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel	realist.rend.	conserv.rend	realist.rend	optim..rend	realist.rend	
Belichtingsniveau: 45 W/m ²		altijd	altijd	altijd	altijd in belichtseizoen	
BCWK in als →		altijd	altijd	altijd	altijd in belichtseizoen	
CO ₂ -dosering door	WK	BCWK	BCWK	BCWK	BCWK/ketel	eenheid
Jaargasverbruik	90.5	111.6	106.4	102.1	92.6	m ³
Reductie gasverbruik		-21.1	-15.9	-11.6	-2.1	m ³
Procentuele besparing op gasverbruik		-23.3%	-17.6%	-12.8%	-2.3%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.4	0.8	0.8	0.8	2.2	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	2.8	1.4	1.4	1.4	3.0	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	4.2	2.2	2.2	2.2	5.2	kWh
Procentuele besparing op totaal E-inkoop		46.4%	46.4%	46.4%	-26.0%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	73.4	122.7	122.7	122.7	66.1	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	32.5	104.8	104.8	104.8	42.0	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	106.0	227.5	227.5	227.5	108.0	kWh
Procentuele toename totaal E-verkoop		115%	115%	115%	2%	
Piekgasafname	0.0315	0.0344	0.0336	0.0332	0.0311	m ³ /h
Procentuele reductie piekafname		-9.4%	-6.8%	-5.6%	1.1%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	2 879	3 244	3 167	3 077	2 979	uur
totaal aantal draaiuren ketel	1 612	1 701	1 465	1 664	3 378	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 899	8 670	8 760	8 760	6 078	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		0.3	0.8	2.0	0.2	kg
Overschot warmte (buffer vol)	0.327	0.247	0.373	0.286	0.460	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	64.5	53.9	48.8	44.5	66.3	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		10.5	15.7	20.0	-1.9	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	2.268	1.897	1.715	1.565	2.333	GJ/m ²
Procentuele reductie primair energieverbruik		16.3%	24.4%	31.0%	-2.9%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.114	0.095	0.086	0.079	0.117	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.019	0.028	0.035	-0.003	ton
Procentuele reductie CO ₂ -emissie		16.3%	24.4%	31.0%	-2.9%	

**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde

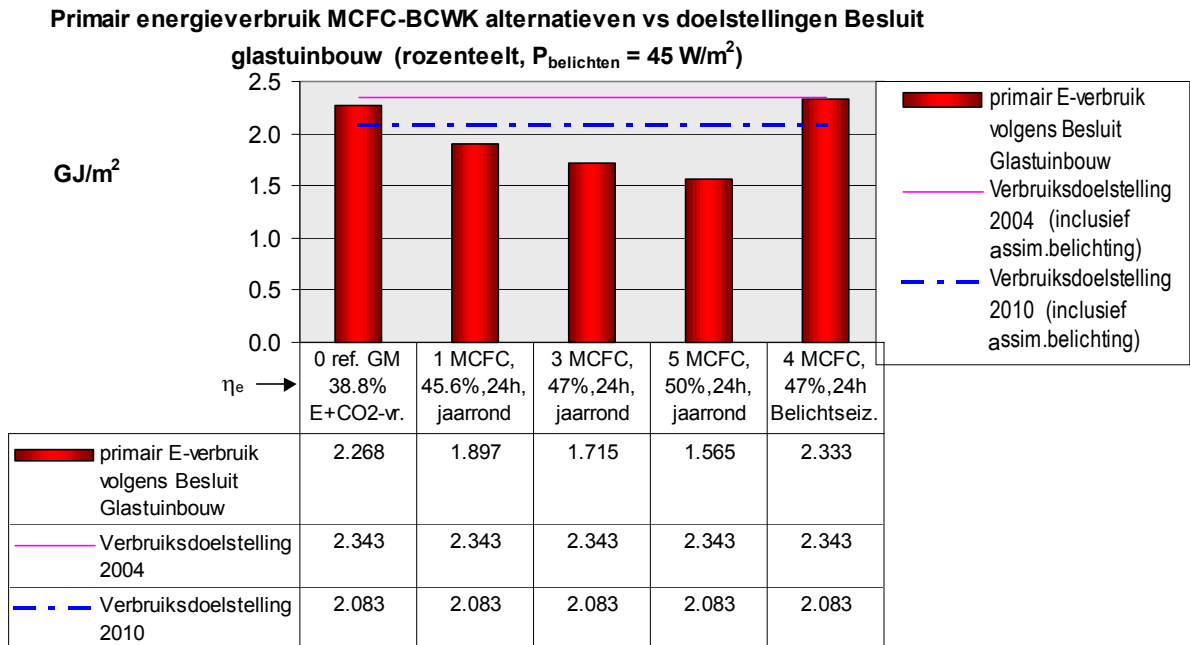
⁹ De andere twee varianten waarbij de BCWK alleen in het belichtingsseizoenen aan is, zijn uit plaatsgebrek weggelaten. Het bleek dat de varianten met de BCWK continu aan energetisch en economisch beter scoorden dan die alleen in het belichtingsseizoenen aan waren. Variant 4 laat dit zien (vergelijk bijvoorbeeld het primair energieverbruik met dat van variant 3).

Uit tabel 3.7 blijkt dat de verschillen tussen de varianten en referentie vooral zitten in:

- gasverbruik: bij de BCWK-varianten 1, 3 en 5, die het hele jaar aan staan, is dat (uiteraard) hoger dan bij de referentie (respectievelijk 23.3%, 17.6% en 12.8% meer). Bij variant 4, waarbij de BCWK alleen in het belichtingsseizoen 24 uur per dag aan is, is het gasverbruik iets hoger (2.3%) dan bij de referentie.
- elektriciteitsverkoop is bij variant 1, 3 en 5 meer dan verdubbeld (+115%) ten opzichte van de referentie. Bij variant 4 is dit ca 2 kWh/m² meer (ca 2%)
- het piekgasverbruik van de “altijd aan” varianten is iets gestegen (ca 9%, 7% en 6%). De bedrijfstijd van de gasafname is echter toegenomen (met 365, 288 en 198 uur)¹⁰
- Het primair energieverbruik¹¹ van de “altijd-aan” varianten is met 10.5, 15.7 respectievelijk 20.0 m³_{ae}/m² gedaald. Procentueel komt dit overeen met een daling van 16.3%, 24.4% respectievelijk 31%!
- Uitgedrukt in GJ per m², zoals voorgeschreven voor de energieregistratie in het Besluit glastuinbouw, wordt het primair energieverbruik van de “altijd-aan” varianten, respectievelijk 1.90, 1.72 respectievelijk 1.57 GJ/m² tegen 2.27 bij het referentiesysteem, zie ook figuur 3.8.
- In figuur 3.8 is ook het normverbruik van een rozenteelt met de ‘energietoepassing assimilatiebelichting’ aangegeven voor de jaren 2004 en 2010. In 2004 voldoen alle varianten (en ook de referentie). Bij variant 4 en de referentie is er echter nauwelijks nog marge. In 2010 voldoen de referentie en variant 4 niet meer. Variant 1, 3 en 5 blijven ook dan nog royaal onder de norm.
- Bij de MCFC-varianten is er op jaarbasis een klein tekort aan CO₂ in vergelijking met de berekende CO₂-vraag (zie §3.1). Het tekort is groter naarmate het elektrisch rendement van de BCWK groter is. Dit komt omdat bij een beter elektrisch rendement er minder aardgas nodig is om een bepaald elektrisch vermogen (i.c. het belichtingsvermogen) op te wekken er dus ook minder CO₂ wordt geproduceerd. (Variant 4 heeft in vergelijking met variant 3 met hetzelfde rendement een wat kleiner CO₂-tekort, omdat hier de CO₂ in de zomer met de ketel wordt geproduceerd, die qua capaciteit groot genoeg is om de volledige, actuele CO₂-vraag in te vullen.)
- Bij zowel de referentie als alle varianten is er op jaarbasis een warmteoverschot. Bij de referentie is dit het geval omdat er in de zomer met de gasmotor CO₂ wordt geproduceerd, terwijl de daarbij geproduceerde warmte niet altijd nodig is in de daarop volgende nacht. Bij de “altijd-aan” varianten wordt gedurende het hele jaar warmte geproduceerd, die grotendeels direct of in de nacht kan worden gebruikt, maar op bepaalde warme dagen niet volledig nodig is.

¹⁰ Het piekverbruik kan nog worden gereduceerd door een andere bufferstrategie te hanteren in de winter

¹¹ Bepaald op bovenwaarde met de rendementsfactoren uit het Besluit glastuinbouw, uitgedrukt in m³ aardgas equivalent



Figuur 3.8 Primair energieverbruik van referentie en MCFC-varianten, afgezet tegen de energienorm in 2004 en 2010 (rozenteelt, belichting $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$)

- Ter illustratie van de rekenmethodiek zijn in bijlage D de tijdsplots van de belangrijkste resultaten van de simulatie van variant 3 (MCFC-BCWK met realistisch rendement) gegeven. Tevens zijn ook de jaarbelastingduurkrommen afgebeeld die in één oogopslag laten zien hoeveel uur een bepaald vermogen voorkomt. Ook is het CO_2 -tekort aangegeven en het warmte-overschot in de buffer dat op het bedrijf niet nuttig kan worden gebruikt.
- De tweede laatste regel van tabel 3.7 laat de reductie van de CO_2 -uitstoot zien, die samenhangt met de energievoorziening (in ton/m^2 per jaar). De “altijd-aan” varianten betekenen een reductie van circa 16%, 24% respectievelijk 31% voor variant 1, 3 respectievelijk 5 ten opzichte van de referentie-energievoorziening.

Tabel 3.8 geeft de energiecijfers van de belangrijkste SOFC-GT-varianten (bij een belichtingsniveau van $45 \text{ W}/\text{m}^2$). De tabel bevat de cijfers van de “altijd-aan” varianten 7, 9 en 11 en de “alleen-aan-in-belichtingseizoen” variant 8 (zie voor definities tabel 3.6). De SOFC-GT varianten hebben een hoger elektrisch (maar een lager thermisch) rendement dan de MCFC-varianten. Dit openbaart zich in de energiecijfers in een lager gasverbruik dan de MCFC-varianten. Bij de “altijd-aan” variant 11 (optimistisch rendement: 69.5% elektrisch) is het gasverbruik op jaarbasis zelfs iets lager dan dat van het gasmotorreferentiesysteem.

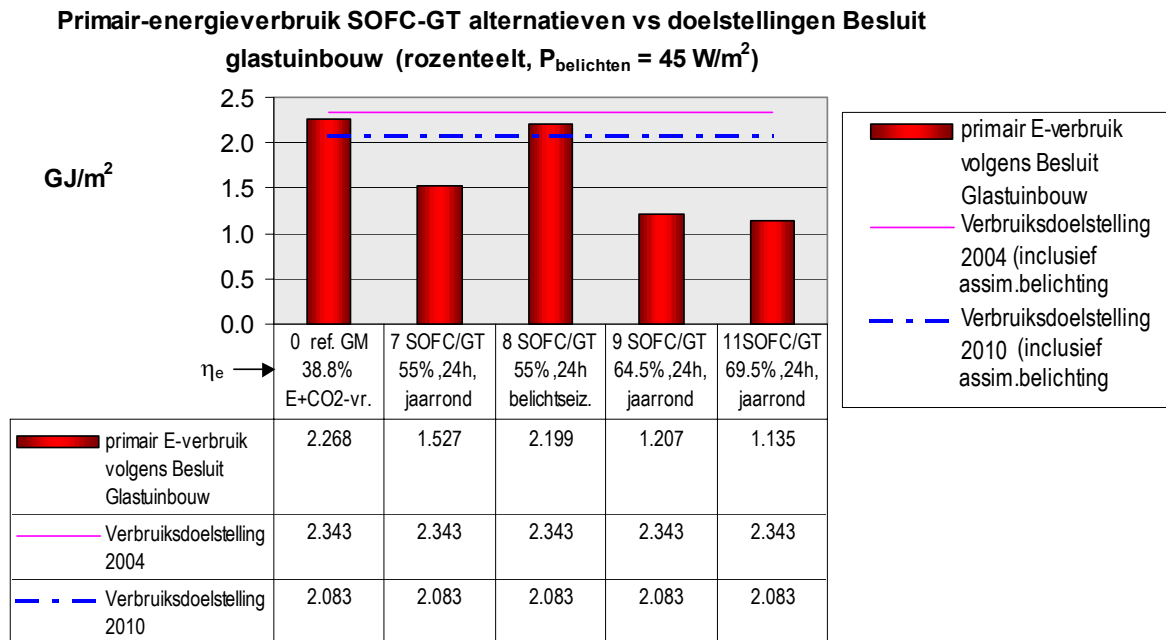
Tabel 3.8 Overzicht jaarrondenergicijfers SOFC-GT-varianten voor belichtingsniveau van 45 W/m²

Jaarrondcijfers belichte rozenteelt met SOFC-GT WK Energiesysteem: ↓ type → referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel Belichtingsniveau: 45 W/m ² BCWK in als → CO ₂ -dosering door	Referentie 1	7	8	9	11	
	gasmotor realis.rend.	SOFC-GT conserv.rend	SOFC-GT conserv.rend	SOFC-GT realist.rend	SOFC-GT optim.rend	per m ² per jaar
	altijd	altijd in belicht.seizoen	altijd	altijd		
	WK	BCWK	BCWK/ketel	BCWK	BCWK	eenheid
Jaargasverbruik	90.5	101.1	88.8	92.0	89.9	m ³
Reductie gasverbruik		-10.5	1.7	-1.4	0.6	m ³
Procentuele besparing op gasverbruik		-11.6%	1.9%	-1.6%	0.7%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.4	0.8	2.2	0.8	0.8	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	2.8	1.4	3.0	1.4	1.4	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	4.2	2.2	5.2	2.2	2.2	kWh
Procentuele besparing op totaal elektricit.verbruik		46.4%	-26.0%	46.4%	46.4%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	73.4	122.7	66.1	122.7	122.7	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	32.5	104.8	42.0	104.8	104.8	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	106.0	227.5	108.0	227.5	227.5	kWh
Procentuele toename verkoop electriciteit		115%	1.9%	115%	115%	
Piek in gasafname	0.0315	0.0327	0.0318	0.0313	0.0307	m ³ /h
Procentuele reductie piekafname		-3.8%	-1.0%	0.6%	2.4%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	2 879	3 096	2 798	2 943	2 930	uur
Totaal aantal draaiuren gasketel	1 612	2 736	4 101	3 321	3 735	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 899	8 760	6 078	8 760	8 760	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		4.0	0.9	7.6	9.2	kg
Overschot warmte (buffer vol)	0.327	0.033	0.225	0.006	0.000	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	64.5	43.4	62.5	34.3	32.3	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		21.0	1.9	30.1	32.2	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	2.268	1.527	2.199	1.207	1.135	GJ/m ²
Procentuele reductie primair energieverbruik		32.6%	3.0%	46.8%	49.9%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.114	0.077	0.111	0.061	0.057	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.037	0.003	0.053	0.057	ton
Procentuele reductie CO ₂ -emissie		32.6%	3.0%	46.8%	49.9%	

**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde

- de elektriciteitsverkoop van de "altijd-aan" varianten is hetzelfde als bij de MCFC-varianten (d.w.z. 115% meer dan van het referentie-systeem)
- het primair energieverbruik (berekend conform de methodiek van het Besluit glastuinbouw) ligt voor variant 7, 9 respectievelijk 11 circa 21, 30 en 32 m³_{ae}/m² lager dan van het referentiesysteem. In procenten is dat circa 33%, 47% respectievelijk 50%!
- Figuur 3.9 toont grafisch het primaire energieverbruik (in GJ/m²) afgezet tegen de energienormen uit het Besluit glastuinbouw voor rozenteelten met assimilatiebelichting voor de jaren 2004 respectievelijk 2010. De "altijd-aan" varianten 7, 9 en 11 voldoen ook in 2010 nog ruimschoots aan de energienorm (de referentie en variant 8 niet meer).

- Een nadeel van de SOFC-GT varianten is, dat er een wat groter tekort aan CO₂ voor CO₂-bemesting is, waardoor er additioneel meer zuivere CO₂ moet worden gedoseerd (respectievelijk 4.0, 7.6 en 9.2 kg/m²)

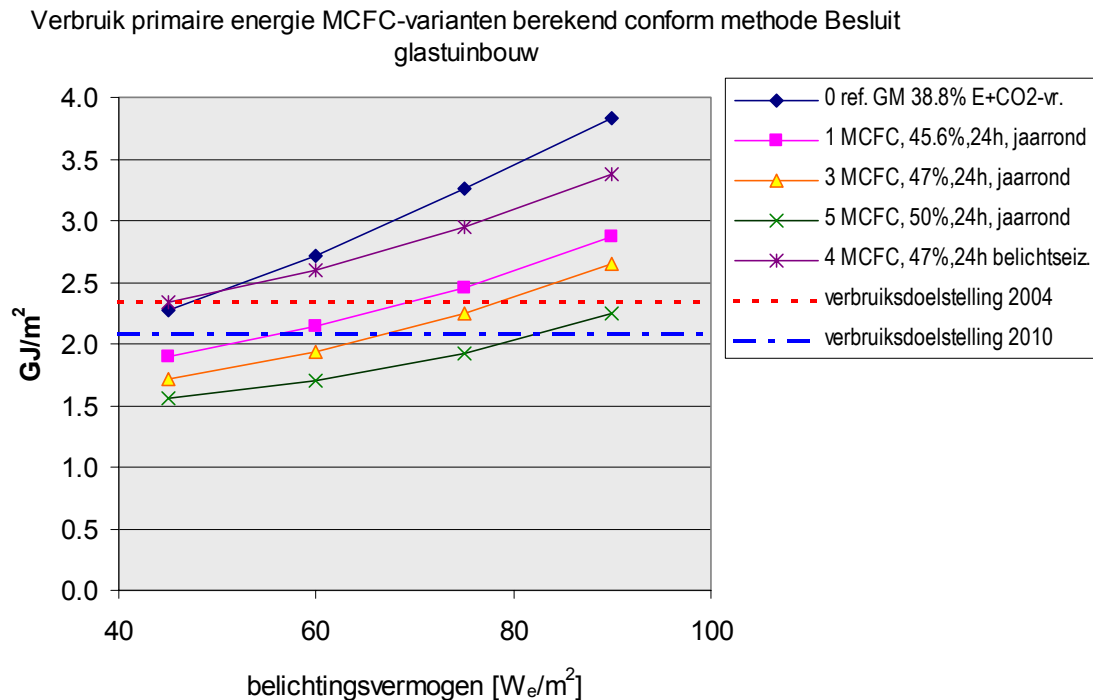


Figuur 3.9 Primair energieverbruik van referentie en SOFC-varianten, afgezet tegen de energienorm van 2004 en 2010 (rozenteelt, belichting 45 W/m²)

3.5.2 Andere belichtingsniveaus 45-90 W_e/m² (ca 4880 - 9760 lux)

In deze paragraaf worden de belangrijkste energiecijfers gegeven voor verschillende belichtingssituaties. Naast het niveau van 45 W_e/m² (overeenkomend met ca 4880 lux), zijn ook jaarrondenergieberekeningen uitgevoerd voor belichtingsniveaus van 60, 75 en 90 W_e/m² (overeenkomend met circa 6500, 8130 respectievelijk 9760 lux). Bij een hogere belichtingsniveau ligt ook de elektriciteitsvraag hoger en door de hogere warmte-afgifte van de lampen daalt de warmtevraag (zie tabel 3.1). Het elektrisch vermogen van de (BC)WK is bij de hoogste drie belichtingsniveaus respectievelijk 1214, 1514 en 1814 kWe (voor 2 ha). De belangrijkste energiecijfers (zoals voor de 45 W_e/m² cases gegeven in tabel 3.7 en 3.8) zijn per belichtingsniveau en per type brandstofcelsysteem gegeven in tabellen D.1 tot en met D.6 in bijlage D. Tevens zijn daar de bijbehorende staafdiagrammen van het primaire energieverbruik gegeven (vergelijkbaar met die van figuur 3.8 en 3.9). In figuur 3.10 zijn de primaire-energieverbruikcijfers van de MCFC-varianten van alle 4 belichtingsniveaus in één grafiek

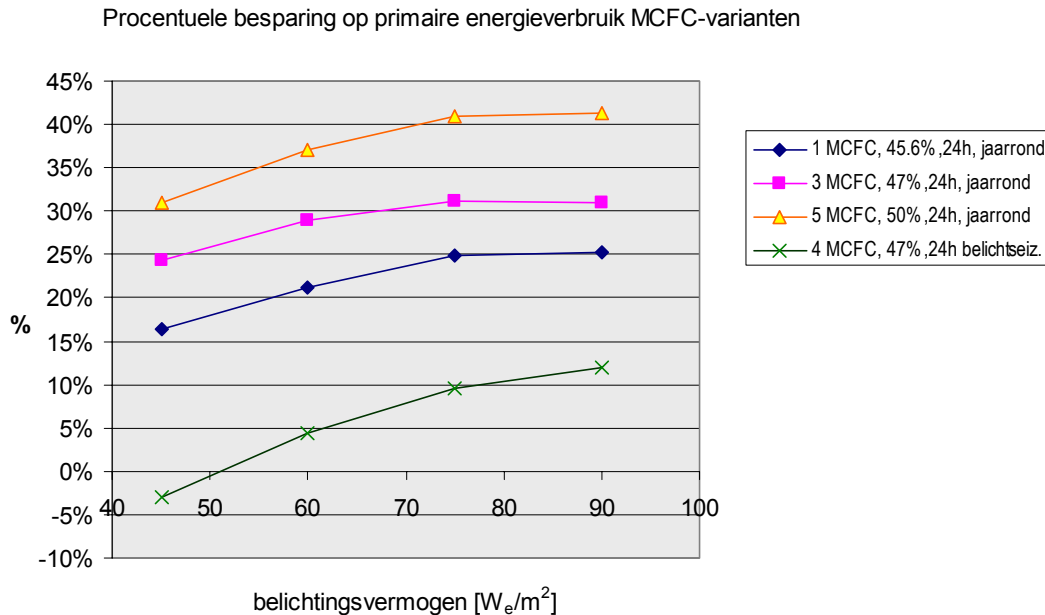
uitgezet inclusief die van het gasmotor-referentiesysteem. Tevens zijn de (maximale) energieverbruiksdoelstellingen van 2004 en 2010 uitgezet.



Figuur 3.10 Primaire energieverbruik van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsvermogen. Tevens is het verbruik van het gasmotorgebaseerde referentiesysteem gegeven (variant 0)

Uit figuur 3.10 blijkt dat de 'altijd-aan' MCFC-varianten bij $45 W_e/m^2$ onder de verbruiksdoelstelling van 2010 blijven. Bij $60 W_e/m^2$ blijven de 2 beste 'altijd-aan' varianten (3 en 5) onder de 2010-norm, bij $75 W_e/m^2$ is dat alleen nog de beste variant (5). Bij $90 W_e/m^2$ voldoet geen van de MCFC-varianten meer. Overigens voldoet geen van de gasmotor-referentiesystemen (en ook de MCFC-varianten, die alleen in het belichtingsseizoen aan zijn) aan de 2010-norm.

Figuur 3.11 toont de procentuele besparingen van de MCFC-varianten op het primaire energieverbruik ten opzichte van het verbruik van het gasmotor gebaseerde referentiesysteem wederom als functie van het belichtingsniveau. Alle varianten zijn beter dan de referentie, behalve variant 4 bij een belichtingsniveau van $45 W_e/m^2$. Bij de 'altijd-aan' variant met het hoogste elektrische rendement loopt de besparing op tot ca 42% bij een belichtingsniveau van $90 W_e/m^2$.

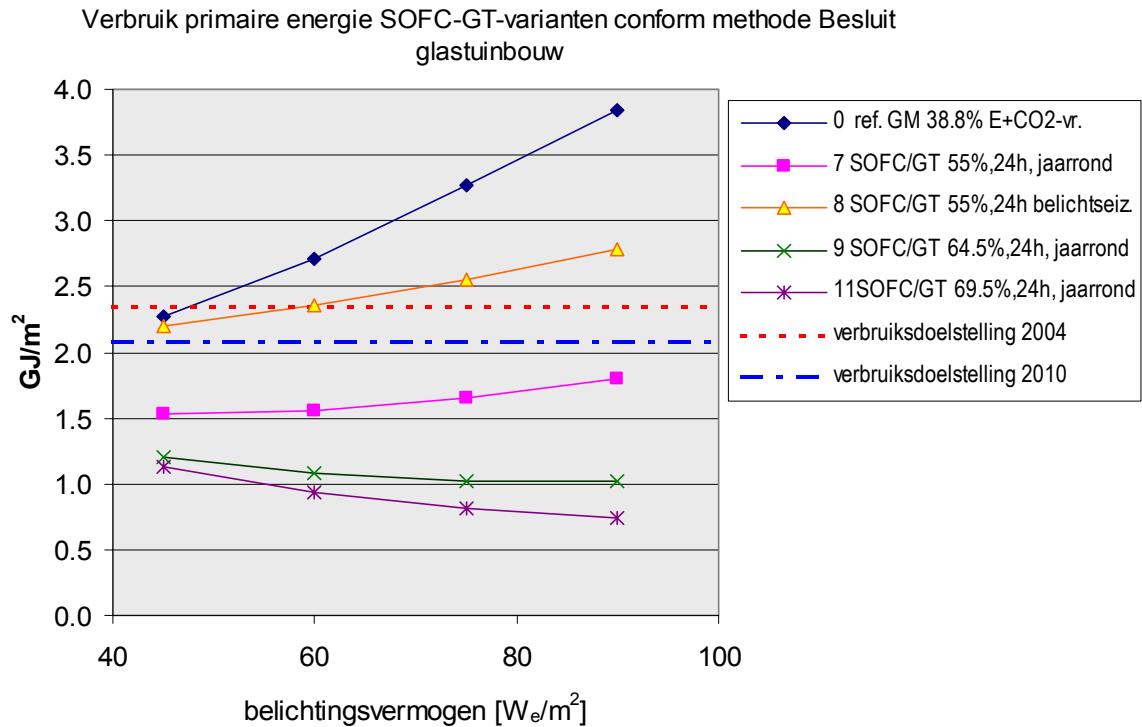


Figuur 3.11 Procentuele besparing op het primaire energieverbruik van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsvermogen ten opzichte van het verbruik van het gasmotorgebaseerde referentiesysteem.

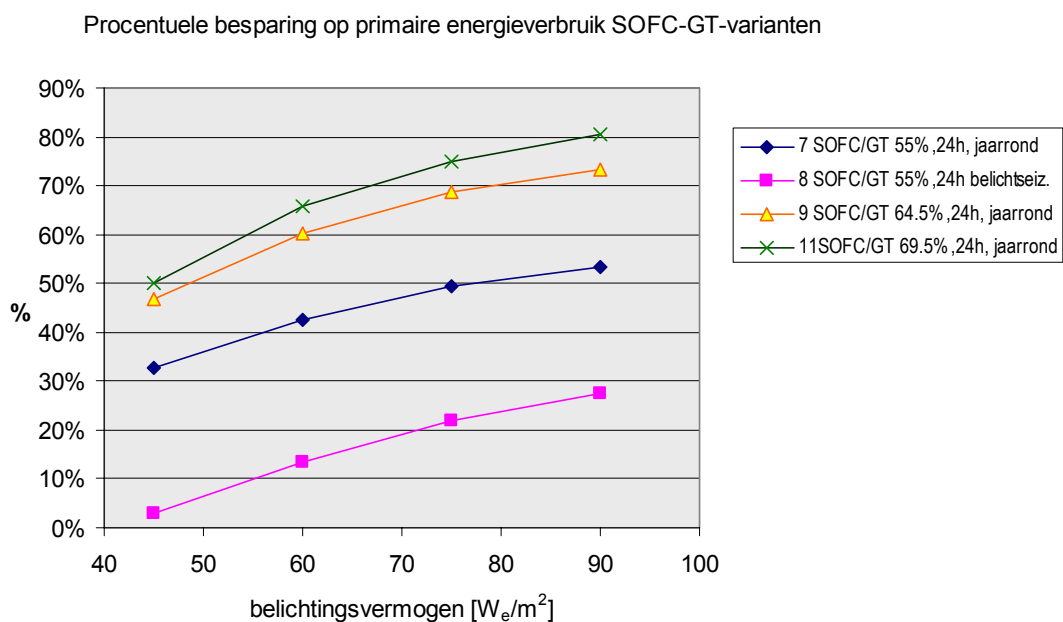
Figuur 3.12 toont de primaire-energieverbruikscijfers van de verschillende SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsvermogen. Hieruit blijkt dat alle ‘altijd-aan’ varianten (ruim) onder de energienorm van 2010 blijven. Bij de variant die alleen in het belichtingsseizoen aan is, is dat niet het geval. Bij het referentiesysteem al helemaal niet. Verder valt op dat bij de beste SOFC-GT-varianten (9 en 11) het primaire-energieverbruik bij toenemend belichtingsniveau zelfs afneemt. Dit komt omdat er in deze situaties steeds meer elektriciteit wordt teruggeleverd, die (vermenigvuldigd met een energiefactor¹² van 2.5) op het primaire energieverbruik van de ‘ingangsenergiestromen’ in mindering mag worden gebracht.

Figuur 3.13 toont de procentuele besparing op het primaire energieverbruik, berekend volgens de methodiek uit het Besluit glastuinbouw. Alle SOFC-GT varianten besparen. De procentuele besparing wordt groter naarmate het belichtingsvermogen hoger is en naarmate het elektrisch rendement van de BCWK hoger is. In het beste geval (69.5%, ‘altijd-aan’ variant) loopt de besparing zelfs op tot boven de 80 % (bij 90 W_e/m^2)!

¹² De factor 2.5 is gebaseerd op het elektrisch rendement van het gemiddelde Nederlandse elektriciteitsproductie park (inclusief transport- en distributieverliezen), waarvoor in het Besluit glastuinbouw 40% op bovenwaarde is aangenomen.

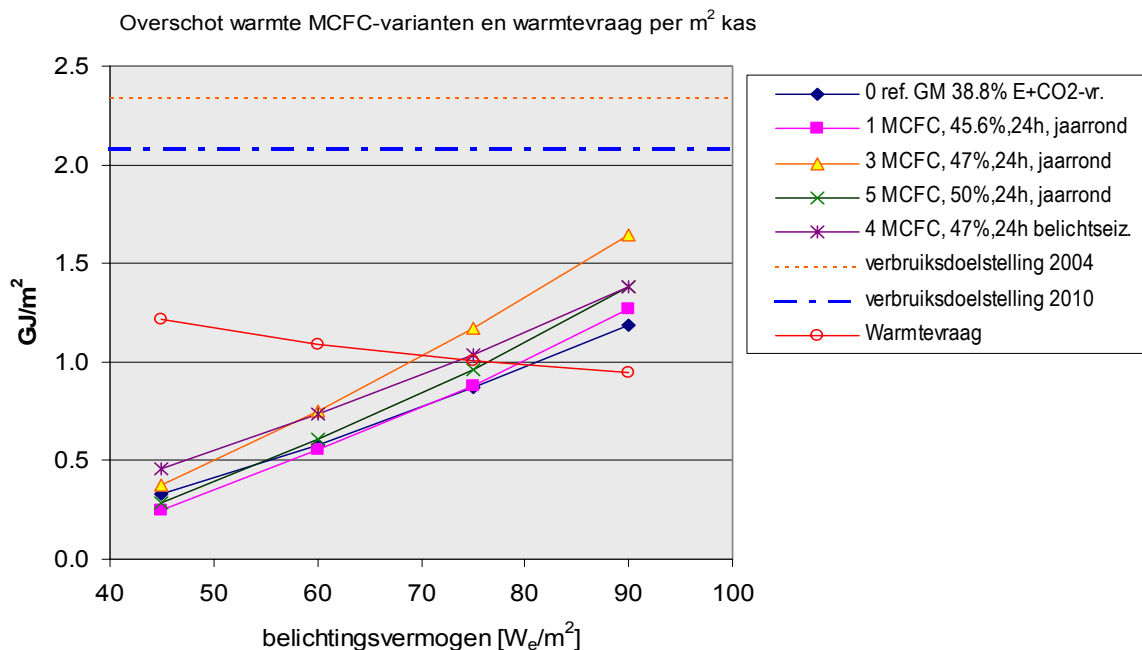


Figuur 3.12 Primaire energieverbruik van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsvermogen. Tevens is het verbruik van het gasmotorgebaseerde referentiesysteem gegeven (variant 0)

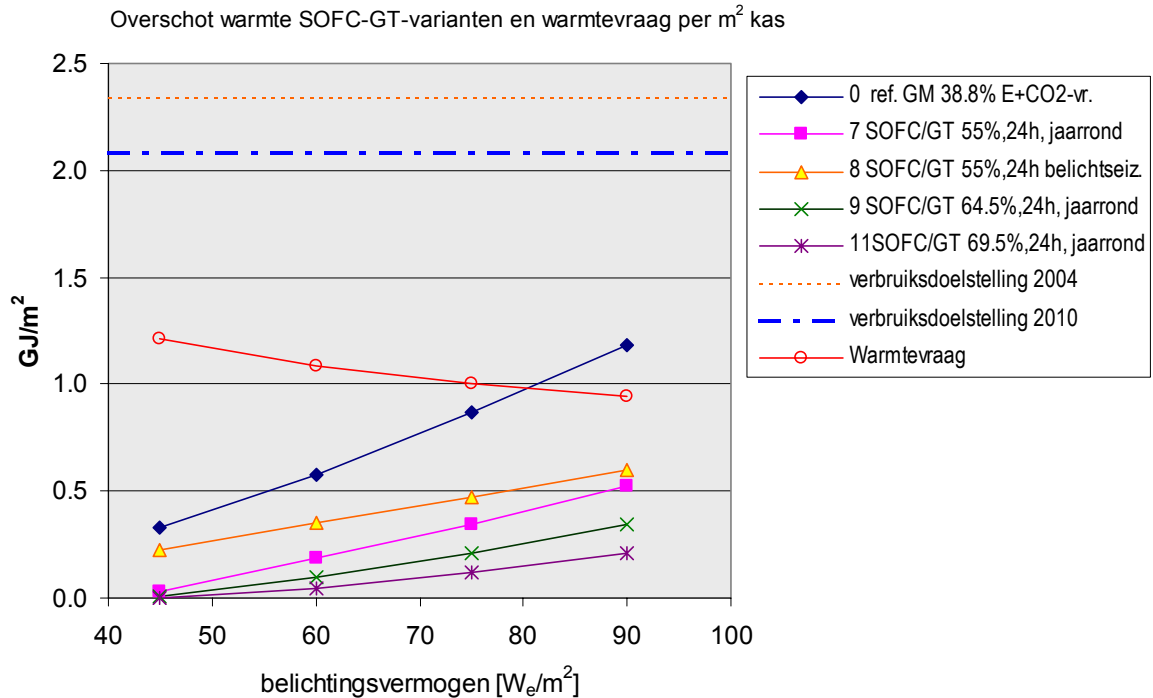


Figuur 3.13 Procentuele besparing op het primaire energieverbruik van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsvermogen ten opzichte van het verbruik van het gasmotorgebaseerde referentiesysteem.

In figuur 3.14 respectievelijk 3.15 is voor de MCFC- respectievelijk SOFC-GT-varianten het warmte-overschot dat op jaarbasis per m² kas verwacht wordt, in beeld gebracht. Tevens is daarin de netto warmtevraag (na aftrek van de bijdrage van de belichting aan de verwarming) uitgezet. Zoals mocht worden verwacht, neemt het warmte-overschot toe met toenemend belichtingsvermogen. Dat heeft zowel te maken met de afnemende warmtevraag, als met het feit dat er bij een toenemend elektrisch vermogen in de (BC)WK ook een evenredig hoger thermisch vermogen hoort. Vergelijking van figuur 3.14 met 3.15 laat zien, dat het warmteoverschot bij de MCFC-varianten over de hele linie veel hoger is dan bij de SOFC-GT-varianten. Dit heeft te maken met het hogere elektrische rendement van de SOFC-GT-systemen. Bij belichtingsvermogens van 45 en 60 ligt bij de MCFC-varianten het warmteoverschot duidelijk onder warmtevraag. Bij 75 W_e/m² is het warmte-overschot in dezelfde orde van grootte als de netto-warmtevraag. Bij 90 W_e/m² is het zelfs groter. Het warmteoverschot bij hogere vermogens treedt (bij de 'altijd-aan' varianten) op gedurende een groot deel van het jaar (ca 6000 uur bij 75 W_e/m² en 7000 uur bij 90 W_e/m², zie voor het laatste figuur D.7 in bijlage D). Met deze beschikbare warmte zou een groot deel van de warmtebehoefte van een belendende kas kunnen worden geleverd. Bij beide situaties is er ook een overschot aan CO₂ zodat een (eventuele) CO₂-vraag van het belendende bedrijf ook (geheel of gedeeltelijk) kan worden geleverd. (Levering aan derden is in de economische berekeningen van hoofdstuk 4 nog niet meegenomen).



Figuur 3.14 Warmteoverschot van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsvermogen. Ter referentie is ook de (netto-)warmtevraag gegeven en de verbruiksdoelstellingen voor primaire-energie voor 2004 en 2010.



Figuur 3.15 Warmteoverschot van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsvermogen. Ter referentie is ook de (netto-)warmtevraag gegeven en de verbruiksdoelstellingen voor primaire-energie voor 2004 en 2010. Het warmte-overschot van varianten 9 en 11 blijft bij alle belichtingsvermogens beperkt.

Bij de SOFC-GT-varianten ligt het warmte-overschot duidelijk onder dat van het gasmotor-gebaseerde referentiesysteem. Bij de beste variant (11) is dit maximaal 18% (bij 90 W_e/m^2), bij de tweede beste is dit maximaal 29% van het overschot bij de gasmotor (dit is 22% respectievelijk 36% van de netto-warmtevraag).

Warmte die niet nuttig op het bedrijf zelf kan worden gebruikt (of kan worden geleverd aan derden), zal moet worden weggekoeld. De overtollige warmte kan (deels) ook gebruikt worden om een iets hogere temperatuur in de kas te creëren (voor zover dat teelttechnisch gunstig is), op momenten dat dit anders uit kostenoverwegingen niet zou gebeuren.

4 BEDRIJFSECONOMISCHE BEREKENINGEN

In dit hoofdstuk wordt nagegaan hoe de verschillende brandstofcel-WK-varianten bedrijfseconomisch scoren ten opzichte van de corresponderende referentiesituatie. Voor de berekening van de rentabiliteitscijfers (terugverdientijd, netto contante waarde en interne rendementsgraad), worden de bedrijfseconomische uitgangspunten, opgesomd in paragraaf 2.3, als vertrekpunt genomen. Verder is het nodig voor elk van de systeemvarianten ramingen te maken van de benodigde meerinvesteringen, de besparingen (of meerkosten) op de energierekeningen, de meerkosten voor bedrijfsvoering en onderhoud en eventuele andere meer- (minder)kosten worden geraamd. De (meer)investeringen worden behandeld in paragraaf 4.1. In paragraaf 4.2 wordt ingegaan op de te verwachten kasstromen gedurende de project-evaluatieperiode. De rentabiliteitskengetallen (zoals de terugverdientijd en de netto-contante-waarde) worden bepaald in paragraaf 4.3 (voor de $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$ situatie). In paragraaf 4.4 wordt de gevoeligheid van de rentabiliteitscijfers voor onzekerheden/onnauwkeurigheden in de diverse systeemparameters en kostenkentallen geanalyseerd, waarmee inzicht wordt verkregen in de risico's van de investeringen. Tenslotte geeft paragraaf 4.5 een overzicht van de rentabiliteit bij de andere belichtingsniveaus.

4.1 Investeringsen en toekomstig verwachte investeringen

Voor een geschikte rentabiliteitsberekening is het essentieel te kunnen beschikken over een goede raming van de investeringskosten. Deze dient, afhankelijk van de fase waarin het project verkeert, een bepaalde nauwkeurigheid te hebben. Een project begint meestal met een globale haalbaarheidsstudie, waarbij een zogenaamde 'orde-van-grootte-raming' (met een onnauwkeurigheid van circa $\pm 40\%$) wordt gehanteerd. Bij een daaropvolgende gedetailleerde haalbaarheidsstudie, waarin onder meer een verdergaande procesevaluatie plaats vindt, wordt vaak een 'evaluatieraming' opgesteld, die is bedoeld om te komen tot een meer gedetailleerde economische beoordeling van de geselecteerde alternatieven. In een dergelijke raming wordt vaak een onnauwkeurigheid nagestreefd van $\pm 25\%$ [8]. Nog een stap verder gaat een 'investeringsraming' die in veel gevallen ten behoeve van een projectevaluatiestudie wordt opgesteld. Bij bijvoorbeeld Akzo is de nagestreefde onnauwkeurigheid in dit laatste geval -10% tot $+20\%$. In de onderhavige *verkennende* haalbaarheidsstudie wordt een maximale onnauwkeurigheid nagestreefd van $\pm 40\%$.

De investeringskosten kunnen grofweg worden onderverdeeld in twee categorieën te weten *directe kosten* (apparaatkosten en andere directe kosten) en *indirecte kosten* (ook wel additionele kosten genoemd). Tabel 4.1 hieronder geeft de belangrijkste items die onder elk van de categorieën vallen. In deze vroege projectfase zijn veel van de details nog niet bekend.

De in deze studie gehanteerde raming is primair gebaseerd op kentallen voor apparaten, waarin 'ervaringsgemiddelde' directe kosten voor montage, elektrische installatie, apparaatbesturing/regeling, 'piping', en civiele werkzaamheden zijn verdisconteerd. Als indirecte kosten is alleen een (orde-van-grootte) raming van de engineeringkosten (hier gesteld op 5% van de kosten van apparaten en installatie) meegenomen. De gebruikte kentallen (inclusief de bronvermelding) zijn weergegeven in tabel 4.2. De kentallen zijn genormeerd op de grootte (vermogen, inhoud e.d.) van het apparaat of systeem. Vaak is het resulterende kental dan toch nog enigszins afhankelijk van die grootte.

Tabel 4.1 Indeling investeringskosten in directe en indirecte kosten

<i>Directe kosten</i> (apparaatkosten en andere directe kosten: hoofditens, 'packages', installatie en provisorie)	<i>Indirecte kosten</i> (additionele kosten)
<ul style="list-style-type: none"> - warmtekrachtinstallatie (gasmotor met rookgasreiniging of brandstofcel-WK) - warmtebuffer - ketelinstallatie - hulpsystemen (bijvoorbeeld smeeroliesysteem) - elektrische installatie - procesregeling (modificaties in en aanvullingen op bestaande regeling; supervisory control) - extra piping (buiten 'apparaatomgeving') - civiele werkzaamheden - HVAC (heating ventilation air conditioning; indien nodig) - (eventueel) reserve-onderdelen voor x jaar 	<ul style="list-style-type: none"> - aanpassingen bestaande installaties - bouwrijp maken bouwperceel - tijdelijke voorzieningen - aannemerskosten - vergunningen - verzekeringen - engineering - supervisie bouw - inbedrijfstelling en start-up assistentie

Tabel 4.2 Investeringskentalen en schatting onderhoudspercentages

Apparaat	Vermogen/ dimensionering	investeringskental	range	onderhoud / additieven % van investering per jaar	bron, opmerking
ketel	1.75 MW _{th}	38 EUR/kW _{th}		1%	incl. brander, schoorsteen, condensator, elektrisch gedeelte, verdeelstuk, isolatie [5]
	2.4 MW _{th}	29.5 EUR/kW _{th}			
	4.4 MW _{th}	20 EUR/kW _{th}			
Warmtebuffer	200-300 m ³	227 EUR/m ³	136-317	2%	incl. aansluiting, regeling, expansie-systeemuitbreiding [5]
	800 à 1000 m ³	90 EUR/m ³	80-155	1%	
WK-installatie	1000 kW _e	425 EUR/kW _e		0.00613	gasmotor [10]
	600 kW _e	553 EUR/kW _e	326-675	EUR/kW _h _e	
	480 kW _e	603 EUR/kW _e			
Rookgasreiniging	1000 kW _e	146 EUR/kW _e	110-250	3%	type SCR [10]
	600 kW _e	165 EUR/kW _e		+ 0.00136	ureumverbruik [11]
	480 kW _e	183 EUR/kW _e		EUR/kW _h _e	
MCFC-WK (Hot-Module)	250 kW _e	2003/2004: 3614 EUR/kW _e ¹⁾		0.002 EUR/kW _h _e ²⁾	prijs enkele stuks (handfabricage)
		2006/2007: 1218 EUR/kW _e ¹⁾		600 EUR/kW _e ³⁾	verwachte prijs bij serieproductie (door MTU)
SOFC-GT-WK module	350 kW _e	2003/2004: 16690 EUR/kW _e ⁴⁾		0.0012 EUR/kW _h _e ⁵⁾	prijs enkele stuks handfabricage
		2010-2015: 853 EUR/kW _e ⁴⁾		278 EUR/kW _e ⁶⁾	verwacht prijs bij serieproductie
				0.0012 EUR/kW _h _e ⁵⁾	278 EUR/kW _e ⁶⁾

1) investeringskosten bij een dollarkoers van 1 EUR = 1.2 USD (april 2004); Er is aangenomen, dat ¼ deel in dollars moet worden gekocht en ¾ deel in EUR. (De Hot-Module wordt geleverd door een Duitse leverancier (MTU), die deels Amerikaanse technologie gebruikt). Voor CV-zijdige installatie is 20 EUR/kW_e aangenomen.

2) kosten voor het verwisselen van luchtfilters en ontzwavelingsunit [2]

3) kosten stackvervang (na 2007); vervanging naar verwachting (van MTU) éénmaal per 5 jaar; stackkosten ca 50% van totale BCWK-investering exclusief installatie [12]

4) verwachte investeringskosten bij een dollarkoers van 1 EUR = 1.2 USD; hierbij is aangenomen, dat het systeem geheel in dollars moet worden betaald (Amerikaanse leverancier); voor installatie is 20 EUR/kW_e aangenomen. De huidige investeringskosten liggen rond 20 000 USD/kW_e. De leverancier verwacht een snelle prijsdaling naar ca 1000 USD/kW_e in 2010 à 2015, exclusief installatiekosten [2].

5) kosten voor het verwisselen van ontzwavelingsabsorbens (ca 0.001 EUR/kW_h_e), filters en 'schutgassen' [2]

6) kosten stackvervang (na 2014) naar verwachting éénmaal per 10 jaar; stackkosten ca 33% van totale investering exclusief installatiekosten [12].

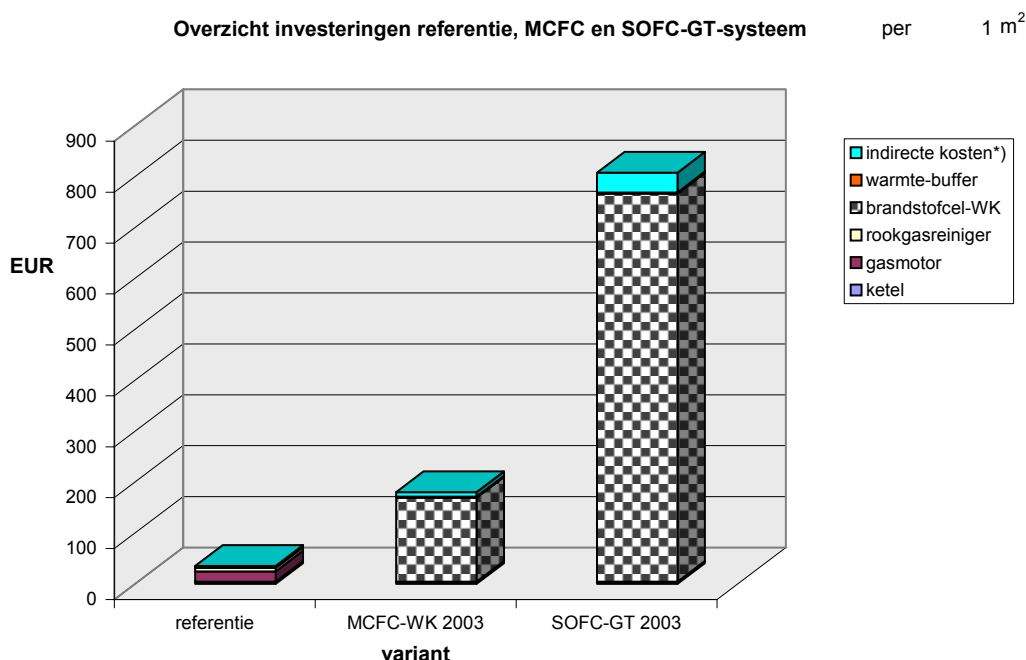
De benodigde investeringen voor de referentiesystemen en de systeemvarianten zijn geraamd op basis van de kentalen genoemd in tabel 4.2 en de benodigde capaciteiten/vermogens van de verschillende componenten. Zoals aangegeven in de uitgangspunten van §2.2 (punt 1) wordt de (BC)WK gedimensioneerd op de elektriciteitsbehoefte van de assimi-

latiebelichting plus een gering extra vermogen voor de gemiddelde 'vaste' elektriciteitsvraag. De ketel is gedimensioneerd op de verwachte piekvraag bij extreme condities (§2.2, punt3). Voor de buffergrootte is 100 m³/ha gehanteerd (punt 4). De resultaten van de kostenraming per m² kas voor de met 45 W_e/m² belichte teelt op basis van het kostenniveau van 2003 zijn samengevat in tabel 4.3 en grafisch weergegeven in figuur 4.1. Voor de dezelfde situatie maar dan voor de toekomstige investeringsniveaus (2006/2007 voor de MCFC en 2010 à 2015 voor de SOFC-GT) staan ze in tabel 4.4 respectievelijk figuur 4.2.

Tabel 4.3 Huidige investeringskosten per m² kas van brandstofcelvarianten en referentie (45 W_e/m²)

onderdeel	referentie EUR/m ²	MCFC-WK 2003 EUR/m ²	SOFC-GT 2003 EUR/m ²
ketel	4.2	4.2	4.2
gasmotor	20.5	0.0	0.0
rookgasreiniger	6.8	0.0	0.0
brandstofcel-WK		165.1	762.6
warmte-buffer	2.3	2.3	2.3
indirecte kosten ¹⁾	1.7	8.6	38.5
Totaal	35.5	180.2	807.5
Meerinvestering (EUR/m ²)		144.7	772.0

¹⁾ engineeringkosten (5%) P_{assimilatiebelichting} = 45 W/m²

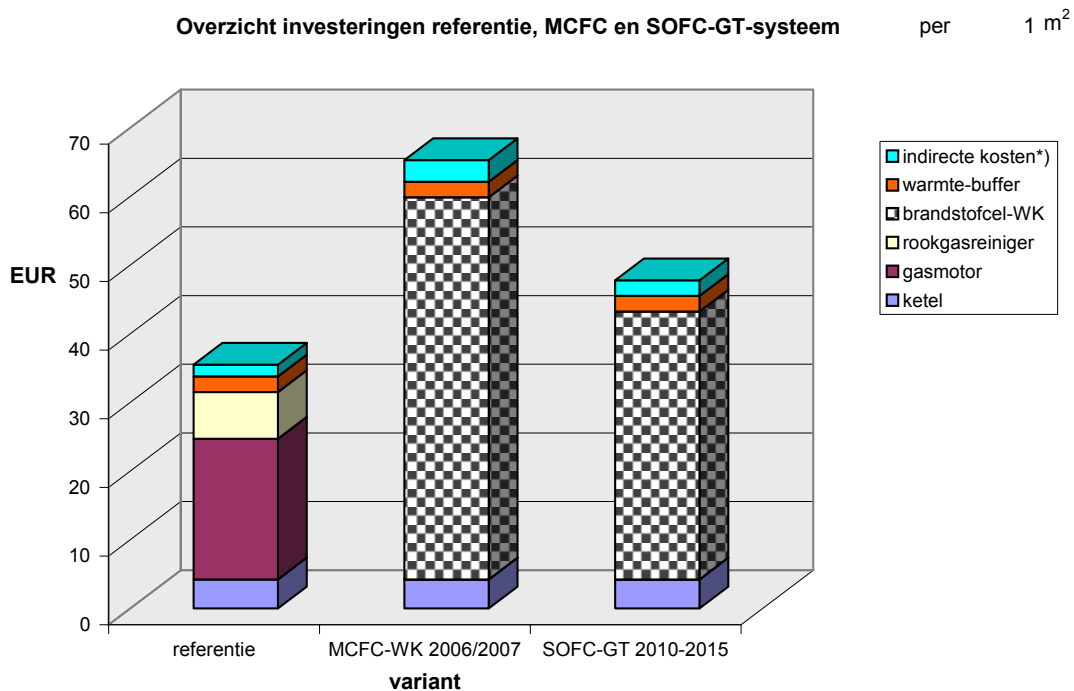


Figuur 4.1 Grafische voorstellingen van huidige investeringskosten per m² kas van referentie en brandstofcel-varianten voor een belichtingsniveau van 45 W/m². Met name de SOFC-GT variant is momenteel nog erg duur.

Tabel 4.4 Toekomstig verwachte investeringskosten per m² kas van brandstofcelvarianten en referentie (45 W_e/m²). De genoemde prijzen van de BCWK's zijn door de leverancier beoogde en verwachte prijzen enkele jaren na de marktintroductie (waarbij het prijsniveau naar verwachting nog een factor 2 à 3 hoger ligt). MCFC systemen worden eerder commercieel verkrijgbaar dan SOFC-GT systemen.

onderdeel	referentie EUR/m ²	MCFC-WK 2006/2007 EUR/m ²	SOFC-GT 2010-2015 EUR/m ²
ketel	4.2	4.2	4.2
gasmotor	20.5	0.0	0.0
rookgasreiniger	6.8	0.0	0.0
brandstofcel-WK		55.7	39.0
warmte-buffer	2.3	2.3	2.3
indirecte kosten ¹⁾	1.7	3.1	2.3
Totaal	35.5	65.3	47.8
Meerinvestering (EUR/m ²)		29.8	12.3

¹⁾ engineeringkosten (5%) P_{assimilatiebelichting} = 45 W/m²



Figuur 4.2 Grafische voorstellingen van toekomstige investeringskosten per m² kas van referentie en brandstofcelvarianten voor een belichtingsniveau van 45 W_e/m² enkele jaren na de commerciële marktintroductie.

Omdat zowel de brandstofcel-WK's als de referentie-gasmotor-WK in het geval van CO₂-dosereren zonder assimilatiebelichting – hetgeen overdag meestal het geval zal zijn - (nagenoeg) de volledige elektriciteitsproductie terugleveren aan het openbare net, hebben ze alle dezelfde elektrische aansluitcapaciteit nodig. De daarvoor benodigde investering is dus niet

van belang voor de beoordeling of de BCWK bedrijfseconomisch aantrekkelijker is dan de referentie-WK. Deze investering hoeft derhalve niet in de rentabiliteitsberekeningen te worden meegenomen. (Dit geldt eigenlijk ook voor de investeringen in ketel en warmtebuffer. Deze laatsten zijn voor de volledigheid van het 'investeringsbeeld' toch meegenomen.)

4.2 Kasstromen

Om de rentabiliteit te kunnen beoordelen is het nodig de verwachte jaarlijkse kasstromen ('cashflows') over de evaluatieperiode (hier 15 jaar, zie §2.3 punt 15) af te schatten. De kasstromen die relevant zijn bij het bepalen van de economische rentabiliteit, zijn de *marginale (of differentiële) kasstromen*, dat wil zeggen de kasstromen die uitsluitend toe te schrijven zijn aan het project. Anders gezegd: een kasstroom is marginaal, indien deze niet zou bestaan zonder het project. De netto kasstroom in een jaar bestaat uit de som van alle marginale inkomende ('cash-in-flow') en uitgaande ('cash-out-flow') kasstromen in het betreffende jaar (alle projectgerelateerde inkomsten/uitgaven of besparingen/meeruitgaven, indien een kasstroom zowel voor referentie als alternatief bestaat). Hierbij dient nog opgemerkt te worden, dat alleen de *operationele* marginale kasstromen meetellen. Financieringskosten worden niet meegerekend (behalve bouwrente, zie hierna). De interest die betaald zal worden op eventueel nieuw aan te trekken kapitaal wordt niet opgenomen, omdat reeds impliciet rekening gehouden wordt met de financieringskosten bij het verdisconteren van de toekomstige kasstromen (zie paragraaf 4.3). De belangrijkste (marginale) kasstromen zijn:

Tabel 4.5 Overzicht (marginale) cashflows

<i>Cash-out flows</i>	<i>Cash-in flows</i>
Meerinvestering: - uitgaven aanpassingen 'ketelhuis': BCWK i.p.v. gasmotor-WK - bouwrente (Eventueel) huur provisorisch Extra kosten onderhoud (en eventueel bediening)	Besparing op energiekosten van alternatieve energievoorzieningssysteem ten opzichte van referentie Extra verkoop van elektriciteit en/of warmte (Eventueel) extra opbrengst ten gevolge van hogere gewasproductie
Meerkosten additieven (ureum, zuivere CO ₂) (Eventueel) kosten afvoer afval, grond e.d. (Eventueel) extra verzekeringen	(Eventueel) vermeden investeringen of kosten

We zullen de relevante cash-in en -out stromen (afzonderlijk of in combinatie) hieronder bespreken.

Cash-out flow '(meer)investering'

De investeringsraming voor elk van de varianten is in de vorige paragraaf aan de orde geweest. Bouwrente is met name bij grote projecten met een lange bouwtijd van belang. Voor alle systeemvarianten wordt er van uitgegaan dat de bouwtijd een half jaar of korter is. Voor de volledigheid is bouwrente in de rentabiliteitsberekeningen meegenomen (de bouwrente bedraagt 6% per jaar en wordt berekend over 3 maanden). De (meer)investeringsuitgaven zullen (inclusief bouwrente) worden verdisconteerd tot een negatieve cash-flow die wordt 'toegewezen' aan het eerste jaar van de evaluatieperiode waarover de rentabiliteit zal worden berekend.

Netto cash-in flow 'besparing energiekosten' (inclusief meeropbrengst elektriciteitsproductie)

Een van de belangrijkste jaarlijkse (netto) cash-in flows is de besparing op de netto-energiekosten, dat wil zeggen het verschil van de netto-energiekosten van de gasmotorgebaseerde referentie-energievoorziening en de alternatieve BCWK-energievoorziening (rekening houdend met de gehanteerde inzetstrategieën).

De berekening van de besparing op netto-energiekosten gebeurt in een aantal stappen, die in principe voor elk jaar in de evaluatieperiode dienen te worden uitgevoerd. In deze studie wordt echter verondersteld dat de jaarlijkse besparing voor elk jaar hetzelfde is (aannamen: geen inflatie, voor elk jaar dezelfde energievraag en dezelfde energietarieven en tariefsystemen, zie paragraaf 2.3). Omdat de *besparing* op de netto-energiekosten moet worden bepaald, dient de berekening van de jaarenergiekosten te gebeuren voor zowel alle systeemvarianten als ook voor de referentiesituatie. Globaal zijn de stappen voor de bepaling als volgt:

1. Bepaal de jaarlijkse gas- en elektriciteitsinkoophoeveelheden die nodig zijn om in de warmte-, elektriciteits- en (eventueel) CO₂-vraag te kunnen voorzien.
2. Bepaal een eventueel elektriciteitsoverschot dat teruggelieferd wordt aan het net (elektriciteitsverkoop)
3. Bepaal voor de elektriciteitsinkoop en -verkoop de verdeling over plateau- en daluren
4. Bepaal voor zowel gas- als elektriciteitsin-/verkoop de maximale afnamepieken en voor elektriciteit ook de (over 12 maanden) gemiddelde maandpiek.

De berekeningen van stappen 1, 2, 3 en 4 zijn in het vorige hoofdstuk toegelicht en tevens zijn daar de belangrijkste resultaten getabelleerd (paragraaf 3.4 en 3.5).

5. Bereken aan de hand van de karakteristieken bepaald onder 1, 3 en 4 en de tarieven/tariefstructuren vermeld in paragraaf 2.3 de jaarkosten van de *elektriciteitsinkoop*: deze bestaat ruwweg uit twee delen:
 - de kosten van de 'commodity' elektriciteit ('volumekosten' voor plateau- en daluren, inclusief kWh-afhankelijke diensten (systeemdiensten en klein deel van transport)

- de kosten voor transport en distributie (afhankelijk van kW-pieken per jaar en maand).
6. Bereken de opbrengsten van eventuele *elektriciteitsverkoop* op basis van de aangenomen teruglevertarieven (§2.3 punt 14). In de berekening is rekening gehouden met de nieuwe CO₂-index-regeling voor WKK (per 1 juli 2004), die onderdeel uitmaakt van de MEP-regeling (zie §2.3 punt 9). De CO₂-index voor elk van de (BC)WK's is ingeschat aan de hand van de veronderstelde vollast-rendementen (zie §3.2 en tabel F.5). Voor de hoogte van de 'CO₂-index MEP-vergoeding' is gerekend met 2.1 EURct per "kWh CO₂-vrije elektriciteit".
7. Bereken de jaarkosten van de *gasinkoop*. Hiervoor is gerekend met de methodiek van het "Gas Verkoop Systeem 2004" van GasUnie Trade & Supply en het transporttarieven systeem van Gastransport Services (zie ook §2.3. punt 3, 4 en 5). Net als bij elektriciteit onderscheiden we ook hier 2 deelposten:
- de kosten van de 'commodity' aardgas (volumekosten)
 - de kosten voor capaciteit, transport en distributie van gas.

Een overzicht van de energiekosten is gegeven in tabel 4.6 voor de MCFC-varianten en in tabel 4.7 voor de SOFC-GT-varianten (bij een belichtingsniveau van 45 W_e/m²).

8. De marginale cash-in flow 'beparing op (netto-)energiekosten' is nu het verschil van de netto-energiekosten (7-de kolom, tweede deel van tabel) van de referentie minus die in alternatieve situatie.

De verbruiksberekeningen zelf zijn geïmplementeerd in en uitgevoerd middels het inzettenprogramma "FuelCalc" (zie ook paragraaf 3.4). Voor elk kwartier uit het verkorte referentiejaar wordt één berekening uitgevoerd. De kwartierverbruiken worden geaccumuleerd en geschaald naar een vol jaar. Het resultaat is een 'jaarrondberekening' over 8760 uur.

Tabel 4.6 (a en b) Overzicht jaarlijkse elektriciteits-, aardgaskosten en totale netto energiekosten per variant voor de MCFC-BCWK's (45 W_e/m²). De kosten zijn opgesplitst in de verschillende kostencomponenten. Tevens zijn de gemiddelde kWh-prijs en de all-in gasprijs per m³ vermeld. T&D = transport en distributie, TDC= transport, distributie en capaciteit, EB = energiebelasting. De cijfers zijn genormeerd op 1 m² kas (uitgaande van een kas van 2 ha).

Variant (MCFC) (P _{belicht} =45 W/m ²) per jaar	elektriciteit inkoopvolume plateau+dal kWh/m ²	elektriciteit verk.volume plateau+dal kWh/m ²	elektriciteit volumekos- ten (inkoop) EUR/m ²	elektriciteit T&D EUR/m ²	elektriciteit EB EUR/m ²	elektriciteit inkoop totaal EUR/m ²	elektriciteit gemiddelde kWh-prijs ink. EUR/kWh	elektriciteit verkoop totaal EUR/m ²	elektriciteit netto inkoop totaal EUR/m ²
Referentie 1	4.2	106.0	0.18	0.19	0.09	0.45	0.1091	5.14	-4.68
1: conserv.;24h altijd aan	2.2	227.5	0.10	0.19	0.07	0.36	0.1596	9.48	-9.12
3: realist.;24h altijd aan	2.2	227.5	0.10	0.19	0.07	0.36	0.1595	10.01	-9.65
5: optim.;24h altijd aan	2.2	227.5	0.10	0.19	0.07	0.36	0.1595	10.08	-9.73
4: realis.;24h;belichtseiz.	5.2	108.0	0.25	0.19	0.09	0.53	0.1005	5.02	-4.49

Variant (MCFC) ($P_{\text{belicht}}=45 \text{ W/m}^2$) per jaar	aardgas volume m^3/m^2	aardgasvo- lumekosten EUR/m^2	aardgas TDC+EB EUR/m^2	totaal aard- gasinkoop EUR/m^2	gasprijs per m^3 EUR/m^3	netto ener- giekosten totaal EUR/m^2	besparing energiekos- ten totaal EUR/m^2	besparing energie- kosten %
Referentie 1	90.5	11.16	5.52	16.67	0.1842	11.99		
1: conserv.;24h altijd aan	111.6	13.75	6.08	19.83	0.1777	10.71	1.29	10.7%
3: realist.;24h altijd aan	106.4	13.11	5.91	19.03	0.1788	9.37	2.62	21.8%
5: optim.;24h altijd aan	102.1	12.59	5.85	18.44	0.1805	8.71	3.28	27.3%
4: realis.;24h;belichtseiz.	92.6	11.42	5.63	17.04	0.1840	12.55	-0.56	-4.7%

Tabel 4.7 (a en b) Overzicht jaarlijkse elektriciteits-, aardgaskosten en totale netto energiekosten per SOFC-GT variant voor een belichtingsniveau van $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$ (zie ook bijschrift bij tabel 4.6).

Variant SOFC-GT ($P_{\text{belicht}}=45 \text{ W/m}^2$) per jaar	elektriciteit inkoopvolume plateau+dal kWh/m^2	elektriciteit verk.volume plateau+dal kWh/m^2	elektriciteit volumekos- ten (inkoop) EUR/m^2	elektriciteit T&D EUR/m^2	elektriciteit EB EUR/m^2	elektriciteit inkoop totaal EUR/m^2	elektriciteit gemiddelde kWh-prijs ink. EUR/kWh	elektriciteit verkoop tot. (incl.MEP) EUR/m^2	elektriciteit netto inkoop totaal EUR/m^2
Referentie 1	4.2	106.0	0.18	0.19	0.09	0.45	0.1091	5.14	-4.68
7: conserv.;24h altijd aan	2.2	227.5	0.10	0.19	0.07	0.36	0.1596	9.65	-9.30
8: cons.;24h;belichtseiz.	5.2	108.0	0.25	0.19	0.09	0.53	0.1005	4.85	-4.32
9: realist.;24h altijd aan	2.2	227.5	0.10	0.19	0.07	0.36	0.1595	10.11	-9.75
11: optim.;24h altijd aan	2.2	227.5	0.10	0.19	0.07	0.36	0.1596	10.20	-9.85

Variant SOFC-GT ($P_{\text{belicht}}=45 \text{ W/m}^2$) per jaar	aardgas volume m^3/m^2	aardgasvo- lumekosten EUR/m^2	aardgas TDC+EB EUR/m^2	totaal aard- gasinkoop EUR/m^2	gasprijs per m^3 EUR/m^3	netto ener- giekosten totaal EUR/m^2	besparing energiekos- ten totaal EUR/m^2	besparing energie- kosten %
Referentie 1	90.5	11.16	5.52	16.67	0.1842	11.99		
7: conserv.;24h altijd aan	101.1	12.46	5.84	18.30	0.1811	9.00	2.99	24.9%
8: cons.;24h;belichtseiz.	88.8	10.95	5.83	16.78	0.1889	12.46	-0.46	-3.9%
9: realist.;24h altijd aan	92.0	11.33	5.64	16.97	0.1845	7.22	4.77	39.8%
11: optim.;24h altijd aan	89.9	11.08	5.57	16.65	0.1852	6.81	5.19	43.2%

Meeropbrengst product (extra gewasproductie)

Naast besparing op energiekosten kan er in een alternatieve situatie eventueel ook een meeropbrengst van de gewasproductie optreden. Dit zou het geval zijn, indien door toepassing van het alternatieve systeem gemiddeld een beter kasklimaat zou worden gerealiseerd. Dit kan bijvoorbeeld optreden als er bij het alternatieve systeem extra uren zou worden belicht. In deze studie is er vanuit gegaan dat het aantal belichtingsuren in referentie- en alternatieve situatie gelijk zijn en er eenzelfde temperatuurregime wordt gehandhaafd, zodat er geen fysieke meerproductie te verwachten is.

Kosten voor extra onderhoud & bediening (O&B)

De specifieke onderhoudskosten voor de extra apparaten/installaties zijn gegeven in tabel 4.2, veelal als een percentage van de investeringen. Voor de gasmotoren zijn de onderhoudskosten gebaseerd op het berekende aantal draaiuren van deze deelinstallaties. Het aantal WK-draaiuren is voor elke systeemvariant bepaald (zie hoofdstuk 3). Met de kentallen voor òf de onderhoudskosten per draaiuur òf het percentage van de investering kunnen nu de totale onderhoudskosten voor elk van de systeemvarianten en het referentiesysteem worden afgeschat.

We nemen aan dat de bedieningskosten niet toenemen, daar naar verwachting de nieuwe installaties grotendeels automatisch zullen functioneren. De totale (meer)kosten voor onderhoud per variant per m² kas zijn vermeld in de vierde kolom van de tabel onder figuur 4.3 respectievelijk figuur 4.4 voor de MCFC- respectievelijk SOFC-GT-varianten. Er wordt hierbij nog opgemerkt dat de kosten van stack-vervanging (na circa 5 jaar bij de MCFC-varianten en circa 10 jaar bij de SOFC-GT-varianten) hierin niet zijn verrekend. Deze worden als extra investeringskasstroom in de jaren van vervanging verdisconteerd (zie hieronder).

Kosten voor additieven en afvoer van afval

Hieronder vallen de kosten voor ureumverbruik van de rookgasreiniger (bij het referentiesysteem) en de kosten voor additionele zuivere CO₂ dosering bij de varianten met een CO₂-tekort. De totale jaarkosten voor additieven zijn voor elk van de varianten aangegeven in de vijfde kolom van de tabel onder figuur 4.3 respectievelijk figuur 4.4 voor de MCFC- respectievelijk SOFC-GT-varianten.

Extra verzekeringen

- Zijn in deze studie niet meegenomen (zie uitgangspunt 19 in paragraaf 2.3).

Vermeden investeringen

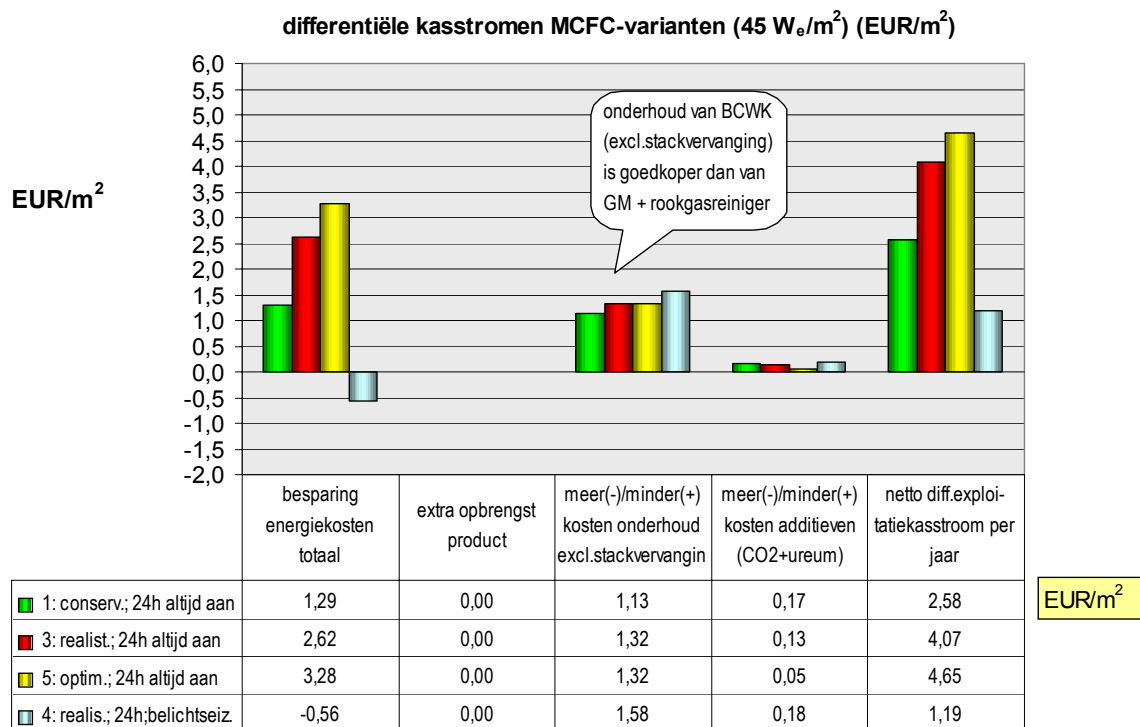
- Vermeden investeringen zijn in dit project niet aan de orde.

Figuur 4.3 respectievelijk 4.4 tonen voor de MCFC- respectievelijk SOFC-GT-varianten in een balkendiagram een overzicht van de jaarlijkse differentiële kasstromen per variant. De besparing op (netto-)energiekosten, meeropbrengsten, onderhoud en additieven zijn reeds genoemd. De laatste kolom van de tabellen onder de figuren bevat de resulterende *netto marginale (of differentiële) kasstroom* per jaar (de som van de vorige 4 kolommen). In het vervolg wordt dit ook wel de “netto exploitatiekasstroom” genoemd. Voor een goede interpretatie dient nog het volgende te worden opgemerkt:

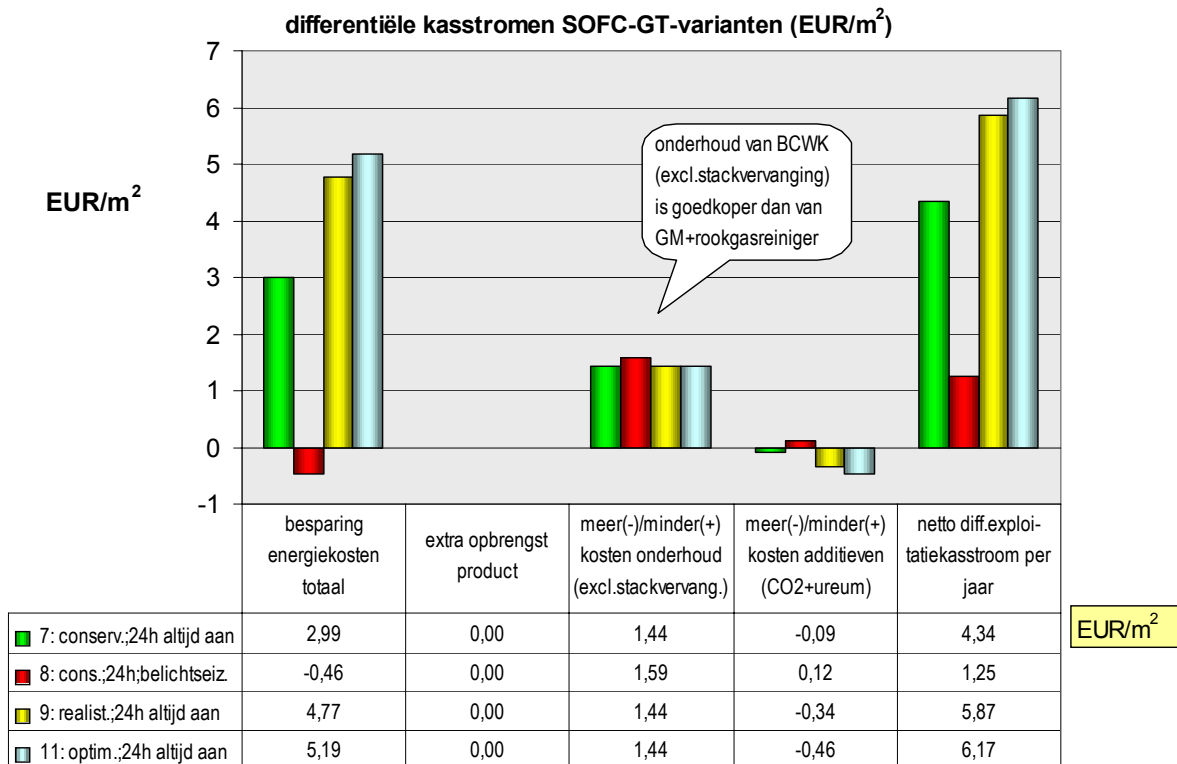
- Dit is de kasstroom vóór belastingen. Hierin is het effect van verminderde belastingbetaling door extra afschrijvingen niet verwerkt. Het effect daarvan hangt af van de rechts-

vorm en de fiscale positie van de investeerder. Deze is situatiespecifiek. In deze studie is gepoogd de rentabiliteit in eerste instantie zo generiek mogelijk in kaart te brengen. Daarom zijn specifieke fiscale consequenties niet meegenomen.

- In het eerste jaar van de projectevaluatieperiode is er uiteraard nog een grote, negatieve kasstroom: de meerinvestering van het alternatieve energiesysteem. Bij de MCFC-varianten is er naar verwachting na 5 en 10 jaar (en verder elke volgende 5 jaar) een extra investering nodig voor de vervanging van de MCFC-stack. Voor de SOFC-GT-systemen wordt een vervangingstermijn van 10 jaar verwacht. Alle (meer)investeringen moeten door bovengenoemde "netto exploitatiekasstroom" in de projectevaluatieperiode worden terugverdiend.
- Er is een inflatiepercentage van 0% genomen (§2.3, punt 20).



Figuur 4.3 Besparing op jaarlijkse uitgaven voor energie (gas en netto-elektriciteit), meerinkomsten extra gaswasproductie (hier 0), meeruitgaven voor onderhoud en voor additieven en de netto differentieële exploitatiekasstroom per jaar voor de MCFC-varianten (in EUR per m² kas).



Figuur 4.4 Besparing op jaarlijkse uitgaven voor energie (gas en netto-elektriciteit), meerinkomsten extra gewasproductie, meeruitgaven voor onderhoud en voor additieven en de netto differentiële exploitatiekasstroom per jaar voor de SOFC-GT-varianten (in EUR per m² kas).

Uit figuur 4.3 blijkt dat bij de MCFC-systemen variant 5 (MCFC met 'optimistisch rendement', die 24 uur per dag in bedrijf is) de grootste netto exploitatiekasstroom heeft. Dit betekent dat deze variant ook het meest rendabel zal zijn. De rentabiliteitscijfers worden in de volgende paragraaf gegeven. Verder valt op dat variant 4, die alleen in het belichtingsseizoen aan is (ook 24 uur per dag) veel minder goed scoort dan de 'altijd-aan' variant 3 met hetzelfde rendement.

Uit figuur 4.4 blijkt dat bij de SOFC-varianten ook de 'altijd-aan' variant met het 'optimistische rendement' het beste scoort. Ook hier is de variant die alleen in het belichtingsseizoen in bedrijf is (8), veel minder gunstig dan de 'altijd-aan' variant 7 met hetzelfde rendement.

Op de rentabiliteit zal in de volgende paragraaf nader worden ingegaan.

4.3 Rentabiliteit

4.3.1 Rentabiliteitskentallen

De *bedrijfseconomische prestatie* van de verschillende varianten zal worden uitgedrukt in de volgende investeringsbeoordelingskentallen:

- (eenvoudige) terugverdientijd (TVT = aantal jaren waarna de netto differentiële exploitatiekasstromen de (meer)investerings- en (eventueel) benodigde herinvesteringskasstromen hebben terugverdiend)
- verbeterde terugverdientijd VTVT (deze houdt rekening met de tijdswaarde¹³ van de kasstromen)¹⁴
- netto contante waarde (NCW)¹⁵
- interne rendementsgraad, of Internal Rate of Return (IRR)¹⁶.

Het eerste investeringskental wordt het meest gebruikt, maar heeft als nadeel dat het geen rekening houdt met het feit dat een kasstroom in principe minder waard is naarmate hij verder weg ligt. Bij de andere investeringskentallen wordt de tijdswaarde wel meegenomen. De NCW en de IRR worden vaak gebruikt bij grote investeringsprojecten. De NCW geeft min of meer aan hoeveel geld er als gevolg van het project in de projectevaluatieperiode kan worden verdiend. De IRR representeert een soort gemiddeld rendement over het geïnvesteerde kapitaal in de projectevaluatieperiode.

¹³ Een kasstroom die pas in de toekomst ontvangen wordt, heeft als die vandaag al zou kunnen worden ontvangen een lagere waarde. Bij een zogenaamde verdisconteringsrente van $r\%$ heeft een kasstroom K die na n jaar binnenkomt, naar de dag van vandaag 'contant gemaakt' een waarde van $K \cdot (100/(100+r))^n$. Voor bijvoorbeeld $r = 6\%$ is de 'naar vandaag contant gemaakte' waarde van een kasstroom van 1000 EUR over 10 jaar ($n=10$) 558 EUR.

¹⁴ *Verbeterde terugverdientijd* (Discounted Payback Period): dit is de periode waarin de verdisconteerde opbrengsten (d.w.z. naar het begin van de beoordelingsperiode 'contant gemaakte' opbrengsten) juist de initiële investering (+ eventuele herinvesteringen) hebben terugbetaald. Deze 'pay-back indicator' houdt rekening met de tijdswaarde van de kasstromen. Alhoewel de (verbeterde) terugverdientijd op zich zelf geen voldoende criterium is om investeringsprojecten te beoordelen, geeft ze wel een indicatie omtrent het risico van het project: het is relatief eenvoudiger om kasstromen in de nabije toekomst in te schatten dan die in de verre toekomst. Een project met een korte pay-back periode heeft dus een lager risico dan een project met een lange pay-back periode.

¹⁵ *Netto-contante-waarde NCW* (engels: Net Present Value (NPV)): dit is som van alle verdisconteerde uitgaande en inkomende (differentiële) cashflows van het project. De interestvoet (verdisconteringsrente) is in principe gelijk aan het minimum rendement dat vereist wordt voor de investering. Een NCW groter dan 0 betekent een hoger rendement, een negatieve NCW juist een lager rendement. Hoe groter de NCW, hoe aantrekkelijker financieel gezien de optie is. De NCW zegt weinig over het risico van de investering. Daarvoor dienen meerdere aspecten te worden bekeken.

¹⁶ *Interne rendementsgraad* (engels: Internal Rate of Return (IRR)): dit is de verdisconteringsrente waarbij de netto-contante-waarde van de cashflows over de beschouwde periode juist 0 is.

4.3.2 Berekening rentabiliteit

In deze paragraaf zullen de rentabiliteitskentallen terugverdiertijd (TVT), verbeterde terugverdiertijd (VTVT), netto contante waarde (NCW) en interne rendementsgraad (IRR) voor de verschillende varianten - voor zover mogelijk - worden bepaald. Deze begrippen zijn in de vorige paragraaf besproken en toegelicht.

De berekeningen van de rentabiliteitskentallen kunnen (zodra de kasstromen bekend zijn, zie paragraaf 4.2) relatief gemakkelijk worden uitgevoerd. Alle cashflows worden voor elk jaar in de evaluatieperiode opgeteld tot netto cashflows per jaar. De uitgaven voor de bouw wordt uitgegeven in jaar "0" maar worden rekentechnisch met de bouwrente herrekend naar een cash-out flow in het jaar 1. De IRR en NCW worden vervolgens berekend uit de resulterende cashflows per jaar over de evaluatieperiode van jaar 1 tot en met jaar n (waarin n het laatste jaar van de evaluatieperiode is). De resultaten van de berekeningen zijn in onderstaande tabellen samengevat. Tabel 4.8 geldt voor de MCFC-varianten en 4.9 voor de SOFC-varianten uitgaande van het investeringsniveau in 2006/2007 voor de MCFC- respectievelijk in 2010 à 2015 voor de SOFC-GT-varianten.

Tabel 4.8 Rentabiliteitskentallen van verschillende MCFC-systeemvarianten uitgaande van de toekomstige investeringsniveaus in 2006/2007 voor een belichtingsniveau van 45 W_e/m² in de situatie zonder gebruikmaking van fiscale instrumenten en/of subsidies.

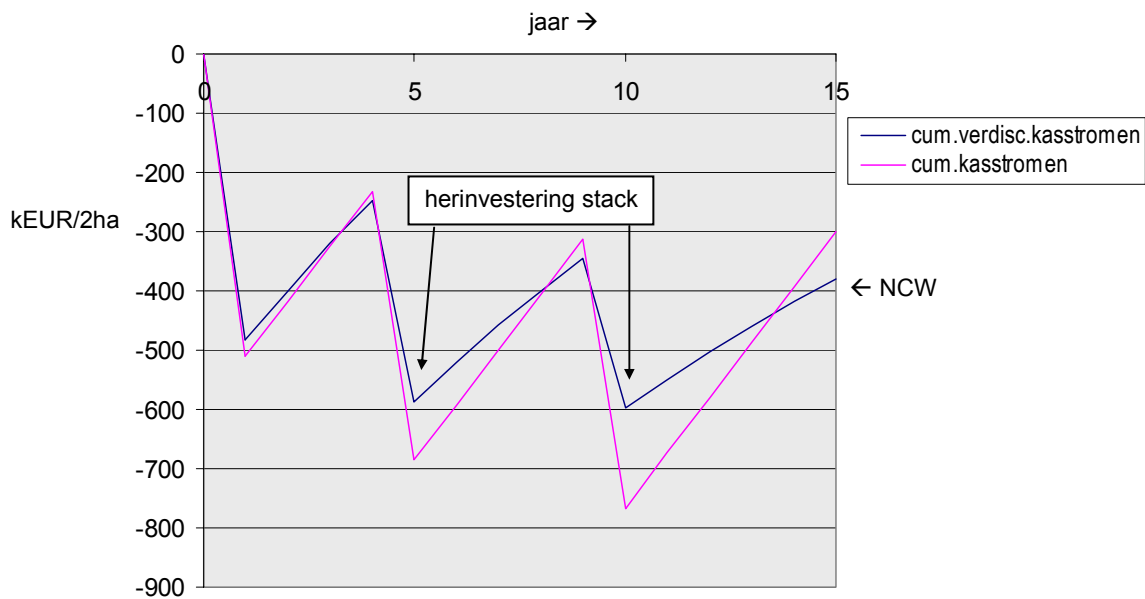
Rentabiliteitskentallen MCFC-varianten uitgaande van investeringsniveau 2006/2007	evaluatie- periode	fiscale / financiële instrumenten	TVT jaar	VTVT jaar	NCW EUR/m ²	IRR %	CO ₂ -kosten-effectiviteit EUR/ton
Systeemvariant (stackvervanging na 5 jaar)	jaar	instrumenten	jaar	jaar	EUR/m ²	%	EUR/ton
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan	15	geen	>30	>30	-39.1	-21.3	137
3: MCFC; realist.rend.(47%); altijd aan	15	geen	>30	>30	-24.6	-10.2	97
5: MCFC; optim.rend.(50%); altijd aan	15	geen	>30	>30	-19.0	-6.3	79
4: MCFC; realist.rend.(47%); 24h aan in belicht.seizoen	15	geen	>30	>30	-52.6	-	n.v.t.

Tabel 4.9 Rentabiliteitskentallen van verschillende SOFC-GT-systeemvarianten uitgaande van de toekomstige investeringsniveaus in 2010 à 2015 voor een belichtingsniveau van 45 W_e/m² in de situatie zonder gebruikmaking van fiscale instrumenten en/of subsidies.

Rentabiliteitskentallen SOFC-GT uitgaande van investeringsniveau 2010 à 2015	evaluatie- periode	fiscale / financiële instrumenten	TVT jaar	VTVT jaar	NCW EUR/m ²	IRR %	CO ₂ -kosten-effectiviteit EUR/ton
Systeemvariant (stackvervanging na 10 jaar)	jaar	instrumenten	jaar	jaar	EUR/m ²	%	EUR/ton
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan	15	geen	2.9	3.0	26.1	51.7	31
8: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); 24h aan in belichtingsseizoen	15	geen	15.0	>30	-4.0	0.1	364
9: SOFC/GT; realist.rend.(64.5%); altijd aan	15	geen	2.1	2.2	41.0	88.9	22
11: SOFC/GT; optim.rend.(69.5%); altijd aan	15	geen	2.0	2.1	43.8	97.9	21

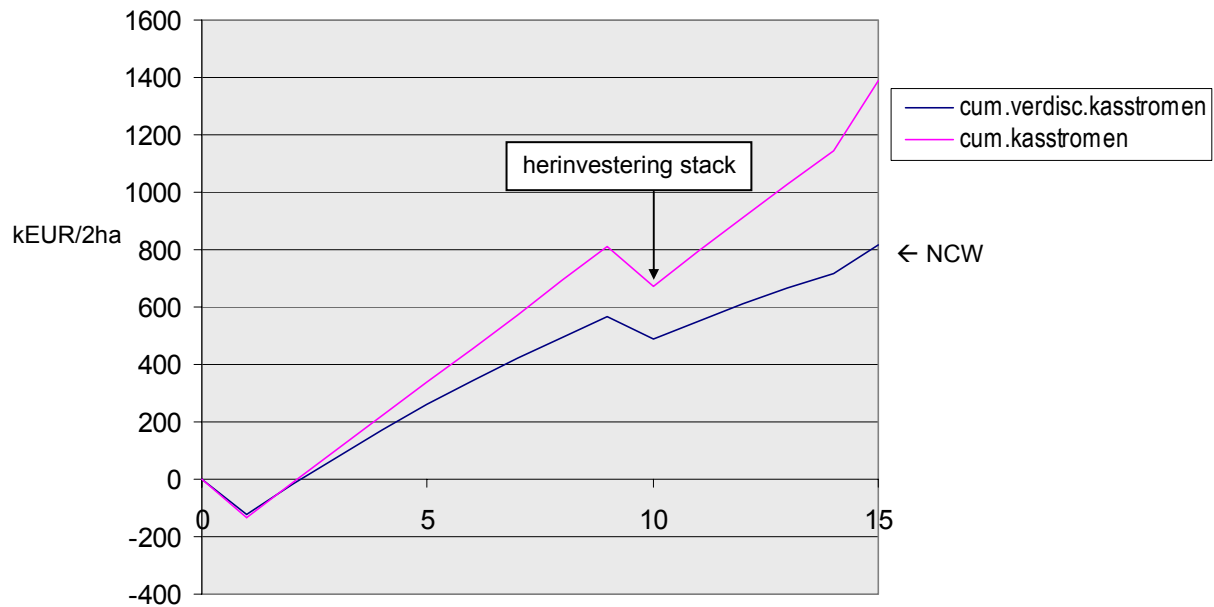
Uit tabel 4.8 blijkt, dat geen van de MCFC-varianten zich onder de aangenomen condities terugverdiert. Dit is een gevolg van de herinvestering in een nieuwe 'MCFC-stack' die perio-

diek na 5 jaar dient plaats te vinden. In figuur 4.5 waarin de cumulatieve kasstroom en de cumulatieve verdisconteerde kasstroom als functie van het jaartal in de projectevaluatieperiode zijn uitgezet voor variant 5, is het effect van de herinvestering duidelijk te zien. Het zal duidelijk zijn, dat bij het huidige investeringsniveau van MCFC-systemen (dat nog circa een factor 3 hoger ligt dan verwacht in 2006/2007) de MCFC-varianten zich zeker niet terugverdienen.



Figuur 4.5 Cumulatieve kasstromen van de MCFC-variant 5 met een elektrisch rendement van 50% en een “altijd aan” bedrijfsvoering. Door de herinvestering in de stack na 5 en 10 jaar verdient het systeem zich niet terug. De netto-contante waarde van deze variant is ca -380 kEUR per 2 ha (= -19 EUR/m²).

Van de SOFC-GT systemen verdienen de “altijd aan” zich in 2 à 3 jaar terug. De cumulatieve (verdisconteerde) kasstromen van het systeem met het “realistische rendement” (64.5%) zijn gegeven in figuur 4.6. Door de lagere meerinvestering dan bij de MCFC-varianten (zie figuur 4.2), de hogere netto differentiële exploitatiekasstroom (vergelijk figuur 4.3 en 4.4) en de langere vervangingsperiode van de stack, is de rentabiliteit van de (toekomstige) SOFC-GT systemen veel beter dan die van de MCFC-systemen. Zoals eerder aangegeven, is het nog wel een hele opgave om het hier gehanteerde prijsniveau (1000 USD/kWe) te halen. We hebben de terugverdientijd daarom ook bepaald voor een 25%, 50% en 100% hoger investeringsniveau. Het effect op de eenvoudige terugverdientijd is weergegeven in tabel 4.10. Bij een investeringsniveau van USD 1500 per kWe, zijn de ‘altijd-aan’ SOFC-GT-varianten nog steeds economisch aantrekkelijk. Bij USD 2000 per kWe is niet meer het geval (alleen de optimistische variant zit dan nog op de “rand”).



Figuur 4.6 Cumulatieve kasstromen van de SOFC-GT-variant met een elektrisch rendement van 64.5% en een "altijd aan" bedrijfsvoering (investeringsniveau 2010 à 2015). De netto-contante waarde van deze variant is ca 820 kEUR per 2 ha (= 41 EUR/m²).

Tabel 4.10 Overzicht van het effect van hogere investeringskosten op de eenvoudige terugverdientijd van de 'altijd aan' SOFC-GT varianten

TVT (jaar)	investeringsniveau→	1000 USD ^{*)}	1250 USD	1500 USD	2000 USD
7 SOFC-GT conservatief, 'altijd aan'		2.9	5.2	7.5	15.1
9 SOFC-GT realistisch, 'altijd aan'		2.1	3.8	5.6	13.3
11 SOFC-GT optimistisch, 'altijd aan'		2.0	3.7	5.3	8.6

^{*)} door leverancier verwacht investeringsniveau SOFC-GT-systeem voor 2010 à 2015

In tabel 4.9 valt nog op, dat variant 8 (SOFC-GT conservatief rendement, 24 uur per dag aan in het belichtingsseizoen) economisch niet aantrekkelijk is (terugverdientijd van ca 15 jaar), terwijl de 'altijd aan' conservatieve variant 7, dat wel is (TVT= 2.9 jaar). Dit heeft te maken met het feit dat in dit geval de (financieel aantrekkelijke) teruglevering van elektriciteit tijdens plateau-uren buiten het belichtingsseizoen ontbreekt. Zelfs de referentie-WK heeft – als gevolg van het CO₂-doseren - meer teruglevering tijdens plateau-uren. Daardoor is de besparing op de energiekosten bij variant 8 negatief (zie ook figuur 4.4). Resteren alleen de lagere onderhoudskosten en de ontbrekende ureum-kosten als positieve (differentiële) kasstromen

die de meerinvestering in de SOFC-GT en herinvestering in de SOFC-stack moeten terugverdienen.

In de laatste kolom van tabel 4.8 en 4.9 is de *CO₂-kosteneffectiviteit* gegeven. Dit kengetal is gedefinieerd als de jaarlijkse annuïteit van een lening ter grootte van de (meer)investering (bij het aangenomen rentepercentage - hier 6% - en bij een looptijd ter grootte van de projectevaluatieperiode, hier 15 jaar) gedeeld door de jaarlijkse CO₂-reductie. SOFC-GT varianten 9 en 11 hebben de beste kosteneffectiviteit van alle varianten (22 respectievelijk 21 EUR/ton¹⁷). De beste MCFC-variant (5) heeft een CO₂-kosteneffectiviteit van 79 EUR/ton.

Verder wordt nog opgemerkt dat in de hiervoor behandelde rentabiliteitsberekeningen nog geen rekening is gehouden met fiscale stimuleringsinstrumenten zoals de EIA-regeling. Hierop zal hieronder worden ingegaan.

Fiscale instrumenten

De overheid wil projecten die energie besparen stimuleren. Hiertoe heeft zij verschillende fiscale instrumenten in het leven geroepen. De belangrijkste – nog bestaande – regeling is de EIA-regeling¹⁸. De EIA wordt hieronder kort besproken:

EIA: energie-investeringsaftrek: op 1 januari 1997 is de energie-investeringsaftrek-regeling EIA ingevoerd. Investerings in energiebesparende maatregelen en duurzame energietechnieken mogen - voor zover ze op een kwalificerende lijst voorkomen - voor een bepaald percentage van het investeringsbedrag van de fiscale winst worden afgetrokken, waardoor het bedrijf netto minder belasting hoeft te betalen.

Ook WK-systemen en brandstofcelsystemen (mits het totaal energetisch rendement¹⁹ tenminste 65% bedraagt), warmtebuffersystemen en rookgasreinigingssystemen voor CO₂-bemesting zijn op deze lijst opgenomen. Het percentage EIA bedraagt in het jaar 2004 55%. Effectief betekent dit voor een bedrijf dat 34.5% vennootschapsbelasting betaalt, circa 19 % besparing op de investering, mits er voldoende winst gemaakt wordt. In een kalenderjaar wordt per fiscale eenheid/ondernemer over ten hoogste EUR 106 miljoen aan EIA verleend.

¹⁷ Dit is nog steeds aanzienlijk duurder dan de prijs van een ton CO₂ in het kader van de (per 1 januari 2005 geplande) handel in CO₂-emissies. De zogenaamde Carbon Market Indicator (CMI) geeft de gemiddelde prijs aan op de Europese CO₂-markt. Eind 2003 was de prijs ca EUR 12.50/tonCO₂. Na het bekend maken van de nationale allocatieplannen (begin 2004) is de CMI ongeveer gehalveerd. Voor (alleen) de CO₂-handel is de brandstofcel voorlopig dus nog niet interessant.

¹⁸ Sinds 1 januari 2003 komen energie-investeringen niet langer meer in aanmerking voor de VAMIL-regeling.

¹⁹ het totaal energetisch rendement is in de EIA regeling gedefinieerd als de som van het rendement van de opwekking van kracht en tweederde deel van het rendement van de productie van nuttig aan te wenden warmte (berekend op onderwaarde)

Het totale budget voor 2004 bedraagt EUR 169 miljoen aan fiscaal voordeel. Hiervoor kan het bedrijfsleven circa 1 miljard EUR aan energie-investeringen doen. We hebben aangenomen dat ook de vervanging van de brandstofcelstack onder de EIA-regeling valt en dat de EIA-regeling de komende jaren blijft bestaan.

De bovengenoemde fiscale maatregel kan alleen worden benut als de investeerder belasting betaalt (en winst maakt). We gaan hier in de navolgende berekening vanuit. Desnoods kan op indirecte wijze van bovengenoemde regelingen gebruik worden gemaakt middels financiële (lease-)constructies met banken. De bank koopt in deze situatie de bedrijfsmiddelen en geniet het EIA-voordeel. De tuinder leest de productiemiddelen van de bank. De bank zal (een deel) van het EIA-voordeel weer doorgeven aan de klant, waardoor deze indirect toch van de regelingen kan profiteren. Tabel 4.11 en 4.12 geeft voor de MCFC- respectievelijk de SOFC-GT-varianten de rentabiliteitscijfers uitgaande van de toekomstige investeringscijfers en 55% EIA op de investeringen in brandstofcel, WK-installatie, rookgasreiniger en warmtebuffer. De verwachte netto-investeringen in de MCFC-BCWK wordt met EIA circa 54.3 EUR/m² (was ca 65.3), die van de SOFC-GT circa 39.9 EUR/m² (was ca 47.8) en die van het referentiesysteem circa 29.9 EUR/m² (was ca 35.5).

Voor de MCFC-BCWK's (tabel 4.11) blijven alle varianten ook met gebruikmaking van het fiscale instrument EIA bedrijfseconomisch (zeer) aantrekkelijk.

Tabel 4.11 Rentabiliteitscijfers van MCFC-systeemvarianten in het geval dat EIA wordt verkregen (bij een belichtingsniveau van 45 W_e/m²).

Rentabiliteitscijfers MCFC-varianten uitgaande van investeringsniveau 2006/2007	evaluatie- periode	fiscale / financiële instrumenten	TVT	VTVT	NCW	IRR	CO ₂ -kosten-effectiviteit
Systeemvariant (45 W _e /m ² ; stackvervanging na 5 jaar)	jaar		jaar		EUR/m ²	%	EUR/ton
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan	15	EIA	>30	>30	-27.1	-16.5	137
3: MCFC;realist.rend.(47%); altijd aan	15	EIA	>30	>30	-12.7	-4.0	97
5: MCFC;optim.rend.(50%); altijd aan	15	EIA	14.8	>30	-7.0	0.4	79
4: MCFC;realist.rend.(47%);24h aan in belicht.seizoen	15	EIA	>30	>30	-40.7	-	n.v.t.

Voor de SOFC-GT-systemen betekent de EIA een verdere verbetering van het financiële rendement. Variant 7, 9 en 11 blijven zeer aantrekkelijk. Variant 8 begint in de buurt te komen van een rendabel systeem.

Tabel 4.12 Rentabiliteitskentallen van SOFC-GT-systeemvarianten in het geval dat EIA wordt verkregen (bij een belichtingsniveau van 45 W_e/m²).

Rentabiliteitskentallen SOFC-GT uitgaande van investeringsniveau 2010 à 2015 Systeemvariant (45 W _e /m ² ; stackvervanging na 10 jaar)	evaluatie- periode jaar	fiscale / financiële instrumenten	TVT jaar	VTVT jaar	NCW EUR/m ²	IRR %	CO ₂ -kosten- effectiviteit EUR/ton
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan	15	EIA	2.3	2.5	29.0	73.4	31
8: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); 24h aan in belichtingsseizoen	15	EIA	8.1	17.1	-1.0	4.1	364
9: SOFC/GT; realist.rend.(64.5%); altijd aan	15	EIA	1.7	1.8	43.9	135.9	22
11: SOFC/GT; optim.rend.(69.5%); altijd aan	15	EIA	1.7	1.7	46.8	153.2	21

Hieronder is voor de MCFC-varianten nog onderzocht hoe de rentabiliteit zou verbeteren, als de stack niet na 5 maar pas naar 7 jaar zou hoeven worden te vervangen (ervan uitgaand dat de leverancier de levensduur van de stack zou weten te verlengen). Tabel 4.13 laat zien dat variant 5 met een elektrisch rendement van 50% en 'altijd-aan-bedrijfsvoering' dan een terugverdientijd van ca 5.3 jaar heeft (rekening houdend met EIA). Bij de 47% 'altijd-aan' variant 3 is dat ca 11.5 jaar. Variant 5 is rendabel. Variant 3 (net) niet. Variant 1 en 4 zijn nog steeds (erg) onrendabel.

Tabel 4.13 Rentabiliteitskentallen van MCFC-systeemvarianten in het geval dat EIA wordt verkregen (bij een belichtingsniveau van 45 W_e/m²) ervan uitgaand dat de stack pas na 7 jaar hoeft te worden vervangen.

Rentabiliteitskentallen MCFC-varianten uitgaande van investeringsniveau 2006/2007 Systeemvariant (stackvervanging na 7 jaar)	evaluatie- periode jaar	fiscale / financiële instrumenten	TVT jaar	VTVT jaar	NCW EUR/m ²	IRR %	CO ₂ -kosten- effectiviteit EUR/ton
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan	15	EIA	19.3	>30	-14.8	-5.7	137
3: MCFC; realist.rend.(47%); altijd aan	15	EIA	11.5	15.2	-0.3	5.7	97
5: MCFC; optim.rend.(50%); altijd aan	15	EIA	5.3	11.6	5.3	10.3	79
4: MCFC; realist.rend.(47%); 24h aan in belicht.seizoen	15	EIA	>30	>30	-28.4	-16.5	n.v.t.

In de volgende paragraaf zal het effect van onzekerheden in de diverse relevante parameters op de rentabiliteitskentallen worden onderzocht.

4.4 Gevoeligheidsanalyse / risico

In deze paragraaf zal worden nagegaan hoe gevoelig de rentabiliteitscijfers zijn voor onzekerheden in de belangrijkste bepalende parameters. Daartoe wordt voor elk van die parameters een onzekerheidsgebied geschat. Vervolgens wordt voor elke parameter het effect op de rentabiliteitskentallen berekend, wanneer die parameter tussen de uiterste waarden van het onzekerheidsgebied varieert. De verschillende effecten kunnen worden uitgezet in een zogenaamd 'Tornado-diagram'. Hierin worden in volgorde van afnemende gevoeligheid

middels balken de verschillende gevoeligheden uitgezet ten opzichte van de 'middenwaarde' (verwachte waarde). Het resulterende diagram heeft een vorm die enigszins lijkt op de trechtervorm van een tornado, vandaar de benaming.

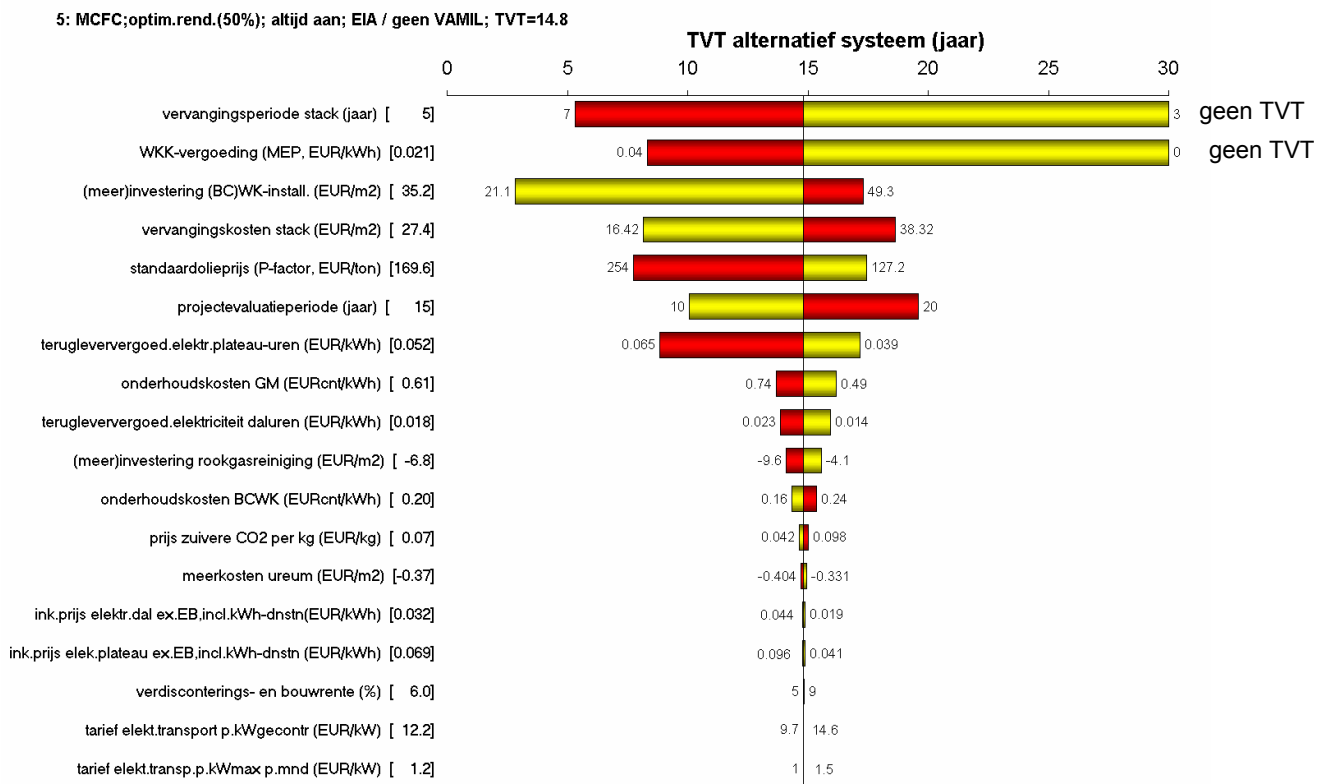
Figuur 4.7 toont het tornadodiagram voor de terugverdientijd (TVT) van de meest rendabele MCFC-variant uit tabel 4.11 ('altijd-aan', optimistisch rendement, situatie met EIA). De verwachte waarde van de TVT bedraagt 14.8 jaar. De parameters die invloed hebben op de TVT staan links in de figuur. Tussen rechte haken achter de parameterbeschrijving staat de aangenomen 'middenwaarde' van de betreffende parameter.

- De bovenste rode balk geeft aan hoeveel de TVT korter wordt, indien de *stackvervangingsperiode* 7 jaar zou zijn in plaats van 5. De TVT daalt dan naar 5.3 jaar (zoals ook al in tabel 4.13 is aangegeven). Wordt de stackvervangingsperiode 3 jaar dan wordt de terugverdientijd > 30 jaar. In de grafiek is de maximale waarde die kan worden aangegeven, 30 jaar. In werkelijkheid verdient deze situatie zich helemaal niet terug (indicatie 'geen TVT').
- De tweede parameter op de gevoeligheidsranglijst is de hoogte van de MEP-vergoeding (zie §2.3 punt 9). Wordt in plaats van de veronderstelde vergoeding van 0.021 EUR per CO₂-vrije kWh, de MEP-vergoeding 0.04 EUR/kWh, dan daalt de TVT naar ca 8.3 jaar. Wordt de MEP afgeschaft (0.0 EUR/kWh), dan verdient het systeem zich niet meer terug (> 30 jaar, geen TVT).
- De derde parameter qua effect op de TVT is de meerinvestering in de brandstofcel-WK installatie ten opzichte van een gasmotor-WK. Is de meerinvestering 40% lager dan de middenwaarde (21.1 i.p.v. 35.2 EUR/m²), dan verbetert de TVT sterk (van 14.8 naar 2.8 jaar). Is de meerinvestering 40% hoger, dan stijgt de TVT naar 17.3 jaar.
- De vierde parameter qua effect op de TVT betreft de vervangingskosten van de stack. Een 40% goedkopere stackvervanging doet de TVT dalen van 14.8 naar 8.2 jaar. 40% hogere kosten betekenen een stijging naar 18.6 jaar.
- Op de vijfde plaats qua gevoeligheid komt de gasprijs, waarvan de commodity-prijs is gekoppeld aan de olieprijs. De rode balk geeft aan hoeveel de TVT daalt als de olieprijs 50% hoger zou zijn. (De olieprijs wordt gekenmerkt door de zogenaamde "*P-factor*", waarmee ook de gasprijs evenredig is, zie punt 3 paragraaf 2.3.) In termen van de gasprijs betekent de middenwaarde van de P-factor van 169.6 EUR/ton een commodity-prijs van aardgas van 12.32 EURct/m³. De P-waarde rechts bij de rode balk (254 EUR/ton = +50%) betekent een commodityprijs van 18.67 EURct/Nm³. In dit geval zou de TVT verbeteren van 14.8 naar 7.7 jaar (de IRR wordt hierbij 11.4% en de NCW 6.6 EUR/m²). Een P-waarde van 127.2 EUR/ton (-25%, gele balk) betekent een commodity-gasprijs van 9.15 EURct/m³. In dit geval zou de TVT toenemen tot 17.4 jaar (de IRR wordt negatief: -5%, evenals de NCW: -13.82 EUR/m²). Er moet hierbij nog worden opgemerkt, dat bij de

effectbepaling van de olie-/gasprijs op de TVT is verondersteld, dat de elektriciteitsprijzen zijn gekoppeld aan de gasprijs²⁰. Zou de elektriciteitsprijzen niet zijn gekoppeld, dan zou het effect van P-factor omgekeerd zijn. Een 50% hogere P-factor zou dan een langere TVT betekenen (van 14.8 naar 17.6 jaar), een 25% lagere P-factor zou de TVT verkorten tot 13.7 jaar. (De richting van het effect is in dit geval als volgt te verklaren; de MCFC-variant gebruikt meer gas dan de referentie (zie tabel 3.7); duurder gas betekent hogere gasinkoopkosten en dus een lagere besparing op netto-energiekosten waardoor de TVT toeneemt)

- Een wat bijzondere invloedsfactor is de duur van de projectevaluatieperiode. Als hiervoor 10 jaar wordt genomen in plaats van 15 jaar, dan daalt de TVT (op het eerste gezicht verrassend) naar 10.1 jaar. Dit komt omdat in deze situatie na 10 jaar geen herinvestering in de stack meer gedaan wordt en kort daarna de oorspronkelijke investering en de herinvestering na 5 jaar zijn terugverdiend. Een soortgelijk maar omgekeerd effect treedt op bij een verlenging van de projectevaluatieperiode tot 20 jaar. Nu wordt in tegenstelling tot bij de standaardsituatie in het 15-de jaar nog een herinvestering in de stack gedaan, waardoor de 'break-even' situatie pas ongeveer 5 jaar later plaats vindt.
- De zevende parameter op de gevoeligheidsranglijst is de hoogte van de *terugleververgoeding van elektriciteit tijdens plateau-uren*. Als de vergoeding in plaats van de aangenomen 0.052 EUR/kWh 25% hoger is (0.065 EUR/kWh), dan daalt de TVT naar ca 8.9 jaar. Zou de prijs 25% lager worden (0.039 EUR/kWh) dan stijgt de TVT naar 17.2 jaar.
- De overige invloedsfactoren zullen we niet meer expliciet behandelen omdat het effect op de TVT beperkt blijft. De transporttarieven per 'kW gecontracteerd' en per maand per 'kWmax' hebben geen invloed op de TVT, omdat een beperkte vaste contractcapaciteit van 30 kW per ha is aangenomen en omdat voor de (veel grotere) teruglevering geen kW-gebonden transportkosten verschuldigd zijn (zie §2.3, punt 11).

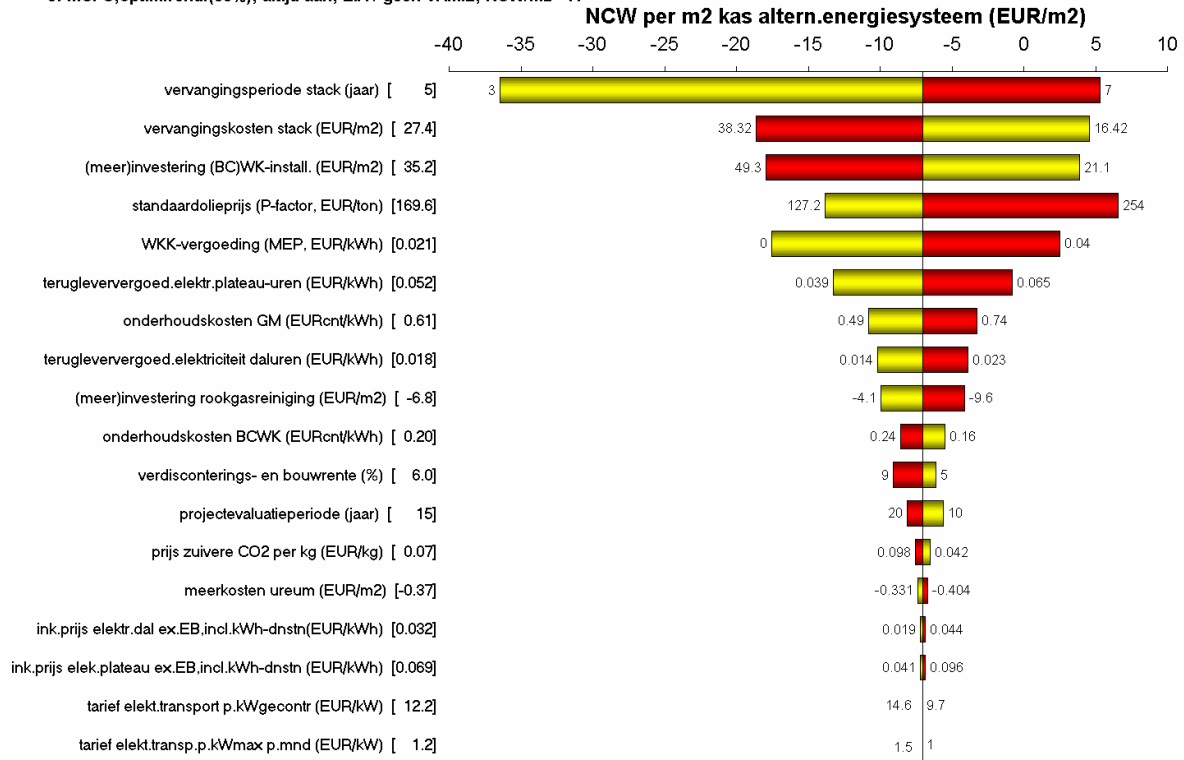
²⁰ Hoewel de elektriciteitsprijs tot stand komt op een markt waar behalve elektriciteit uit gasgestookte centrales ook elektriciteit van andere oorsprong wordt aangeboden (uit kolen, bruinkool, kernsplijting, biomassa, wind en dergelijke), is het grootste deel van het verbruik in Nederland op dit moment nog gebaseerd op aardgas als primaire energiedrager. De producenten hiervan zullen proberen de stijging in de brandstofkosten door te berekenen in de elektriciteitsprijzen, zodat de marges gehandhaafd blijven. In het tornadodiagram van figuur 4.7 is er van uitgegaan dat, als de standaardolieprijs (P-waarde) stijgt - en daarmee de commodity-gasprijs - tevens de volumeprijs van elektriciteit voor zowel plateau-uren als daluren en voor zowel inkoop als verkoop stijgt, en wel zoveel dat extra brandstofkosten juist worden gecompenseerd (uitgaande van een gemiddeld centralerendement inclusief transport- en distributieverliezen van 41.9%).



Figuur 4.7 Tornado diagram van de terugverdientijd (TVT) van MCFC variant 5 ('altijd-aan', optimistisch rendement, prijsniveau 2006/2007, met EIA). De stackvervangingsperiode heeft de grootste invloed op de TVT.

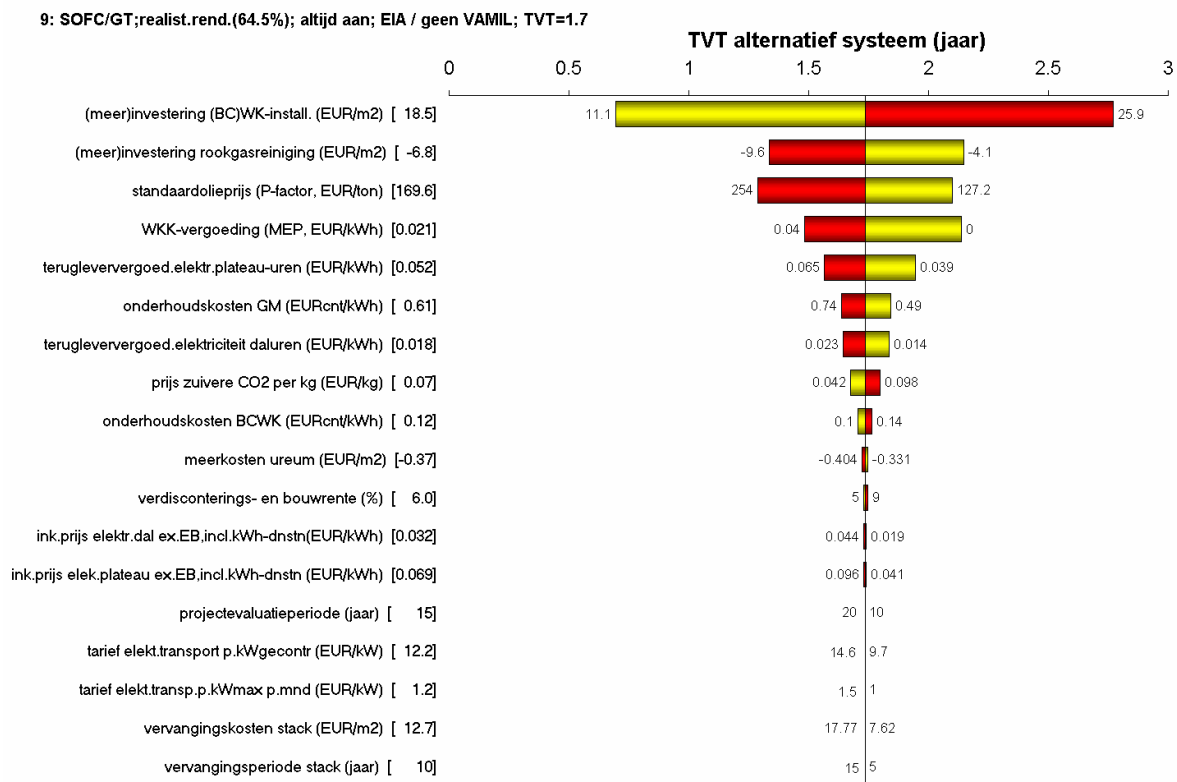
Figuur 4.8 geeft het tornado-diagram voor hetzelfde systeem als hiervoor besproken, maar nu voor de netto-contante-waarde (= som van de verdisconteerde kasstromen over 15 jaar) uitgedrukt in EUR per m² kas. De vervangingsperiode van de stack heeft ook hier het grootste effect op het rentabiliteitskengetal. Een vervangingsperiode van 7 jaar leidt tot een positieve NCW van ca 5 EUR/m². Moet de stack al na 3 jaar worden vervangen, dan verliest de investeerder/exploitant over 15 jaar ca 37 EUR/m² (verdisconteerd). Uit de figuur kan verder worden afgeleid dat ook een positieve NCW kan worden verkregen als de vervangingskosten van de stack (40%) gunstiger uitpakken, de meerinvestering (40%) lager wordt, de standaard-olieprijs (met daaraan gekoppeld de gas- en elektriciteitsprijzen) met 50% stijgt, de MEP-vergoeding gunstiger wordt (4 in plaats van 2.1 EURct per kWh CO₂-neutraal) of een combinatie van deze (en eventueel één of meerdere van de andere, minder dominante) factoren.

5: MCFC;optim.rend.(50%); altijd aan; EIA / geen VAMIL; NCW/m2=-7.



Figuur 4.8 Tornado diagram van de netto-contante waarde (NCW) van MCFC variant 5 ('altijd-aan', optimistisch rendement, prijsniveau 2006/2007, met EIA). De stackvervangingsperiode heeft de grootste invloed op de NCW.

In figuur 4.9 is het tornado-diagram van de TVT's van de SOFC-GT variant 9 ('altijd aan', realistisch rendement, investeringsniveau 2010 à 2015, situatie met EIA) gegeven. Het tornado diagram heeft een geheel ander verloop dan dat van het MCFC-systeem (zie figuur 4.7). Verreweg het grootste effect op de TVT heeft de meerinvestering in de BCWK-installatie. Is in plaats van de (voor 2010 à 2015) verwachte 18.5 EUR/m² een 40% hogere meerinvestering nodig (25.9 EUR/m²), dan stijgt de TVT van 1.7 naar circa 2.8 jaar. Zou de meerinvestering 40% lager zijn, dan wordt de TVT verkort tot ca 0.7 jaar.



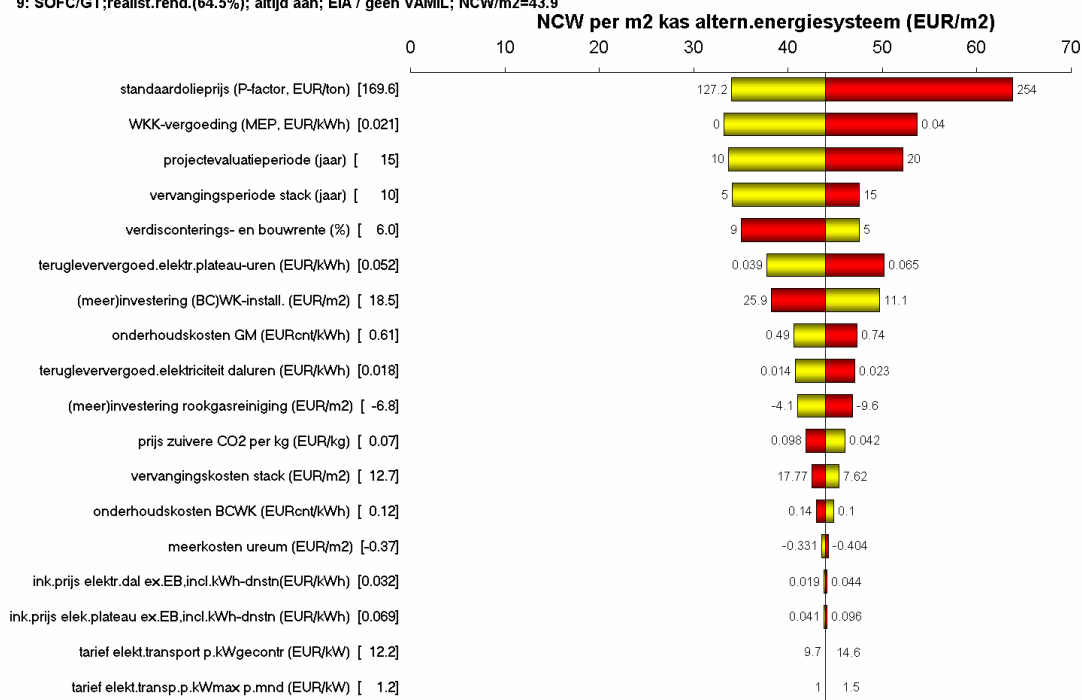
Figuur 4.9 Tornado diagram van de terugverdientijd (TVT) van SOFC-GT variant 9 ('altijd-aan' met realistisch rendement, prijsniveau 2010 à 2015 met EIA). De meerinvestering in de BCWK heeft de grootste invloed op de TVT.

De tweede factor qua effect op de TVT is de minderinvestering (= negatieve meerinvestering) in de rookgasreiniger. Een 40% goedkopere respectievelijk duurdere rookgasreiniging dan de middenwaarde verlengt c.q. verkort de TVT met ca 0.4 jaar. Derde qua effect is de standaardolieprijs, waarbij weer is aangenomen dat de elektriciteitsprijs hiermee indirect via de (olieprijs gerelateerde) gasprijs is gekoppeld (zie voetnoot 20. Een 50% hogere P-factor (en daarmee commodity-gasprijs) verkort de TVT met bijna een half jaar. Een 25% lagere prijs verlengt de TVT met bijna 0.4 jaar. De volgende invloedsfactor in grootte is de MEP-vergoeding voor CO₂-vrije kWh. Als de MEP zou worden afgeschaft, dan stijgt de TVT tot ca 2.1 jaar. Een MEP van 0.04 EUR/kWh betekent dat de TVT daalt tot circa 1.5 jaar. Hierna komt de terugleververgoeding voor elektriciteit tijdens de plateau-uren. De invloed van deze factor is kleiner dan een kwart jaar. De effecten van de overige invloedsfactoren (o.a. specifieke onderhoudskosten van de gasmotor en de terugleververgoeding tijdens daluren) zijn nog kleiner. Uit dit tornado-diagram blijkt duidelijk dat het risico van een investering in een dergelijke brandstofcel-WK-installatie gering is. De enige vraag die resteert is, of de fabrikant in staat zal zijn een zodanige kostprijsverlaging door te voeren dat een dergelijk systeem te zijner tijd tegen het veronderstelde prijsniveau leverbaar is.

Verder wordt nog opgemerkt dat bij de SOFC-GT-variant – in tegenstelling tot bij het hiervoor behandelde MCFC-systeem - de vervangingsperiode en de vervangingskosten van de brandstofcelstack geen invloed hebben op de TVT terwijl deze factoren bij het MCFC systeem dominant waren. Dit is een gevolg van het feit, dat het systeem zich al heeft terugverdiend voordat de stack moet worden vervangen (ook als de stack al na 5 jaar zou moeten worden vervangen in plaats van na 10 jaar). Dit heeft onder meer te maken met het betere elektrisch rendement, waardoor de besparing op netto-energiekosten veel beter is dan bij MCFC en de lagere meerinvestering.

Voor de volledigheid is hieronder ook het tornadodiagram van de netto-contante-waarde van de SOFC-GT variant gegeven, waaruit het effect van afwijkingen in de verwachte waarde van de invloedsparameters blijkt op de ‘netto opbrengsten’ van de investering over 15 jaar (of preciezer geformuleerd: op de cumulatieve verdisconteerde kasstromen over 15 jaar). De standaardolieprijs heeft de grootste invloed op de NCW.

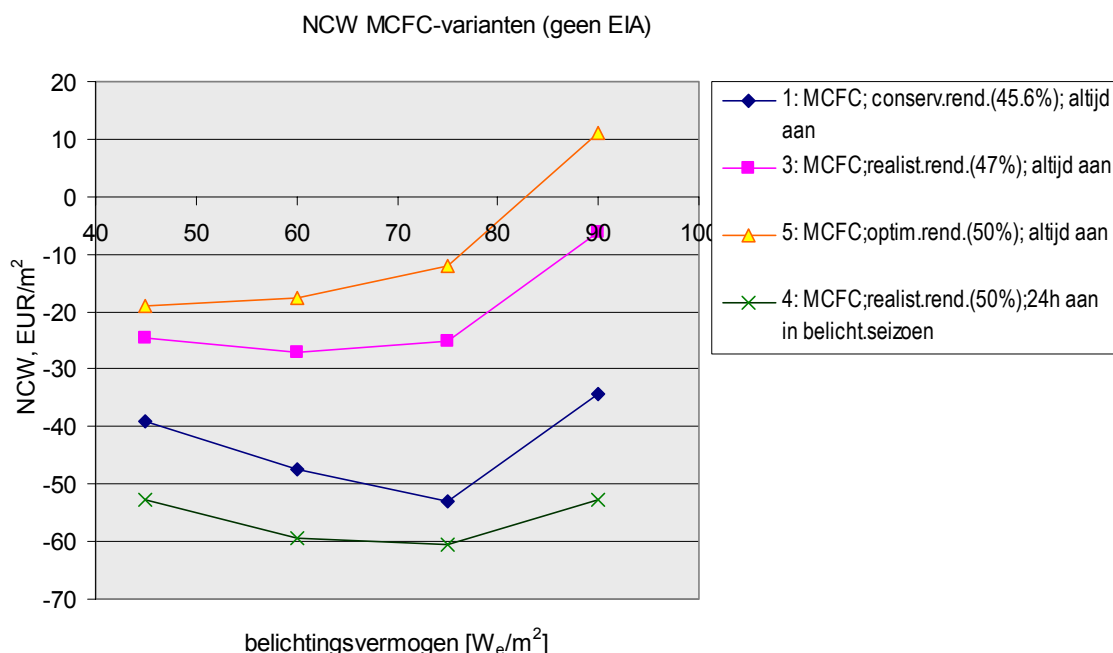
9: SOFC/GT;realist.rend.(64.5%); altijd aan; EIA / geen VAMIL; NCW/m2=43.9



Figuur 4.10 Tornadodiagram van de netto-contante-waarde (NCW) van de SOFC-GT variant 9 ('altijd-aan' met realistisch rendement, prijsniveau 2010 à 2015 met EIA). De standaard-olieprijs (met daaraan gekoppeld de gas- en de elektriciteitsprijs) heeft de grootste invloed op de NCW.

4.5 Rentabiliteit bij andere belichtingsniveaus

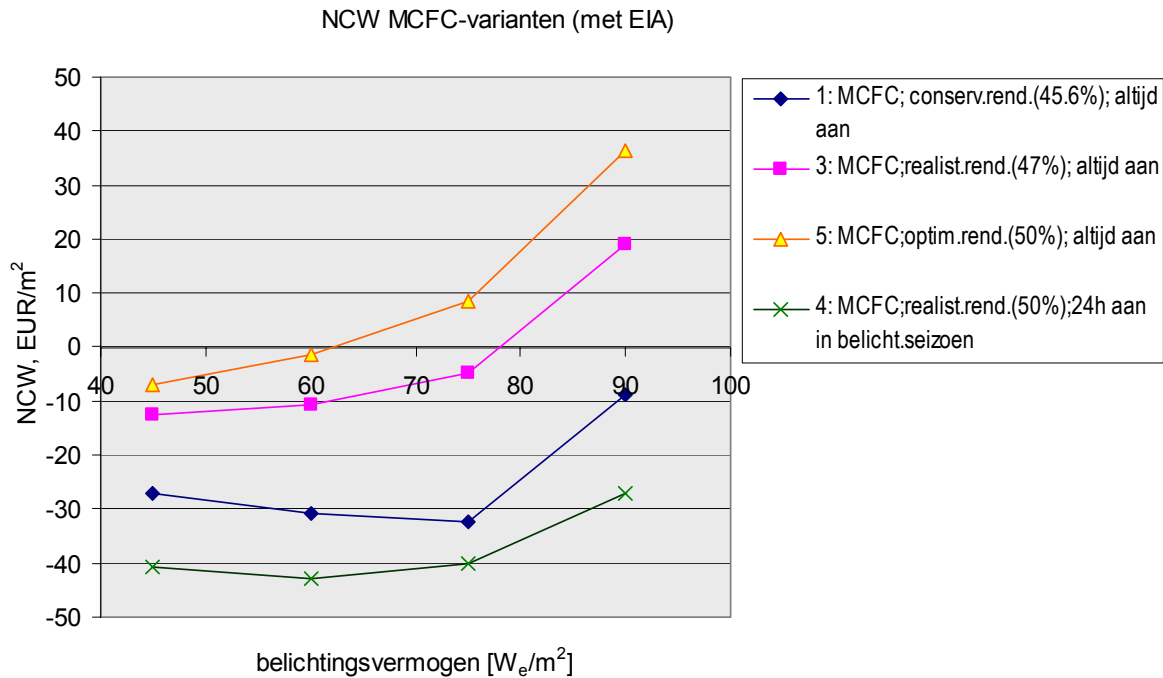
In paragraaf 4.3 zijn de rentabiliteitscijfers voor het belichtingsniveau van $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$ gegeven. Deze cijfers zijn ook bepaald voor belichtingsniveaus van 60, 75 en $90 \text{ W}_e/\text{m}^2$. Ze zijn getabelleerd in bijlage F. Figuur 4.11 geeft een overzicht van de netto-contante waarde van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsniveau (in de situatie waarbij nog geen rekening is gehouden met EIA). Alleen de 'altijd-aan' variant 5 met een elektrisch rendement van 50% heeft bij $90 \text{ W}_e/\text{m}^2$ een netto-contante-waarde groter dan 0 (bedenk dat een NCW van 0 overeenkomt met een rendement (IRR) gelijk aan de verdisconteringsrente, hier gesteld op 6%).



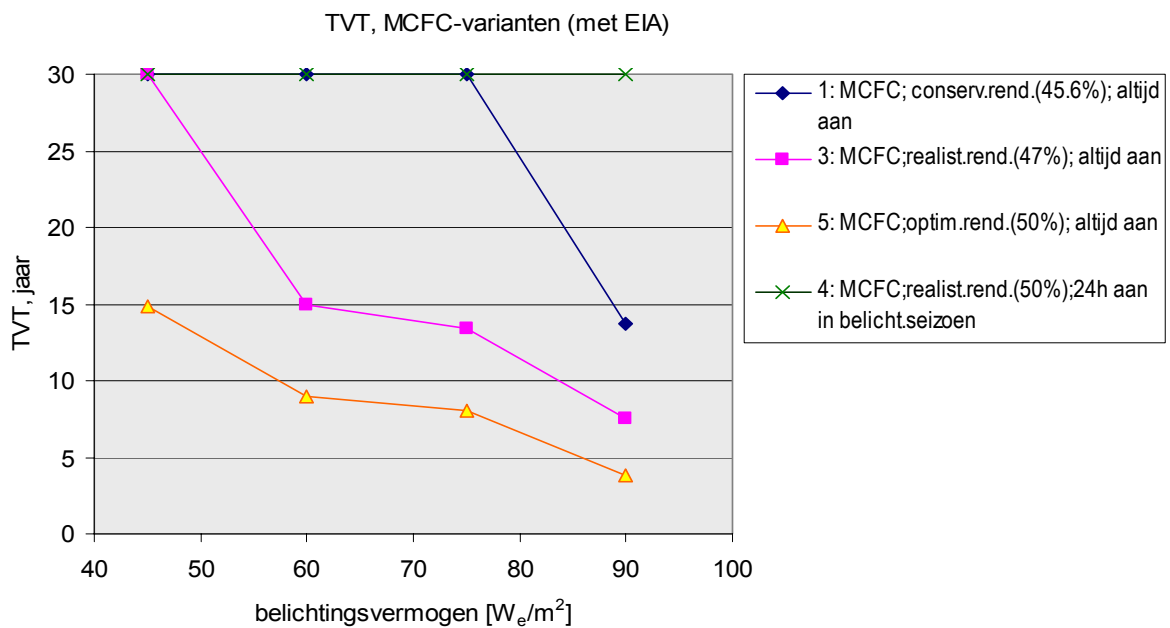
Figuur 4.11 NCW van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2006/2007, zonder EIA).

Figuur 4.12 geeft dezelfde figuur maar nu in de situatie waarbij (optimaal) gebruik gemaakt wordt van de EIA-regeling. In deze situatie heeft variant 5 al vanaf een belichtingsniveau van ongeveer $60 \text{ W}_e/\text{m}^2$ een NCW groter dan 0 EUR/ m^2 en variant 3 vanaf ca $78 \text{ W}_e/\text{m}^2$. De NCW van de overige varianten blijft negatief. Figuur 4.13 geeft voor dezelfde condities als figuur 4.12 de terugverdientijd (TVT). Variant 5 heeft bij belichtingsvermogens van 75 en $90 \text{ W}_e/\text{m}^2$ een TVT van 8 respectievelijk 3.8 jaar. Bij variant 3 is de TVT bij $90 \text{ W}_e/\text{m}^2$ ca 7.5 jaar.

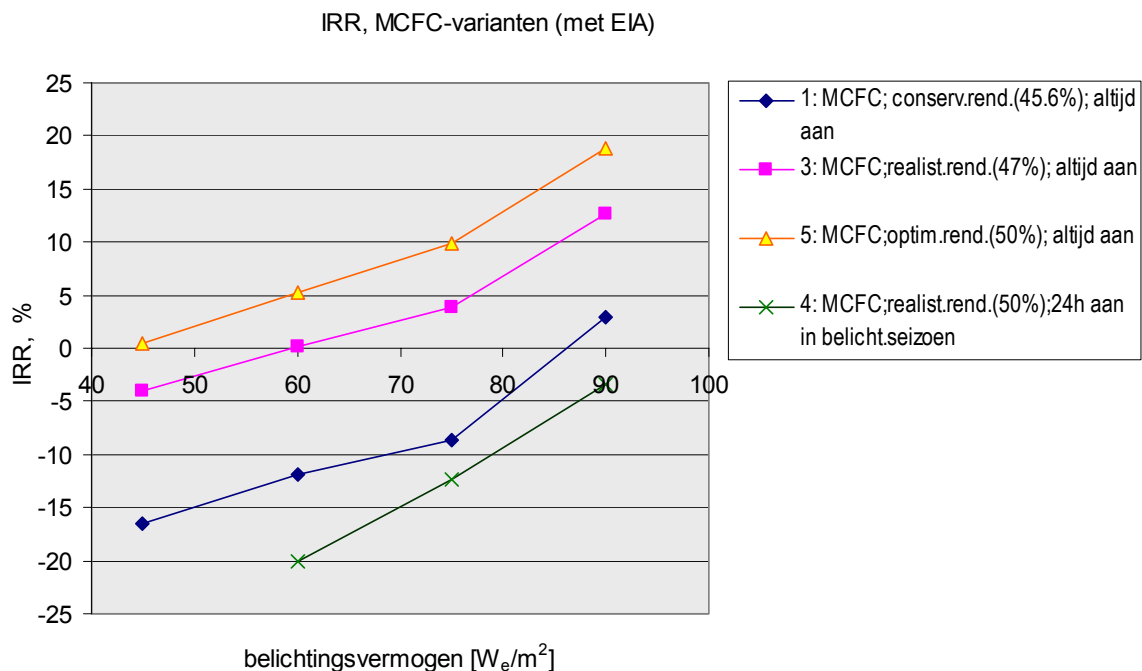
Figuur 4.14 geeft tenslotte voor de situatie met EIA de interne rendementsgraad IRR van de verschillende MCFC-varianten als functie van het belichtingsvermogen. Bij een gekozen gewenste IRR, laat de figuur duidelijk zien welke varianten/cases hieraan voldoen.



Figuur 4.12 NCW van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2006/2007, in de situatie met EIA).



Figuur 4.13 Terugverdientijd van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2006/2007, in de situatie met EIA).

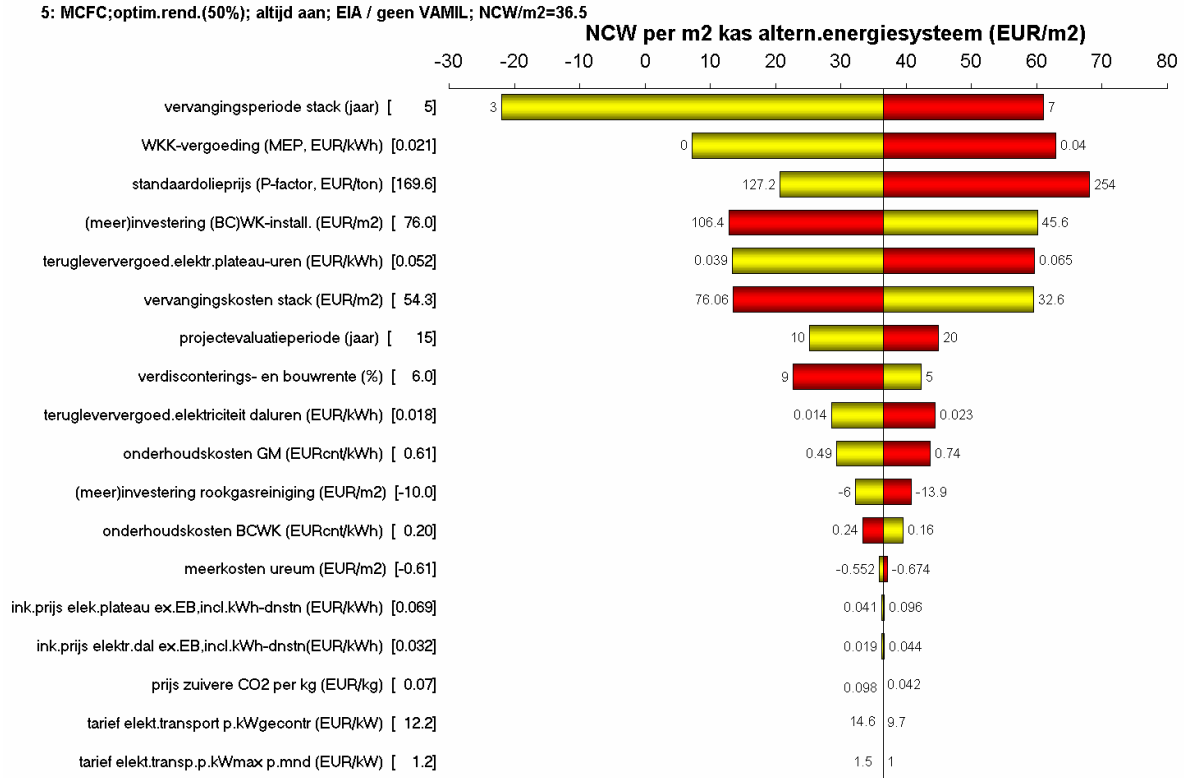


Figuur 4.14 Terugverdientijd van de MCFC-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2006/2007, in de situatie met EIA).

Figuren 4.12 tot en met 4.14 laten zien dat er bij MCFC-systemen – in tegenstelling wat misschien op basis van de eerder behandelde $45 W_e/m^2$ zou worden verwacht – toch varianten/cases zijn die financieel interessant zijn. Bij variant 5 met een elektrisch rendement van 50% is de ‘altijd-aan’ variant vanaf ca $75 W_e/m^2$ financieel interessant (IRR > 10%, NCW > 8 EUR/ m^2). Bij het MCFC-systeem met het ‘realistische rendement’ (47%) is dit voor de $90 W_e/m^2$ belichtingssituatie het geval. Om een idee van de risico’s van de investering in een MCFC-systeem te geven met een hoger vermogen, is voor variant 5 bij $90 W_e/m^2$ het tornado-diagram gegeven voor de netto-contante-waarde. Het diagram laat zien dat alleen de variatie in de vervangingsperiode van de stack (3 jaar in plaats van 5 jaar) leidt tot een negatieve NCW. Bij alle andere aangenomen variaties blijft de NCW groter dan 0. Dit betekent dat, als de leverancier een levensduur van 5 jaar zou willen garanderen, deze MCFC-variant (straks) met een beperkt risico zou kunnen worden geïmplementeerd.

SOFC-GT-varianten

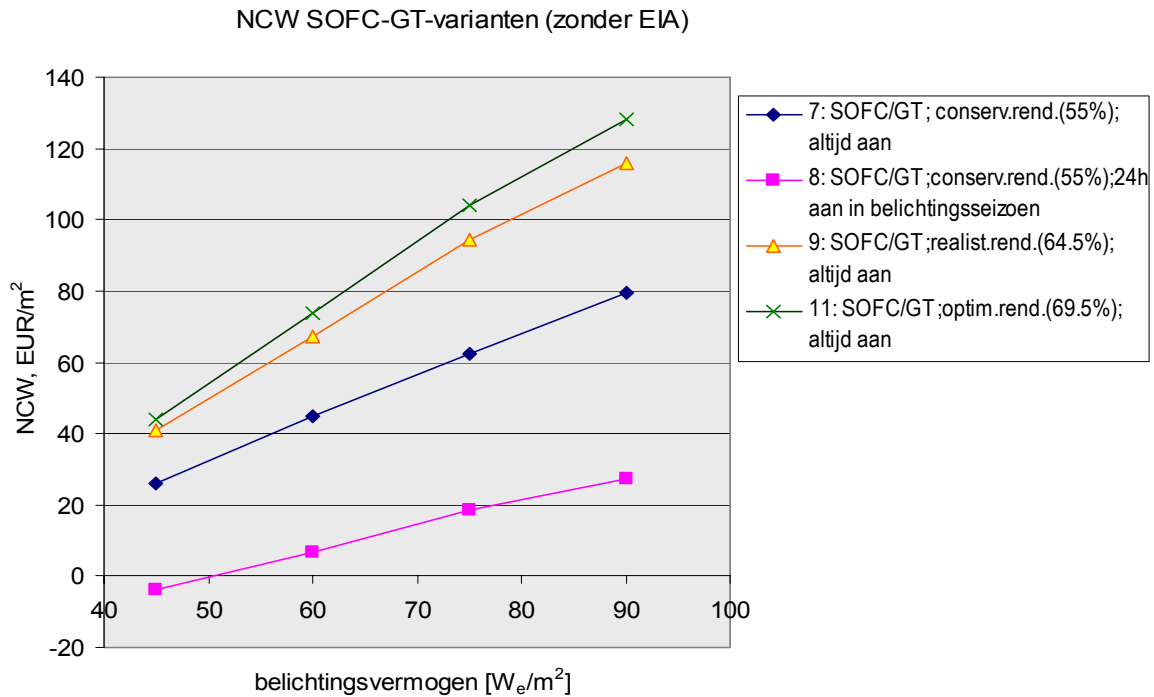
Figuur 4.16 en 4.17 geven het verloop van de netto-contante-waarde van de SOFC-GT-varianten in de situatie zonder respectievelijk met EIA. Figuur 4.18 en 4.19 tonen het verloop van de IRR en de TVT voor de situatie met EIA. Alle variant/lichtniveau-combinaties hebben een NCW groter dan 0, behalve variant 8 met een conservatief rendement, die alleen aan is in het belichtingsseizoen bij een belichtingsvermogen van $45 W_e/m^2$ (zonder EIA). In de situatie met EIA is voor dit geval de NCW ongeveer 0 geworden en voor alle andere gevallen



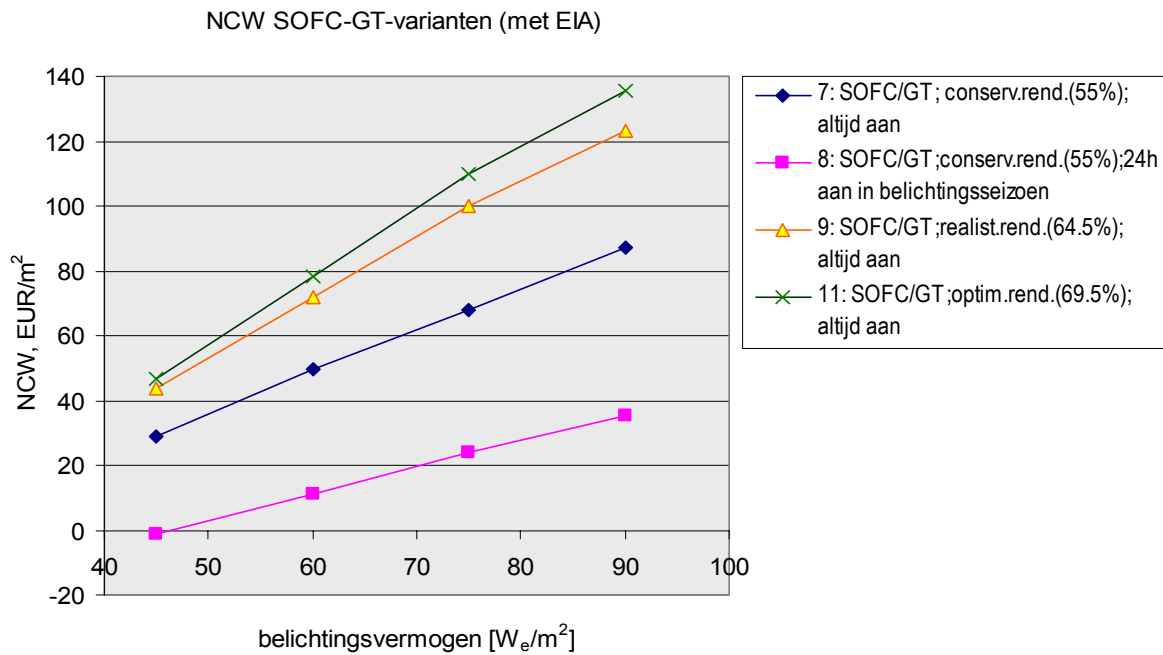
Figuur 4.15 Tornado-diagram van de 'altijd-aan' MCFC-variant 5 bij een belichtingsniveau van 90 W_e/m² (uitgaande van het investeringsniveau van 2006/2007, in de situatie met EIA).

nog iets groter dan zonder EIA. Voor de 'altijd aan' variant 9 ligt de netto-contante-waarde (over 15 jaar) tussen circa 44 en 123 EUR/m². Voor variant 11 is dit gebied zelfs 47-136 EUR/m²

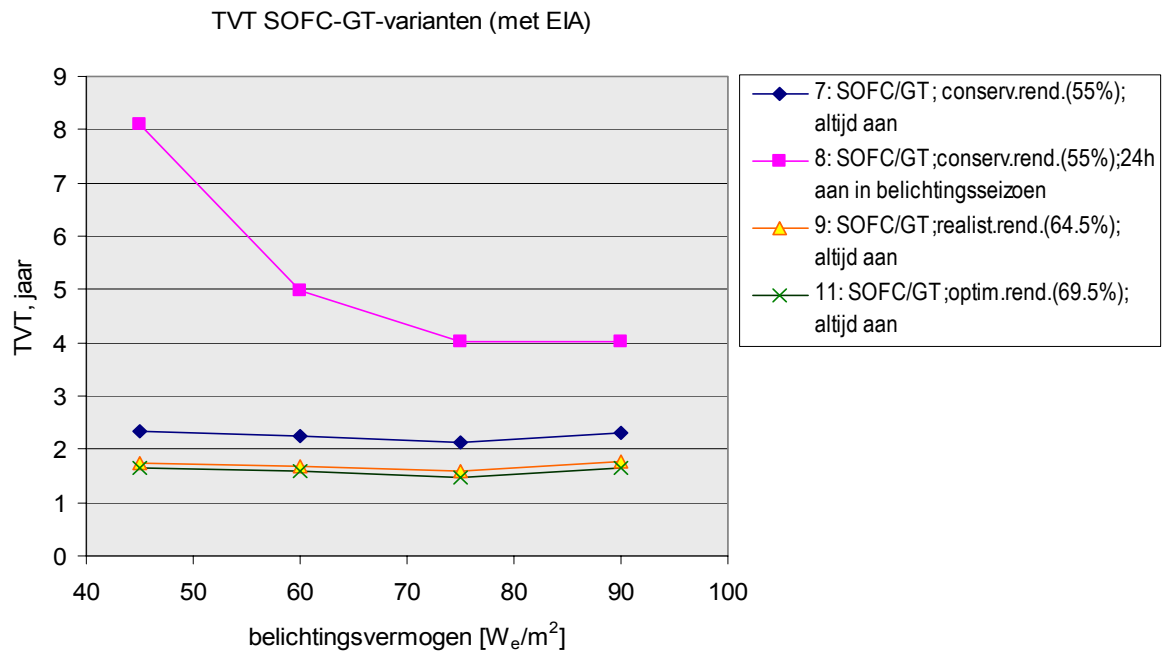
De terugverdientijd (met EIA) van variant 9 en 11 is voor alle belichtingsniveaus minder dan 2 jaar. Ook de 'altijd-aan' variant 7 met een conservatief rendement heeft een korte terugverdientijd (ongeveer 2¹/₄ jaar). Bij variant 8, die alleen in het belichtingsseizoen aan is, ligt de TVT tussen ongeveer 8 en 4 jaar. Dat de 'altijd-aan' varianten bedrijfseconomisch zeer aantrekkelijk zijn, blijkt ook duidelijk uit figuur 4.19. De IRR (in de situatie met EIA) ligt voor variant 7 tussen 73 en 88%, voor variant 9 tussen 130 en 170% en voor variant 11 zelfs tussen 153 en 212%!



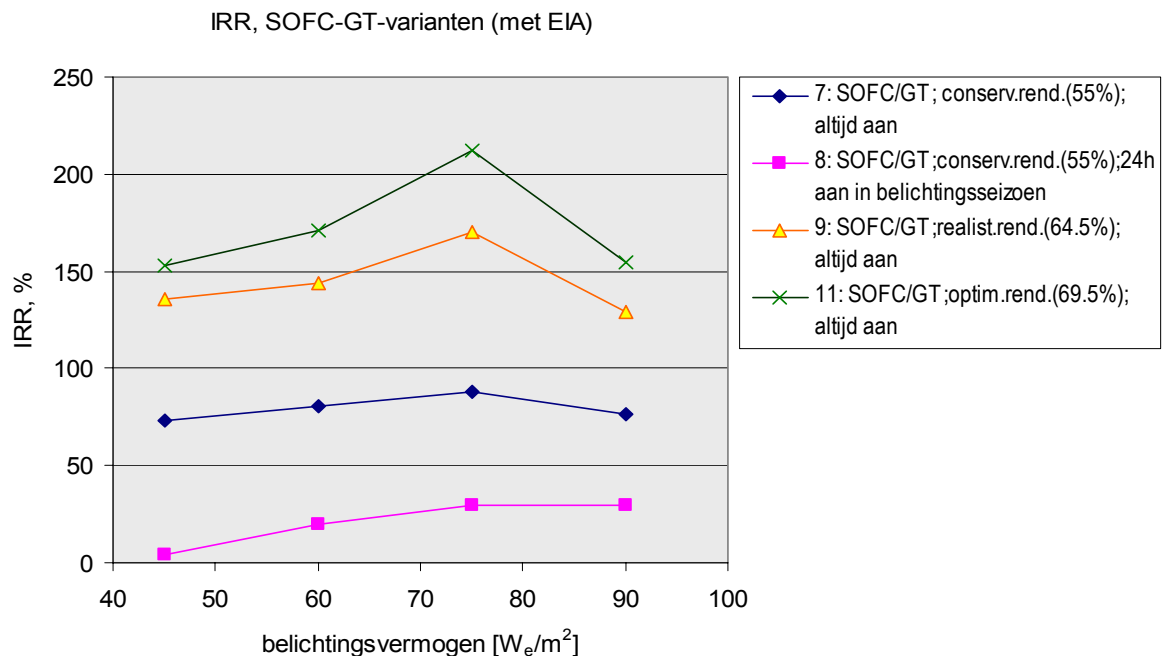
Figuur 4.16 NCW van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2010 à 2015, in de situatie zonder EIA).



Figuur 4.17 NCW van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2010 à 2015, in de situatie met EIA).



Figuur 4.18 Terugverdientijd (TVT) van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2010 à 2015, in de situatie met EIA).



Figuur 4.19 Interne rendementsgraad (IRR) van de SOFC-GT-varianten als functie van het belichtingsniveau (uitgaande van het investeringsniveau van 2010 à 2015, in de situatie met EIA).

4.6 Rentabiliteit bij ander aantal belichtingsuren

In de gevoeligheidsberekeningen van paragraaf 4.4 komt het aantal belichtingsuren niet als invloedsfactor voor. Dit komt omdat dit geen onafhankelijke grootte is in het bedrijfseconomisch model. Het aantal belichtingsuren hangt af van het buitenlichtniveau waaronder de belichting wordt ingeschakeld (zie tabel 2.1). Om toch een idee te krijgen van de gevoeligheid van de rentabiliteit voor het aantal belichtingsuren, kan in de vraagberekeningen een andere inschakelniveau worden toegepast, bijvoorbeeld 75 W/m² globale straling in plaats van 125 W/m². Het aantal belichtingsuren daalt dan van 3650 uur naar 3246 uur, dat wil zeggen een daling van 11%. Daarna dienen op basis van de nieuwe vraagprofielen nieuwe inzetberekeningen en bedrijfseconomische berekeningen te worden uitgevoerd (zie figuur 3.7). Gezien de omvang van de berekeningen (en het feit dat dit niet in de 'scope' van het project was voorzien) is dit niet voor alle cases uitgevoerd, maar voor de beeldvorming toch voor de volgende twee gevallen:

1. belichtingsniveau = 45 W/m². Variant 3 (MCFC, realistisch rendement, altijd aan, met EIA)
2. belichtingsniveau = 45 W/m². Variant 9 (SOFC-GT, realistisch rendement, altijd aan, met EIA)

De tabel hieronder geeft de terugverdientijd (TVT), netto-contante-waarde (NCW) en de interne rendementsgraad (IRR) voor het oorspronkelijke (3650 uur) en het alternatieve belichtingsregime (3246 uur):

Tabel 4.14 Rentabiliteit bij een verschillend aantal belichtingsuren per jaar.

Aantal uren belichting	TVT (jaar)		NCW (EUR/m ²)		IRR (%)		uur
	3650	3246	3650	3246	3650	3246	
1. Variant 3 (MCFC)	> 30	> 30	-12.7	-12.6	-4.04	-4.02	
2. Variant 9 (SOFC-GT)	1.73	1.76	43.9	43.3	135.9	132.2	

Uit de tabel blijkt, dat de rentabiliteitscijfers bij een 11% lager aantal belichtingsuren niet significant verschillen van die bij het 'standaard' aantal belichtingsuren. Er is geen reden te veronderstellen, dat het beeld op hoofdlijnen voor de andere varianten en belichtingsvermogens anders is en we concluderen daarmee dat de onzekerheid in het aantal belichtingsuren geen dominante risicofactor is.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

Technisch

1. Brandstofcelwarmtekrachtsystemen (BCWK's) op basis van MCFC- of SOFC-brandstofcellen kunnen worden gebruikt om kassen te voorzien van elektriciteit, warmte en CO₂, met een hoger elektrisch rendement dan gasmotor-WK's.
2. De (gekoelde) rookgassen van een BCWK kunnen direct (zonder rookgasreiniging) worden gebruikt voor CO₂-bemesting.
3. BCWK's zijn minder snel inzetbaar en nog minder goed regelbaar dan gasmotoren. Opstarten vanuit een koude toestand duurt 16 à 24 uur. Lastwisselingen van minimumlast naar vollast (of omgekeerd) duurt bij een MCFC-systeem nog meerdere uren. Bij SOFC-GT-systemen is er nog weinig ervaring met modulerende bedrijfsvoering. De verwachting is dat een overgang van minimumlast naar vollast - bij een goed geregeld systeem - minimaal 10 minuten zal duren. Om bovengenoemde redenen is het aan te bevelen de BCWK zo weinig mogelijk uit te schakelen en zoveel mogelijk op een vaste belasting te bedrijven.
4. Voor de eerste generaties MCFC-systemen, zijn 2 praktisch bruikbare inzetstrategieën geïdentificeerd:
 - 'altijd-aan'-bedrijf (24 uur per dag, gedurende het hele jaar). Een 'altijd-aan'-systeem kan het hele jaar – naast elektriciteit – CO₂-leveren voor bemesting. Eventueel overtollige warmte zal òf aan derden moeten worden geleverd of moeten worden 'weggekoeld' (desgewenst via de eigen kas)
 - '24 uur aan in belichtingsseizoen'. Bij deze inzetstrategie is de BCWK buiten het belichtingsseizoen niet in bedrijf. In die periode zal de benodigde CO₂ op andere wijze moeten worden geproduceerd (bijvoorbeeld met de ketel).

Bij de 'altijd-aan' strategie zal veel meer elektriciteit aan het net worden teruggeleverd dan bij de tweede strategie.

Technisch/commercieel

5. Technisch gezien kunnen de MCFC- en SOFC-GT-systemen worden gefabriceerd. De in de case-studies gehanteerde 'conservatieve' rendementen zijn al gerealiseerd. De 'realistische' rendementen worden binnen enkele jaren verwacht. De 'optimistische' rendementen worden op termijn haalbaar geacht (2006 à 2007 voor MCFC, 2010 à 2015 voor SOFC-GT).

6. SOFC-GT systemen zijn nog niet commercieel leverbaar. De commerciële leverbaarheid wordt verwacht vanaf ca 2010. MCFC-systemen zijn nu al leverbaar. Commercieel aantrekkelijke prijzen hiervoor op basis van serieproductie (circa 1250 EUR/kW_e) worden vanaf 2006 à 2007 verwacht.

Energetisch

7. MCFC- en SOFC-GT-gebaseerde BCWK's kunnen beiden een forse besparing op het primaire energieverbruik opleveren in vergelijking met gasmotorwarmtekrachtinstallaties. De energieprestatie van de SOFC-GT is daarbij beter dan die van de MCFC. Bij de beste MCFC-variant is een besparing tot circa 41% mogelijk. Bij de SOFC-GT kan dit oplopen tot 80%, een en andere afhankelijk van het gerealiseerde (elektrisch en thermisch) rendement, de wijze van bedrijfsvoeren en het belichtingsniveau (en uitgaande van de berekeningsmethodiek uit het Besluit glastuinbouw).
8. De 'altijd-aan' varianten scoren qua energieprestatie beduidend beter dan de corresponderende '24 uur aan in belichtingsseizoen' variant. Dit is een gevolg van de veel hogere elektriciteitssteruglevering en het feit dat de CO₂ in de laatste situatie geproduceerd wordt met de ketel, waarbij meer (overtollige) warmte wordt geproduceerd.
9. Bij een toenemend belichtingsniveau zal bij toepassing van gasmotoren het primaire energieverbruik toenemen. Dit is ook bij MCFC-BCWK's het geval. Het verbruik ligt echter lager en neemt minder snel toe met het belichtingsvermogen. De gasmotor kan in 2010 zelfs bij een (relatief) laag belichtingsniveau van 45 W_e/m² (circa 4880 lux) niet meer aan de energieverbruiksdoelstelling voor belichte rozenteelten uit het Besluit Glastuinbouw voldoen. De 'altijd-aan' BCWK-varianten kunnen dat wel. Bij de beste MCFC-variant (met 50% elektrisch rendement) is dit zelfs tot ca 80 W_e/m² (circa 8700 lux) belichting het geval.
10. Bij de SOFC-GT 'altijd-aan' varianten, blijft het primaire energieverbruik voor alle rendementsscenario's en voor alle onderzochte belichtingsvermogens (45-90 W_e/m²) ruim onder de verbruiksdoelstelling voor 2010. Bij de varianten met een elektrisch rendement van 64.5% respectievelijk 69.5% daalt het primaire energieverbruik zelfs bij een toenemend belichtingsvermogen (dit als gevolg van de verrekeningswijze van teruggeleverde elektriciteit die in deze situatie zeer efficiënt wordt opgewekt). Deze varianten zijn daarvoor naar verwachting goed 'energienorm-bestendig' ook bij verdergaande aanscherping in de toekomst.

11. Bij SOFC/GT brandstofcellen met een hoog elektrisch rendement, kan bij relatief lage belichtingsniveaus, en een daarop afgestemd elektrisch vermogen van de BCWK, niet meer altijd de gewenste hoeveelheid CO₂ worden geleverd. Bij een belichtingsniveau van 45 W_e/m² en een 'conservatieve' SOFC/GT – met een elektrisch rendement van 55% - treedt een tekort van ca 40 kg/h per ha (gedurende ca 1300 uur) op, uitgaande van een maximale gewenste dosering van 205 kg/h per ha. Bij de optimistische variant met 69.5% elektrisch rendement is het tekort maximaal ca 70 kg/h per ha gedurende circa 1700 uur. Het tekort kan desgewenst additioneel gesuppleerd worden als zuivere CO₂ of met de ketel worden geproduceerd (dit laatste kost echter extra energie).
12. Bij hogere vermogens treedt er bij de SOFC-GT-varianten geen CO₂-tekort meer op. Bij de conservatieve variant is dit vanaf 60 W_e/m² en bij de 'realistische' en 'optimistische' variant vanaf 75 W_e/m² het geval.
13. De MCFC-varianten hebben geen CO₂-tekort (met uitzondering van een verwaarloosbaar tekort bij 45 W_e/m²).
14. Bij gasmotoren en MCFC-BCWK's treedt reeds vanaf belichtingsvermogens van 45 W_e/m² een flink warmte-overschot op (circa 20 à 38 % van de netto-warmtevraag). Bij een belichtingsvermogens van 90 W_e/m² is dit opgelopen tot 126 à 146%. De overtollige warmte zou bijvoorbeeld nuttig kunnen worden aangewend om (grotendeels) in de warmtevraag van een belendend bedrijf te voorzien. Bij hogere belichtingsvermogens is er ook voldoende CO₂ beschikbaar om in de CO₂-vraag te voorzien. Als de warmte niet aan derden kan worden geleverd, dan zal ze moeten worden weggekoeld (desnoods via de eigen kas).
15. Bij de SOFC-GT-varianten is het warmteoverschot veel kleiner. Bij 45 W_e/m² belichting is er bij de 'altijd-aan' varianten geen (bij de 'optimistische' en de 'realistische' variant) of slechts een klein overschot (circa 3% bij de 'conservatieve' variant). Bij 90 W_e/m² loopt dit op tot ca 22 à 36% bij de eerste twee varianten, en circa 56% bij de derde.
16. De procentuele reductie van de CO₂-emissie die samenhangt met de BCWK-energievoorziening is gelijk aan de procentuele besparing op het primaire energieverbruik. In absolute zin ligt de CO₂-reductie voor de 'altijd-aan' MCFC-varianten tussen ca 19 en 80 kg/m² per jaar en voor SOFC-GT-varianten tussen 37 en 156 kg/m² per jaar. De CO₂-reductie neemt toe met het vermogen van de BCWK en het elektrisch rendement van het systeem.

Bedrijfseconomisch

17. De bedrijfseconomische aantrekkelijkheid van de BCWK's wordt bepaald door de besparing op de netto energiekosten, het benodigde (meer)investeringsniveau en de meer/minderkosten voor onderhoud en bedrijfsvoering (alles ten opzichte van de gasmotor-gebaseerde referentieinstallatie). De besparing op netto energiekosten heeft vooral te maken met de extra teruglevering van elektriciteit. Bij de onderhoudskosten speelt met name bij MCFC de vervangingsperiode van de 'brandstofcelstack' een dominante rol (bij MCFC-systemen is naar verwachting na 5 jaar een nieuwe stack nodig, bij SOFC-systemen is dit pas na 10 jaar het geval).
18. Het huidige investeringsniveau van MCFC-BCWK's (circa 3600 EUR/kW_e) is nog te hoog voor commerciële toepassingen. Bij SOFC-GT systemen, die qua ontwikkeling achter lopen op de MCFC, is de huidige prijs van de eerste demonstratiesystemen (circa EUR 17000/kW_e) nog veel te hoog.
19. Uitgaande van de door de leveranciers verwachte prijzen (circa 1200 EUR/kW_e in 2006/2007 voor MCFC- en 1000 USD/kW_e ≈ 850 EUR/kW_e voor SOFC-GT-systemen in 2010 à 2015), zijn wel rendabele (tot zeer rendabele) BCWK-systemen mogelijk.

MCFC

20. MCFC-systemen zijn onder voorwaarden rendabel. Zonder subsidies is - uitgaande van het genoemde investeringsniveau voor 2006/2007 - alleen de 'altijd-aan' variant met 'optimistisch rendement' bij een belichtingsvermogen van 90 W_e/m² aantrekkelijk. De terugverdientijd is ca 8 jaar, de netto-contante-waarde (NCW) over 15 jaar bedraagt ca 11 EUR/m² en de interne rendementsgraad bedraagt ca 9%.
21. Bij gebruikmaking van energie-investeringsaftrek (EIA) voor de BCWK verbetert het economisch perspectief. De 'optimistische', 'altijd-aan' variant is nu vanaf ca 75 W_e/m² financieel interessant (IRR > 10%, NCW > 8 EUR/m²). Bij het MCFC-systeem met het 'realistische rendement' (47%) is dit voor de 90 W_e/m² belichtingssituatie het geval. Bij lagere belichtingsvermogens dan 60 W_e/m² verdient geen van de MCFC-systemen zich terug.
22. De beperkte rentabiliteit van MCFC-systemen heeft met name te maken met de (relatief) korte vervangingsperiode van de brandstofcelstack van 5 jaar. Mocht de fabrikant in staat zijn dit te verbeteren naar bijvoorbeeld 7 jaar, dan wordt het economisch perspectief over de hele (belichtings)linie een stuk beter. Mocht de 5 jaar niet worden gehaald, maar al na 3 jaar (≈ 26000 uur) vervanging nodig zijn, dan zijn ook bovengenoemde rendabele situa-

ties niet langer rendabel en de overige situaties zeer onrendabel. De onzekerheid over de levensduur is op dit moment nog een groot risico voor de inzet van MCFC-systemen.

23. De MEP-vergoeding voor 'CO₂-vrije' kWh (in het kader van de CO₂-indexregeling voor warmtekracht) is essentieel voor een rendabel MCFC-systeem. Zonder de MEP-vergoeding zijn de genoemde rendabele MCFC-cases niet langer financieel aantrekkelijk.
24. De CO₂-kosteneffectiviteit²¹ van de 'altijd-aan' MCFC-varianten ligt tussen de 79 en 140 EUR/ton. In vergelijking met de gemiddelde prijzen op de Europese CO₂-markt (ca 6 à 13 EUR/ton in 2003/2004) is dit in het licht van mogelijke emissiehandel nog erg hoog.

SOFC-GT

25. Het economisch perspectief van SOFC-GT-systemen is veel beter dan van MCFC-systemen. De 'realistische' en 'optimistische' 'altijd-aan' varianten hebben - bij de aangenomen prijzen in 2010 à 2015 - een terugverdientijd van circa 2 jaar (zonder EIA). De 'conservatieve' 'altijd-aan' variant heeft een terugverdientijd van circa 2.7 jaar. De IRR bedraagt circa 50 à 60% bij de conservatieve variant, 85 à 105% bij de realistische en 100 à 125% bij de optimistische variant! De NCW ligt afhankelijk van het belichtingsniveau tussen 26 en 80 EUR/m² voor de conservatieve, tussen 40 en 115 voor de realistische en tussen 44 en 128 EUR/m² voor de optimistische 'altijd-aan' variant.
26. In het geval dat gebruik gemaakt wordt van EIA verbeteren bovengenoemde cijfers nog wat. De terugverdientijd neemt ca 0.3 à 0.4 jaar af. De NCW ligt circa 3 à 7 EUR/m² hoger. De IRR ligt voor de conservatieve 'altijd-aan' variant tussen 73 en 88%, voor de realistische variant tussen 130 en 170% en voor de optimistische variant zelfs tussen 153 en 212%!
27. De SOFC-GT BCWK's scoren zoveel beter dan de MCFC-varianten als gevolg van:
- langere stackvervangingsperiode (10 jaar in plaats van 5)
 - hoger elektrisch rendement, waardoor er minder gas nodig is voor een bepaalde elektrisch vermogen
 - (op termijn) lagere investeringskosten.
28. De MEP-vergoeding is voor de SOFC-GT-cases niet essentieel. Zonder MEP zou de TVT van de 'altijd-aan' varianten met ca 0.4 jaar stijgen en de NCW met circa 11 tot 31 EUR/m² dalen (afhankelijk van het belichtingsvermogen).

²¹ N.B. in de 'CO₂-kosteneffectiviteit' is alleen de meerinvestering betrokken en zijn niet de 'benefits' (besparing op energiekosten e.d.) verrekend (zie definitie §4.3.2). Het getal zegt derhalve niets over de 'integrale' investeringsaantrekkelijkheid.

29. De CO₂-kosteneffectiviteit van de beste (optimistische en realistische 'altijd-aan') SOFC-GT-varianten bedraagt circa 20 respectievelijk 22 EUR/ton. In het licht van de prijzen op de Europese CO₂-emissiemarkt (6 à 13 EUR/ton in 2003/2004) lijkt dit voorlopig nog aan de hoge kant²¹. Wel zou verkoop van de emissiereductie de rentabiliteit van de investering nog verder kunnen vergroten.

30. Investeren in SOFC-GT BCWK's onder het verwachtingspatroon (qua investeringen, rendementen en energieprijzen) zoals gemotiveerd en aangenomen in deze studie is (vanaf ongeveer 2010) zeer lucratief. Dit vereist wel dat de fabrikanten in staat zullen zijn door nieuwe fabricagetechnieken het geprognostiseerde prijsniveau (1000 USD/kW_e) te realiseren met behoud van de kwaliteit van de SOFC-brandstofcellen. Overigens zijn alle 'altijd-aan' SOFC-GT-varianten ook bij een 50% hoger investeringsniveau nog rendabel, en de meeste zelfs ook nog bij een 100% hoger niveau.

Resumerend geeft tabel 5.1 geeft een overzicht van de kenmerken en rentabiliteit van een aantal relevante brandstofcel-WK-cases.

Tabel 5.1 Overzicht van de rentabiliteit van de 'belangrijkste' brandstofcel-WK/regelstrategie/belichtingsniveau-combinaties

Nr	systeem	nom. elektrisch rendement	nom. thermisch rendement	regelstrategie	Belichtingsniveau W _e /m ²	investeringsjaar	Rentabiliteit ¹⁾		
							TVT jaar	NCW EUR/m ²	IRR %
1a	MCFC-conservatief	45.6%	35.5%	continu aan ²⁾	45	2004	-	-117.3	-22.6%
1b	MCFC-conservatief	45.6%	35.5%	continu aan	45	2006	-	-27.2	-16.45
3a	MCFC- realistisch	47%	43%	continu aan	45	2006	-	-12.66	-4.0%
3b	MCFC- realistisch	47%	43%	continu aan	90	2006	7.5	19.14	12.6%
5a	MCFC-optimistisch	50%	41%	continu aan	45	2007	14.8	-7.0	0.4%
5b	MCFC-optimistisch	50%	41%	continu aan	60	2007	8.9	-1.34	5.3%
5c	MCFC-optimistisch	50%	41%	continu aan	90	2007	3.8	36.5	18.9%
7a	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	continu aan	45	2003	-	-567	-21.5%
7b	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	continu aan	45	2012 ³⁾	2.4	29.0	73%
7c	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	continu aan	90	2012	2.3	87.4	76%
8a	SOFC-GT-conservatief	55%	26.6%	alleen in belichtingsseizoen aan	45	2012	8.1	-1.0	4.1%
9a	SOFC-GT-realistisch	64.5%	25.5%	continu aan	45	2012	1.7	43.9	136%
9b	SOFC-GT-realistisch	64.5%	25.5%	continu aan	90	2012	1.8	123.4	129%
11b	SOFC-GT-optimistisch	69.5%	22.5%	continu aan	45	2014	1.6	46.8	153%
11b	SOFC-GT-optimistisch	69.5%	22.5%	continu aan	90	2014	1.6	135.7	155%

¹⁾ Bij de rentabiliteitsbepaling is uitgegaan van maximale energie-investeringsaftrek (EIA) en een stackvervangingsperiode van 5 jaar voor de MCFC en 10 jaar voor het SOFC-GT systeem

²⁾ gedurende 24 uur per dag het hele jaar door (de '24 h in belichtingsseizoen aan' varianten zijn hier niet getabelleerd, m.u.v. 8a, omdat ze energetisch en bedrijfseconomisch veel slechter scoren)

³⁾ bedoeld is periode 2010 à 2015, e.e.a. afhankelijk van snelheid van ontwikkelingen

31. Een hogere olieprijs is gunstig voor de rentabiliteit van de BCWK. Een 50% hogere 'P-factor' dan de aangenomen middenwaarde van 170 EUR/ton (resultierend in 50% hogere commodity-gasprijs: 18.7 EURct/m³ in plaats van de 'middenwaarde' van 12.3 EURct/m³) zou de terugverdientijd van bijvoorbeeld variant 3b verkorten van 7.5 tot 3.6 jaar en van variant 3a van meer dan 30 naar 13.3 jaar. Een 25% lagere P-factor zou bij variant 3b de terugverdientijd verlengen tot 8.3 jaar. Hierbij is verondersteld dat bij stijgende olie- en daaraan gerelateerde gasprijzen, de elektriciteitsproducenten de hogere brandstofkosten in hun (commodity) kWh-prijzen zullen verdisconteren (voor zowel te verkopen als in te kopen elektriciteit).

5.2 Aanbevelingen

1. Overtollige warmte, die bij de verschillende BCWK-varianten in meer of mindere mate optreedt, zou nuttig op een belendend bedrijf kunnen worden aangewend, waardoor de energetische benutting van het verbruikte gas en de energie-efficiency van het leverende bedrijf verder toeneemt. Daarnaast kan dit met name bij MCFC-BCWK's de rentabiliteit significant verder vergroten. Dit effect is in de onderhavige studie nog niet meegenomen. Het verdient aanbeveling het effect van dergelijke clustering op energieprestatie en rentabiliteit nader in kaart te brengen.
2. Bij een voorgenomen aankoop van een MCFC-systeem zou de koper garanties kunnen bedingen voor de levensduur van de stack. Indien dit zou lukken voor 5 jaar (of meer), dan zou het risico van een investering in deze techniek flink afnemen.
3. De te verwachten brandstofflexibiliteit van brandstofcellen maakt in principe 'multi-fuel' bedrijf mogelijk. Met deze mogelijkheid zou flexibel ingespeeld kunnen worden op actuele brandstofprijzen en specifieke kenmerken van tariefsystemen (bijvoorbeeld limiteren van gascontractcapaciteit in verband met hoge kosten voor weinig gebruikte piekcapaciteit). Dit aspect is in de onderhavige studie nog niet meegenomen. Wellicht biedt dit mogelijkheden om de rentabiliteit van met name MCFC-systemen verder te verbeteren. Het verdient aanbeveling deze problematiek en de mogelijke oplossingsrichtingen in een vervolg nader uit te werken.
4. Het verdient aanbeveling om binnen 2 à 3 jaar in samenwerking met een tuinder op een (gedeeltelijk) belicht glastuinbouwbedrijf een demonstratiesysteem met één of meerdere MCFC-modules te realiseren om voor de sector (bouw- en bedrijfs)ervaring op te doen en het energetisch potentieel en de bruikbaarheid van het brandstofcelsysteem in de praktijk te bewijzen.

LITERATUUR

- [1] LTO Nederland, "Ondernemerschap in beeld. Sociaal en milieujaarverslag glastuinbouw 2002"
- [2] Gerwen, R.J.F. van "Brandstofcellen in de glastuinbouw: status en mogelijkheden", KE-MA, rapportnummer 50361503-KPS/SEN 03-3008, 2004.
- [3] Swinkels, G.L.A.M., H.F. de Zwart, "Standaard teelten", IMAG, 2000.
- [4] Cogen Projects, "CO₂-bemesting met rookgassen van W/K-motoren", september 2003.
- [5] "Gas Verkoop Systeem 2004", www.gasunie.nl
- [6] Berekening gasprijs CDS-systeem, www.tuinbouw.nl/energiebureau
- [7] Veyo, S.E. et al., "Status of pressurized SOFC/gasturbine power system development at Siemens Westinghouse", Proceedings of the ASME TURBO EXPO 2002, 3-6 june 2002, Amsterdam, Nederland.
- [8] DACE (Dutch Association of Cost Engineers), "Onvoorzien in relatie tot de risicobepaling bij investeringsbegrotingen", G-1-011, rev. 0, april 1984.
- [9] PPO, "Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw", 2001-2002.
- [10] Correspondentie met Jenbacher, 2001.
- [11] CoGen Projects, "CO₂-bemesting met rookgassen van W/K-gasmotoren", nov. 1999.
- [12] Hannover, 2003, Excellence in Fuel Cells, conferentie Hannover Fair 2003, 10-11 april 2003.
- [13] J. Schouten, "Resultaat roos zakt tot historisch dieptepunt", Vakblad voor de Bloemisterij 40 (2002).
- [14] Dittrich G., Prof.dr.Ing., Steffen Mall, Marcus Abele, "Die Brennstoffzelle. Stand der Technik auf Basis der Brennstoffzellenart und der Einsatzgebiete". Studienarbeit in Fach, 2001.

BIJLAGE A EIGENSCHAPPEN KAS

De *energievraag* in een kas hangt af van de bouwfysische kenmerken van de kas, het gewenste binnenklimaat, de teelt en de optredende buitencondities. Ter bepaling van het benodigde energieverbruik is het nodig hierover bepaalde aannamen te maken.

Wat betreft kasomhulling wordt in deze studie uitgegaan van een enkel-glas kasdek (maar met dubbelglasgevels). De kas is voorzien van (een beweegbaar) energiescherm en assimilatiebelichting. De belangrijkste constructietechnische en bouwfysische kenmerken zijn samengevat in tabel A.1.

Tabel A.5.2 Kenmerken (referentie)kas

Kas	Specificatie	Opmerkingen / aannamen
Oppervlak	2 ha	
Type	Venlo	
Gemiddelde hoogte	4 m	
Kap	enkel glas dakhoek 23°	warmtedoorgangscoefficiënt $U=6.82 \text{ W/m}^2\text{K}$ bij windsnelheid 0 m/s
Gevel	geïsoleerd	warmtedoorgangscoefficiënt $U=3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
Scherm	energiescherm (transparant, vocht-doorlatend)	circa 42 % energiebesparing indien gesloten.
Verhouding oppervlak ventilatieramen/kasoppervlak	0.234	

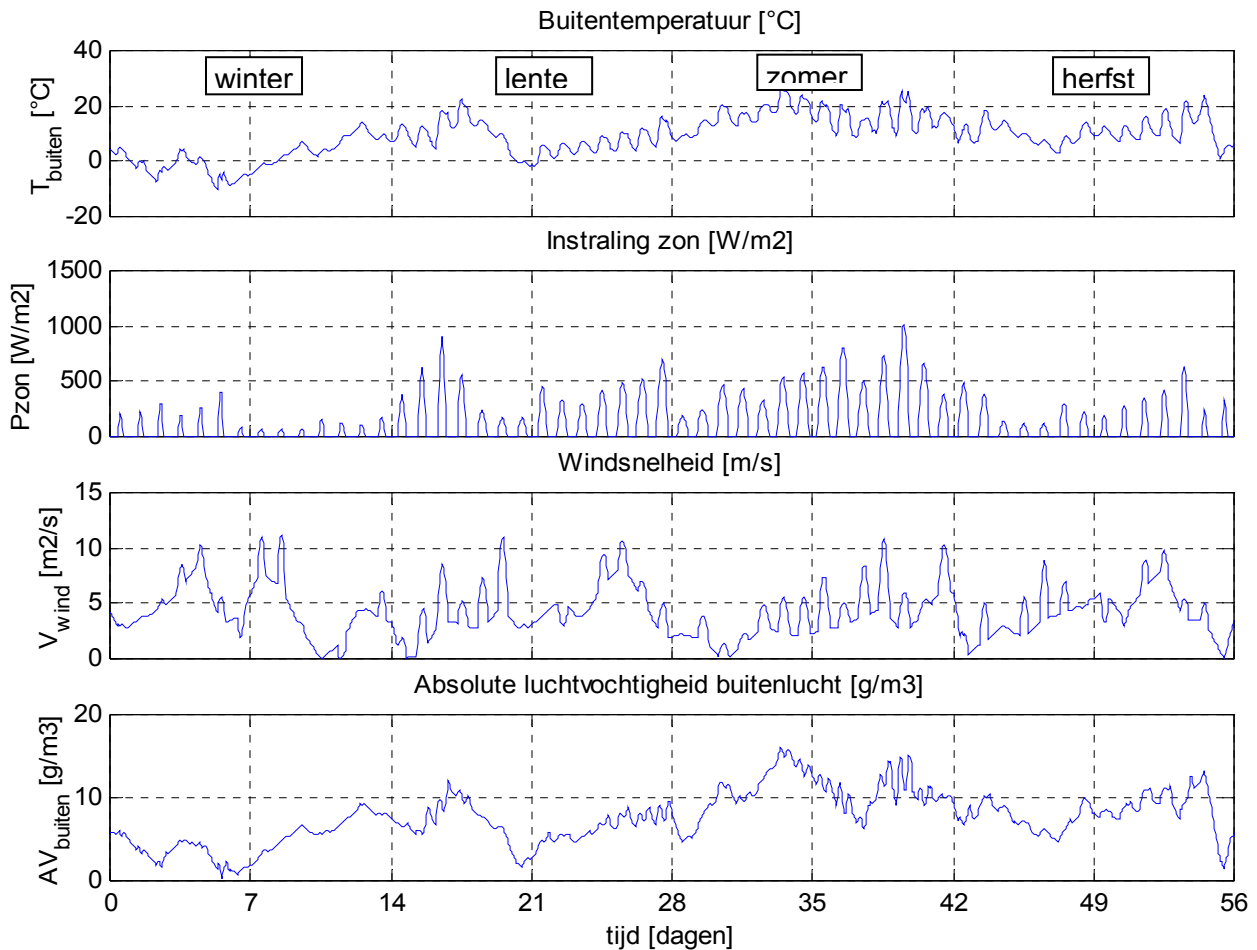
Bijlage B

BIJLAGE B KLIMAATREFERENTIEJAAR

Voor jaarrond-energievraagberekeningen aan gebouwen dient voor de buitencondities (weerdata) een zogenaamd “referentiejaar” te worden genomen dat in voldoende mate zowel dag-/nachtvariaties laat zien, als ook kenmerkende lange-termijn variaties over een jaar. Uiteraard zijn exacte voorspellingen van het weer in een bepaald jaar onmogelijk. In het algemeen zal een representatieve schatting van de energievraag kunnen worden verkregen door uit te gaan van historische weerdata van een meerdere opeenvolgende jaren (bijvoorbeeld 10). Dit betekent echter een zeer groot gegevensbestand en een dito aantal berekeningen. Teneinde het rekenwerk te beperken zijn zogenaamde referentiejaren ontwikkeld (o.a. door de Technische Universiteit Eindhoven en door de Technisch Fysische Dienst TNO-TPD). Deze referentiejaren hebben de lengte van één jaar en zijn opgebouwd uit aangeschakelde reeksen uurlijkse waarnemingen van het werkelijke klimaat gedurende maanden van verschillende jaren. Deze delen zijn uit de 10 jaren waarvan de waarnemingen beschikbaar zijn zo gekozen, dat de berekende warmte- en koudebehoefte over deze periode van 10 jaar gemiddeld en over dat gekozen samengestelde jaar zo goed mogelijk met elkaar overeenstemmen. Om de berekeningen verder te versnellen is door de TU Delft het zogenaamd “Verkort referentiejaar” ontwikkeld, dat werkt met representatieve dagen voor de verschillende seizoenen. Het is gebaseerd op een statistische analyse van de werkelijke uurlijkse klimaatgegevens van het KNMI, over een periode van 10 jaar (1961-1970), voor De Bilt. Het resulterende klimaatmodel bestaat uit een beknopt bestand van klimaatgegevens waarin de karakteristieke eigenschappen van het klimaat gehandhaafd zijn, voor zover deze van belang zijn bij de bepaling van het energieverbruik in gebouwen, en bij het berekenen van de gemiddelde opbrengst van zonneboilersystemen. In het “Verkort referentiejaar voor buitencondities” (dat als NEN-norm is aanvaard door de normcommissie 35174 “Klimaatbeheersing in gebouwen [1]) zijn de gegevens van een heel jaar geconcentreerd in 4 seizoenen van 14 dagen.

In dit voorbeeld zal gebruik gemaakt worden van het “Verkort referentiejaar” (volgens NEN 5060). Doordat maar 56 dagen hoeven te worden doorgerekend, kan de simulatie veel sneller worden uitgevoerd (bij een tijdstap van 15 minuten hoeven nu “slechts” 5376 situaties te worden doorgerekend versus 35 040 bij een heel jaar of 350 400 bij 10 opeenvolgende jaren). De cumulatieve verbruiken berekend over het Verkort referentiejaar (VRJ) worden teruggerekend naar een vol jaar.

Figuur B.1 toont het verloop van buitentemperatuur, zonne-instraling, windsnelheid en absolute luchtvochtigheid van het “Verkort referentiejaar”.



Figuur B.1 Verloop van buitencondities verkort referentiejaar

De Bilt kan als representatief voor het geografisch gemiddelde van Nederland worden beschouwd. Voor specifieke geografische locaties verdient het aanbeveling de data-set van het Verkort referentiejaar te corrigeren. Desgewenst kunnen ook andere datasets worden gehanteerd mits deze maar voldoende representatief zijn (bijvoorbeeld "SEL-referentiejaar", [2]).

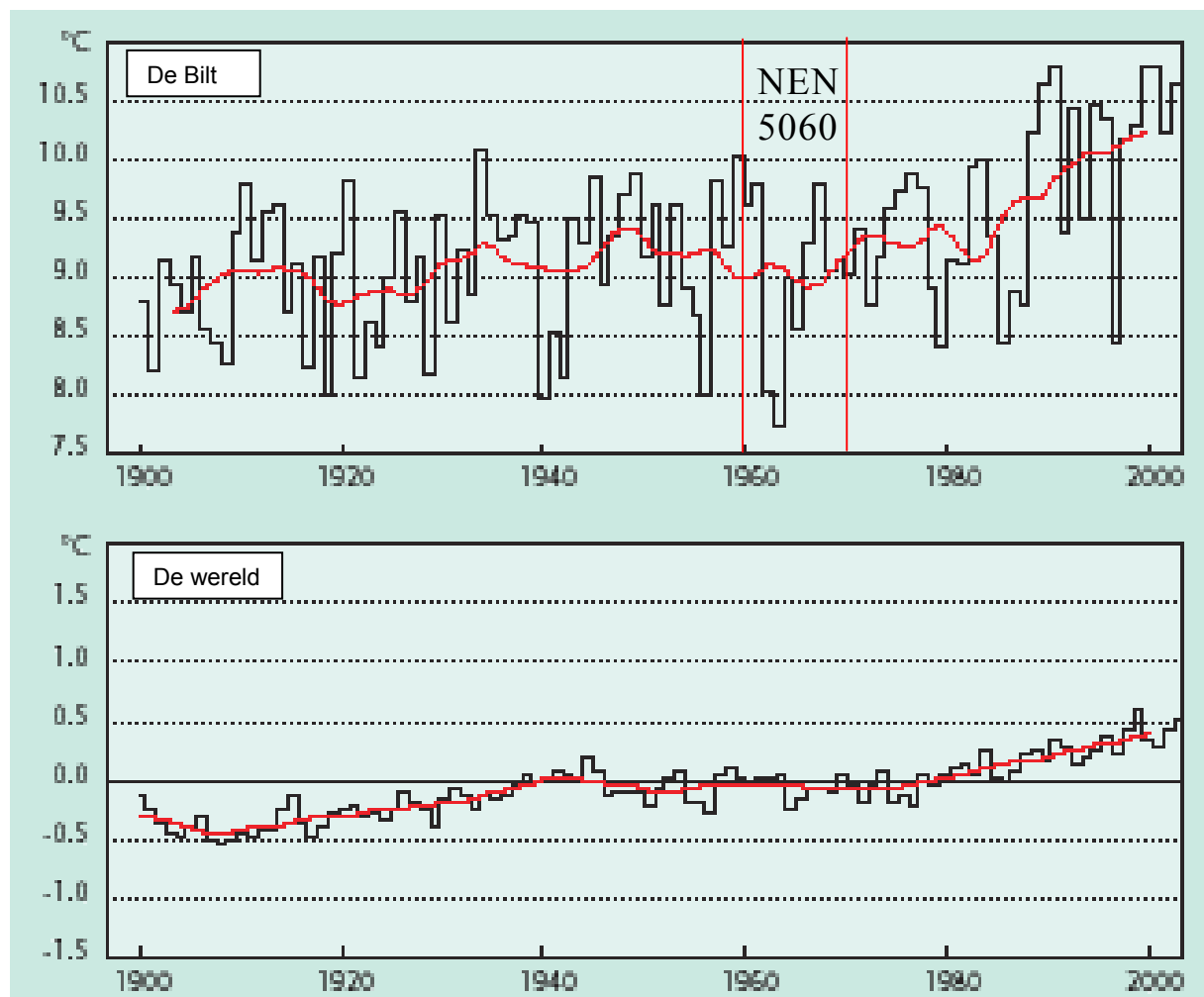
Het verkort referentiejaar is gebaseerd op gegevens van 1961-1970. Eind 2001 heeft het KNMI bekend gemaakt, dat de jaren negentig van de vorige eeuw in Nederland 0.8 graden warmer waren dan de voorgaande periode van 30 jaar. Ook werd aangegeven dat er een verband bestaat tussen de wereldwijde temperatuurstijging en de recente warme periode in Nederland (zie figuur B.2). Het KNMI verwacht ook dat de eerste 10 jaar van de 21-ste eeuw duidelijk warmer worden dan het gemiddelde over 1961-1990, maar ongeveer net zo warm als de zeer warme jaren negentig. Met deze jongste inzichten in de klimaatontwikkeling is in deze studie nog geen rekening gehouden.

Bijlage B

De absolute warmtebehoefte van een kas die op basis van het VRJ is berekend, zal derhalve in vergelijking met de warmtebehoefte die zou behoren bij het gemiddelde klimaat van de negentiger jaren, wat hoger zijn. Echter, omdat het in deze studie gaat om verschillen in energieverbruik tussen een alternatief en een referentie-energiesystemen, waarbij voor beiden van hetzelfde buitenklimaat wordt uitgegaan, is dit geen probleem. In het verschil van de verbruiken valt het effect van een gemiddeld iets lagere buitentemperatuur grotendeels weg.

Literatuur Bijlage B

- [1] NEN 5060: "Verkort referentiejaar voor buitencondities", 1987.
 [2] Breuer, J.J.G., N.J. van de Braak, "Reference year for dutch greenhouses", Acta Horticulturae 248, 1989.



Figuur B.2 Boven zwarte lijn: jaargemiddelde temperatuur in De Bilt van 1900 tot 2002. De rode lijn in deze grafiek geeft het 10-jarig voortschrijdend gemiddelde van deze temperatuur. In de onderste grafiek staat de jaargemiddelde (zwart) en 10-jaar-gemiddelde (rood) 'wereldtemperatuur' uitgezet (relatief ten opzichte van het gemiddelde van de periode 1977-1980 (bron KNMI).

BIJLAGE C **BEDRIJFSVOERING MET BELAST↔HOT-STAND-BY-OVERGANGEN**

De huidige generatie Hot Module MCFC-systemen hebben een lage op- en afregelsnelheid (van hot-stand-by naar vollast en vice versa in ca 1 à 2 dagen). In de toekomst verwacht de fabrikant (MTU) dat dit sneller kan (enkele uren). Hierdoor wordt het mogelijk om min of meer modulerend bedrijf te voeren.

In de situatie van modulerend bedrijf met de BCWK (met 'hot-stand-by-mogelijkheid', waarbij netto geen elektriciteit meer wordt geproduceerd) wordt, indien geen elektriciteit meer nodig is voor belichting, de BCWK naar de hot-stand-by toestand teruggeregeld en tijdig, voordat de belichting weer aangaat, de BCWK weer opgeregeld naar het gevraagde vermogen. Tijdens het op- en afregelen, als de lampen nog (of al) uitstaan, kan het door de BCWK opgewekte elektrisch vermogen aan het net worden teruggeleverd (indien hiervoor de benodigde netaansluiting aanwezig is) of eventueel via een weerstandsbank worden gedissipeerd en omgezet in warmte. Vanwege de hoge kosten van de benodigde aansluitcapaciteit en de verwachte lage vergoeding van de teruglevering in het op- en afregeltraject, wordt er hier vanuit gegaan, dat het elektrisch (opregel)vermogen in een weerstandsbank wordt omgezet in warmte. De warmte zal voor kasverwarming worden gebruikt.

Bij het 'vollast↔minimumlastbedrijf', wordt de BCWK bij uitschakeling van de belichting tot een minimum-last niveau teruggeregeld, maar blijft de installatie in bedrijf en netto elektriciteit leveren. Het overschot aan elektriciteit, zal worden teruggeleverd aan het net. De netaansluiting zal dus minimaal het minimum elektrisch vermogen van de BCWK moeten kunnen doorlaten. Vooralsnog lijkt deze bedrijfsvoeringsmodus met acceptabele op- en afregeltijden alleen mogelijk bij SOFC-GT systemen (verwachting ca 10 à 15 minuten; maar dit moet nog worden aangetoond).

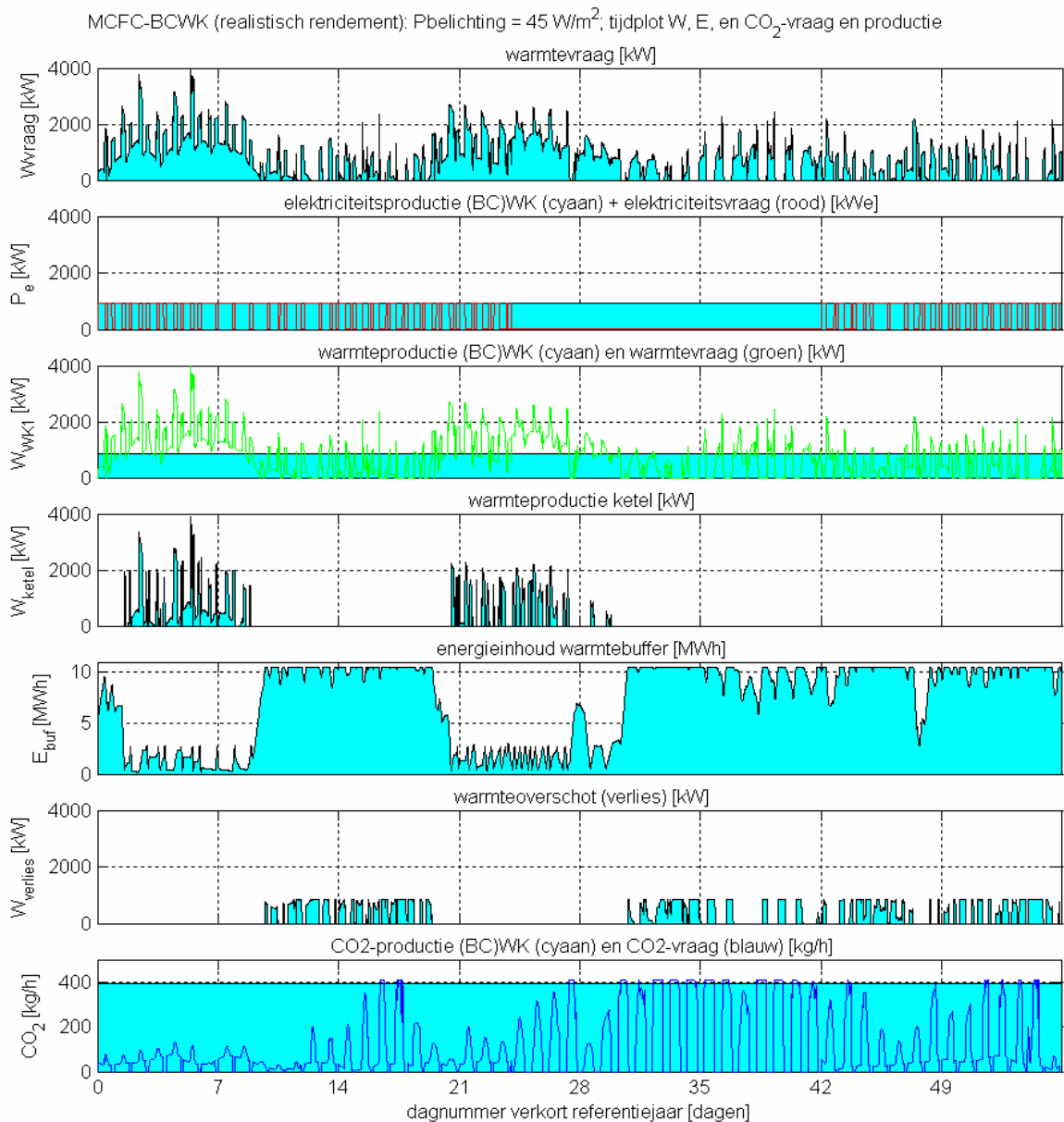
Tabel C.1 Overzicht van huidige en mogelijke toekomstige regelstrategieën van MCFC en SOFC-GT brandstofcel-WK

Systeem \ Strategie→	regelstrategie 2004	regelstrategie 2010 e.v.	Opmerking
MCFC	1. vaste belasting (continu aan gedurende langere periode)	1. vaste belasting 2. modulerend bedrijf hot-stand-by ↔ full load	voor modulerend bedrijf moet opregelsnelheid worden verbeterd.
SOFC	1. vaste belasting 2. min.last↔vollast	1. vaste belasting 2. min.last↔vollast 3. modulerend bedrijf o.b.v. hot-stand-by ↔ full load	voor hot-stand-by bedrijf zullen 'purge' mogelijkheden met schutgassen moeten worden gerealiseerd.

Bijlage D

BIJLAGE D DETAILS INZETBEREKENINGEN

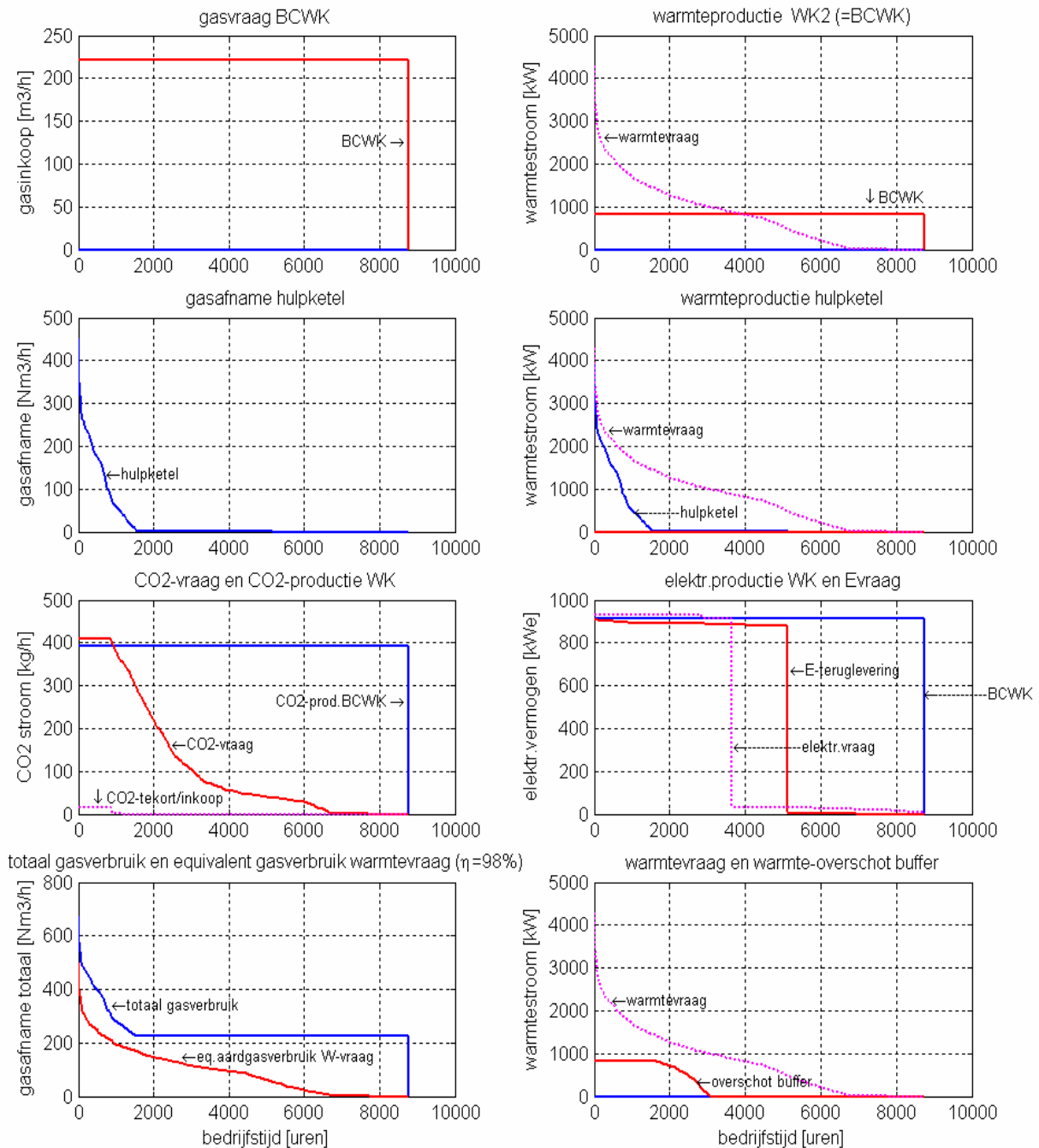
Ter illustratie van de rekenmethodiek worden hieronder de tijdsplots van de belangrijkste resultaten van de simulatie van een MCFC-BCWK (realistisch rendement) voor een belichte rozenteelt met elektrisch vermogen van 45 W/m^2 gegeven.



Figuur D.1 Tijdsplots MCFC BCWK (realistisch scenario) voor rozenteelt (belichting 45 W/m^2); Inzetstrategie: BCWK hele jaar aan.

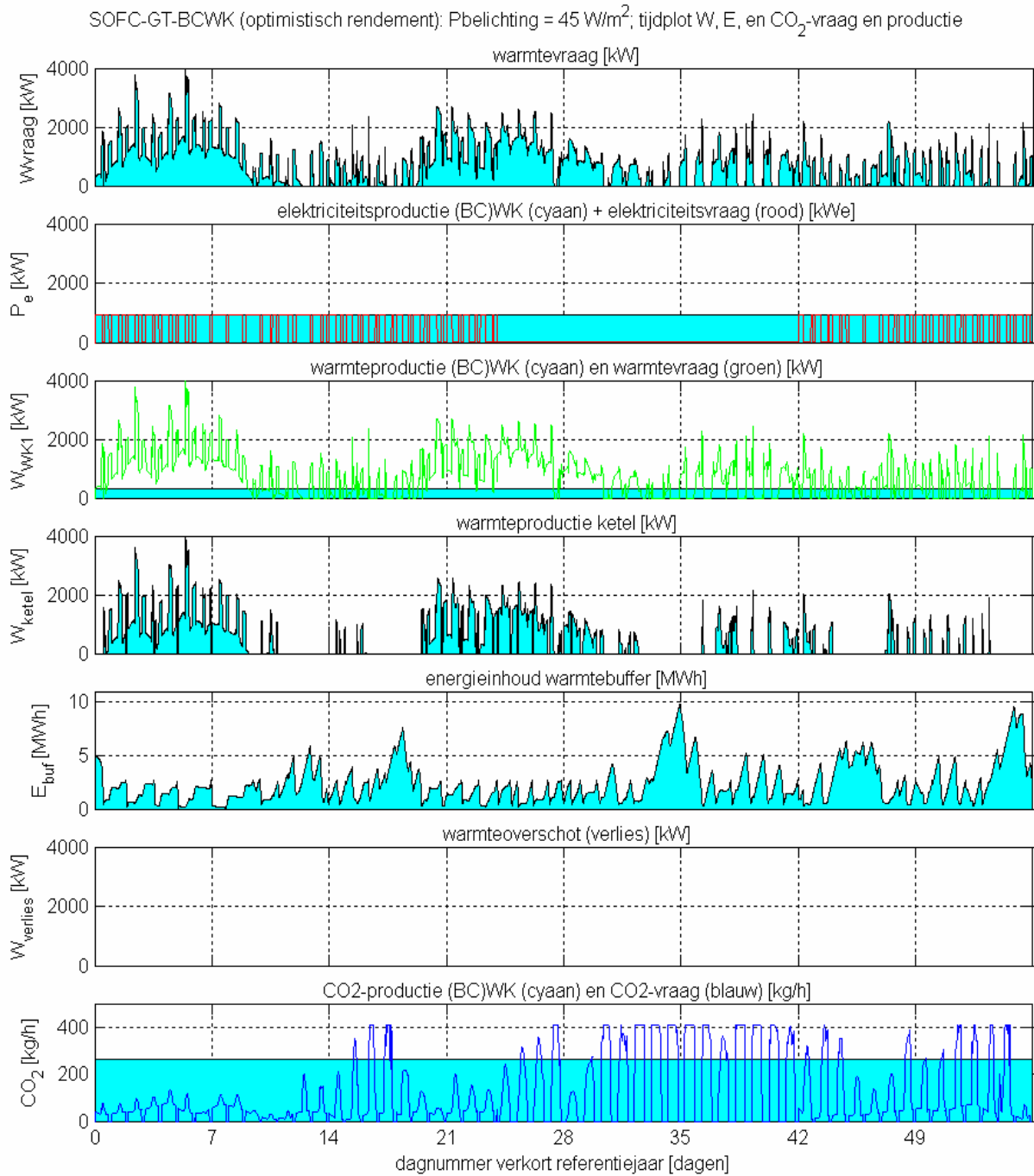
Jaarbelastingduurkrommen MCFC-variant (realistisch rendement) voor rozenteelt met 45 W/m² belichting (2 ha)

JBDK's BCWK: MCFC+ketel+buffer, CO2 met BCWK; BCWK continu aan; realistisch BCWK-rendement (el. 47%)

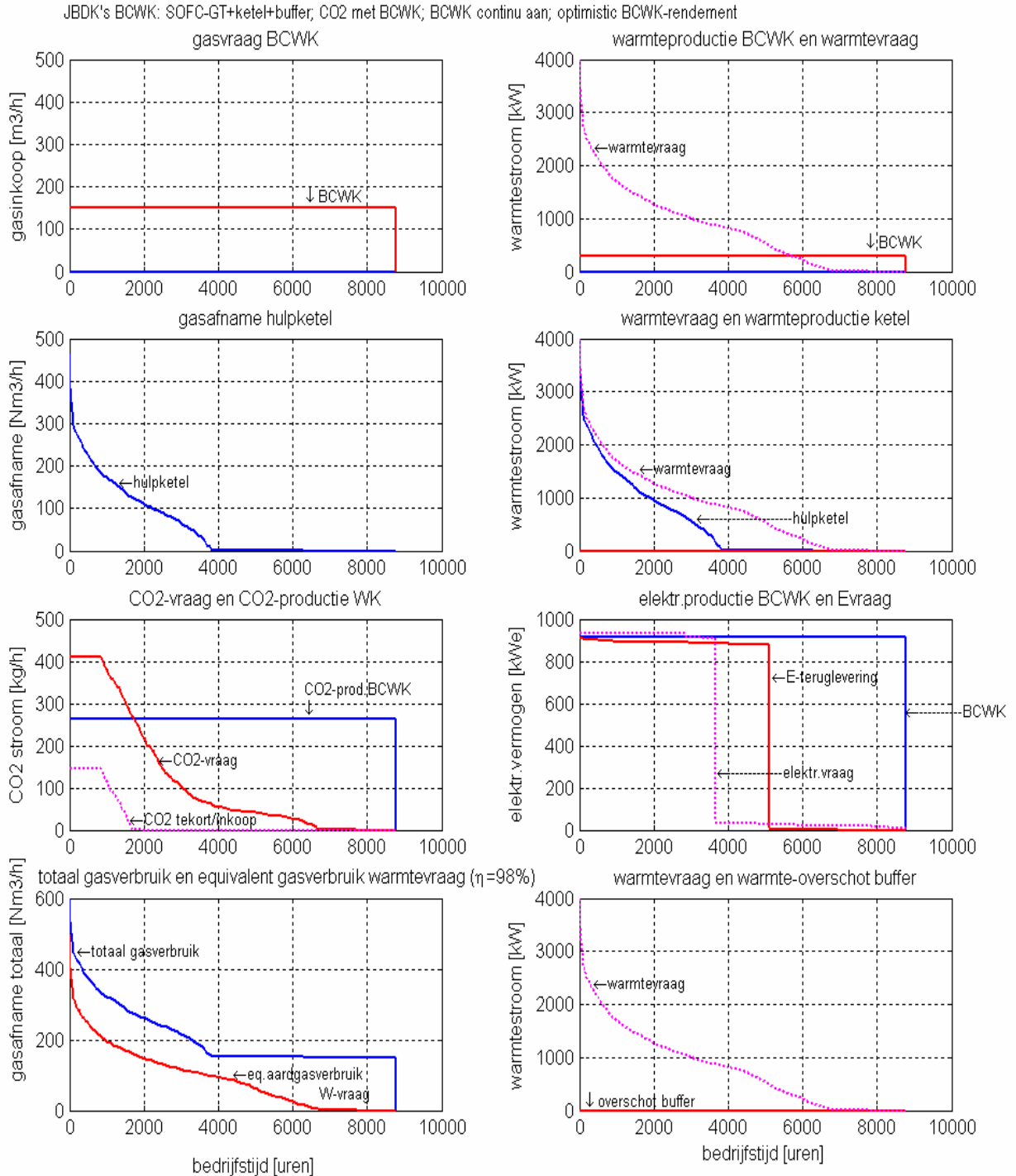


Figuur D.5.1 Jaarbelastingduurkrommen MCFC-variant (realistisch rendement) voor rozenteelt met 45 W/m² belichting (2 ha)

Bijlage D

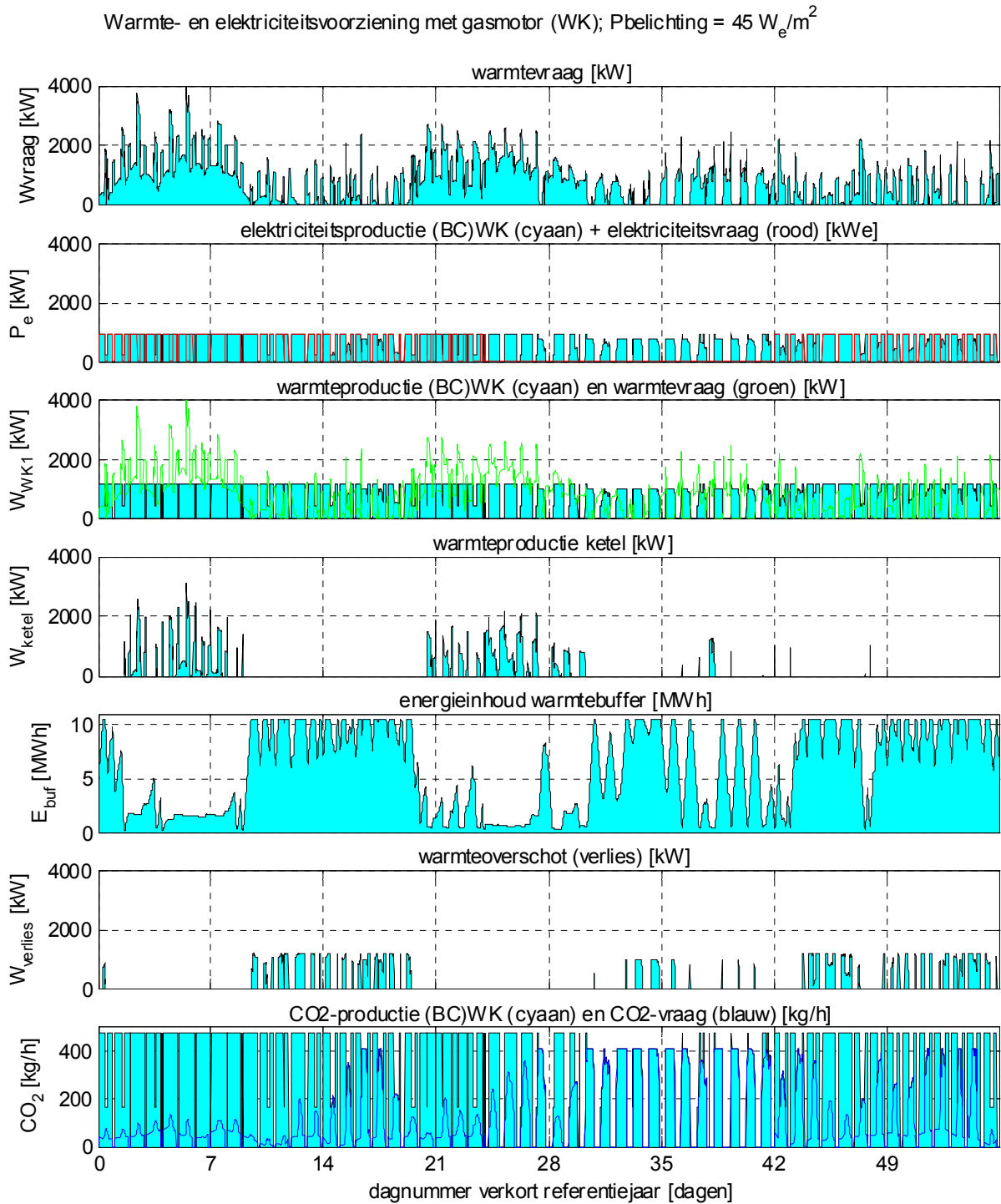


Figuur D.3 Tijdplots SOFC-GT BCWK (optimistisch scenario) voor rozenteelt (belichting 45 W/m^2). Inzetstrategie: BCWK hele jaar aan.



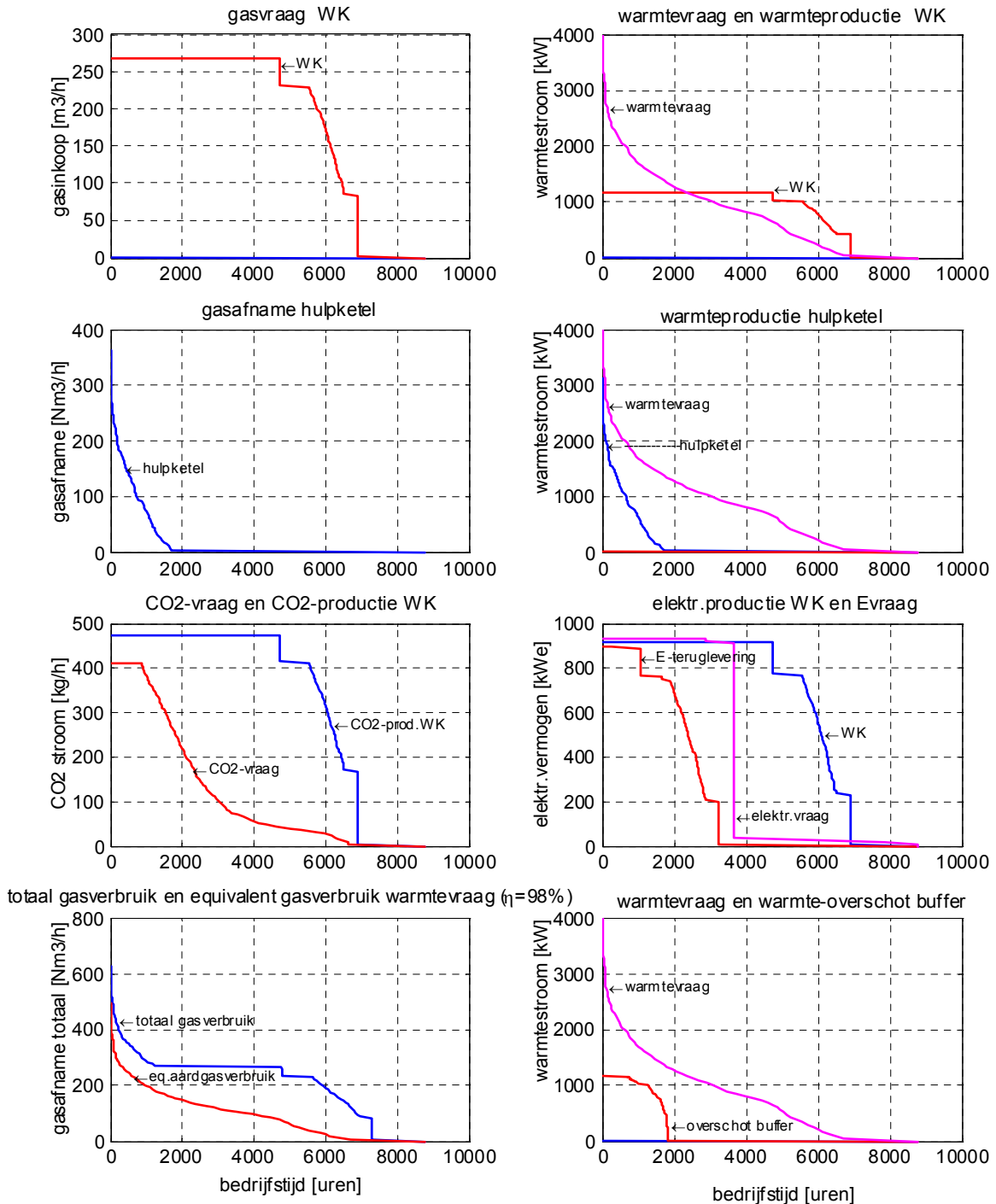
Figuur D.4 Jaarbelastingduurkrommen SOFC-GT-variant (optimistisch rendement) voor rozenteelt met belichting (45 W/m², 2 ha)

Bijlage D



Figuur D.5 Tijdplots referentiesysteem (gasmotor, realistisch scenario) voor rozenteelt (belichting $45 \text{ W}/\text{m}^2$). Inzetstrategie: WK aan als er een elektriciteitsvraag is en/of een CO₂-vraag of als er alleen een warmtevraag is én er is geen warmtevoorraad in de buffer

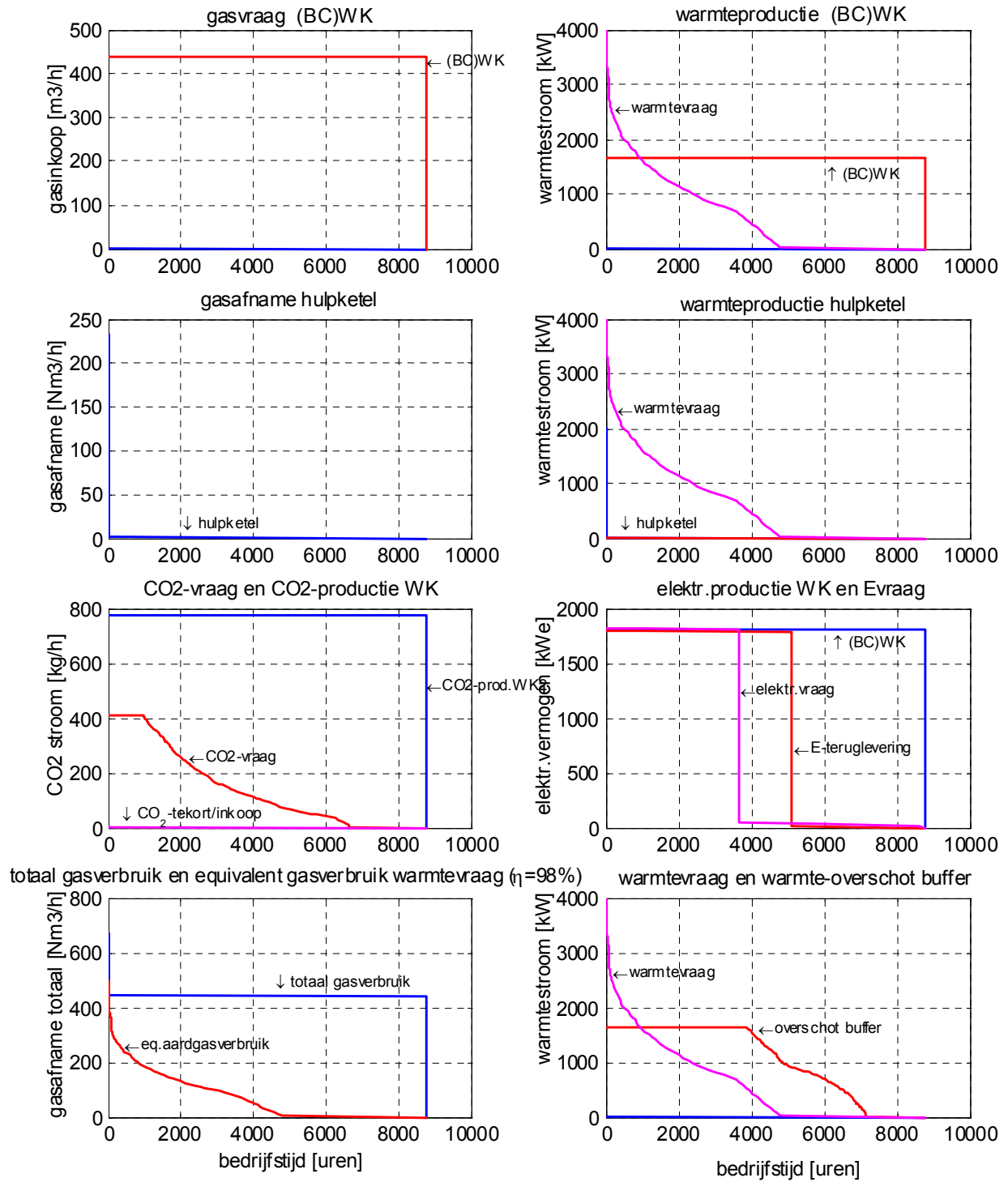
Gasmotor, normale regeling. CO2 met WK (ook inzet van WK op warmtevraag); Pbelichten = $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$



Figuur D.6 Jaarbelastingduurkrommen referentiesysteem (gasmotor, realistisch rendement) voor rozenteelt met belichting ($45 \text{ W}/\text{m}^2$, oppervlak 2 ha) (N.B. inzet WK op warmtevraag, mits buffer leeg is, buiten belichtingsseizoenen alleen tijdens plateau-uren.)

Bijlage D

JBDK's BCWK: MCFC+ketel+buffer; BCWK altijd aan; realistisch BCWK-rendement (el. 47%)
 CO2 met BCWK; Pe.belichting=90 W/m²



Figuur D.7 Jaarbelastingduurkrommen MCFC-BCWK systeem (realistisch rendement) voor rozenteelt met belichting (90 W/m², oppervlak 2 ha)

BIJLAGE E RESULTATEN ENERGIEBEREKENINGEN BIJ VERSCHILLENDE BELICHTINGSNIVEAUS

In deze bijlage worden meer gedetailleerde resultaten gegeven van de jaarrondenergieberekeningen voor belichtingsniveaus van 60, 75 en 90 W_e/m² (corresponderend met belichtingsniveaus van circa 6500, 8130 en 9760 lux) dan al in hoofdstuk 3 zijn genoemd.

Belichtingsniveau 60 W_e/m² (6500 lux)

Tabel E.1 Jaarrondenergiecijfers van MCFC-varianten bij een belichtingsniveau van 60 W_e/m²

Jaarrondcijfers belichte rozenteelt met MCFC-WK Energiesysteem: ↓ type → referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel Belichtingsniveau: 60 W/m ² BCWK in als →	Referentie 0	1	3	5	4	
	gasmotor realist.rend.	MCFC-WK conserv.rend	MCFC-WK realist.rend	MCFC-WK optim..rend	MCFC-WK realist.rend	per m ² per jaar
CO ₂ -dosering door	WK	BCWK	BCWK	BCWK	BCWK/ketel	eenheid
Jaargasverbruik	101.7	138.3	132.3	126.0	109.7	m ³
Reductie gasverbruik		-36.7	-30.6	-24.4	-8.1	m ³
<i>Procentuele besparing op gasverbruik</i>		-36.1%	-30.2%	-24.0%	-7.9%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.2	0.6	0.6	0.6	2.0	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	2.3	0.9	0.9	0.9	2.5	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	3.6	1.5	1.5	1.5	4.5	kWh
<i>Procentuele besparing op totaal E-inkoop</i>		58.6%	58.6%	58.6%	-25.2%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	68.4	164.1	164.1	164.1	88.4	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	30.7	140.1	140.1	140.1	56.1	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	99.1	304.2	304.2	304.2	144.5	kWh
<i>Procentuele toename totaal E-verkoop</i>		207%	207%	207%	46%	
Piekgasafname	0.0320	0.0375	0.0365	0.0359	0.0332	m ³ /h
<i>Procentuele reductie piekafname</i>		-17.2%	-13.9%	-12.2%	-3.6%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	3 177	3 689	3 630	3 510	3 310	uur
totaal aantal draaiuren ketel	776	699	420	624	2 359	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 717	8 670	8 760	8 760	6 078	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		0.0	0.0	0.0	0.0	kg
Overschot warmte (buffer vol)	0.577	0.553	0.749	0.612	0.732	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	77.2	60.9	54.8	48.5	73.9	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		16.4	22.4	28.7	3.3	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	2.716	2.140	1.929	1.707	2.599	GJ/m ²
<i>Procentuele reductie primair energieverbruik</i>		21.2%	29.0%	37.1%	4.3%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.137	0.108	0.097	0.086	0.131	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.029	0.040	0.051	0.006	ton
<i>Procentuele reductie CO₂-emissie</i>		21.2%	29.0%	37.1%	4.3%	

**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde

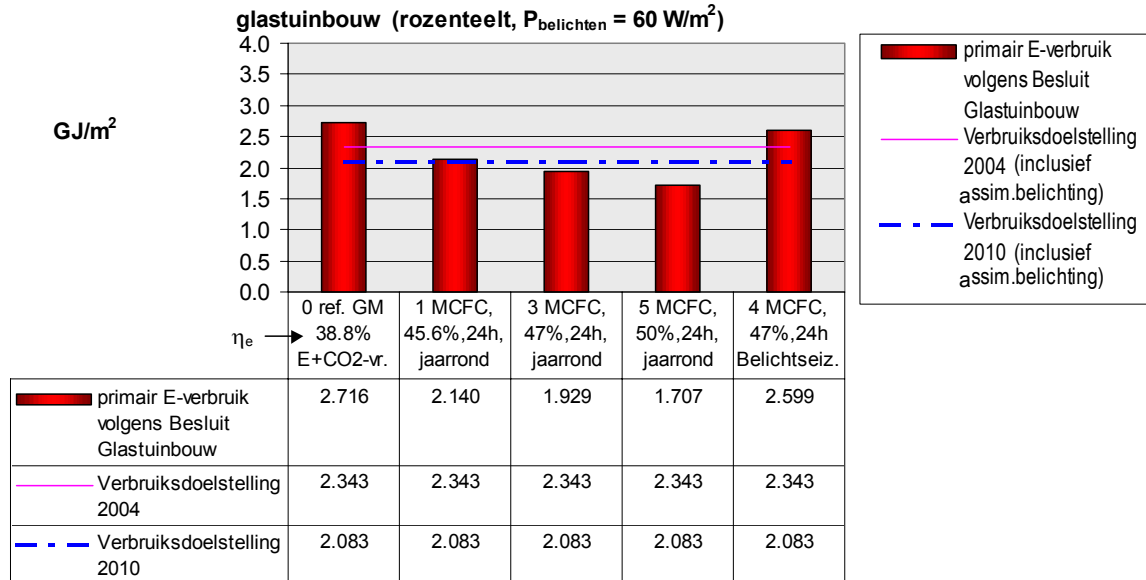
Bijlage E

Tabel E.2 Jaarrondenergicijfers van SOFC-GT-varianten bij een belichtingsniveau van 60 W_e/m²

Jaarrondcijfers belichte roze teelt met SOFC-GT WK Energiesysteem: ↓ type → referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel Belichtingsniveau: 60 W/m ² BCWK in als → CO ₂ -dosering door	Referentie 1	7	8	9	11	
	gasmotor realis.rend.	SOFC-GT conserv.rend.	SOFC-GT conserv.rend.	SOFC-GT realist.rend.	SOFC-GT optim.rend.	per m ² per jaar
	altijd	altijd in belicht.seizoen	altijd	altijd		
	WK	BCWK	BCWK/ketel	BCWK	BCWK	eenheid
Jaargasverbruik	101.7	121.8	102.8	108.1	103.9	m ³
Reductie gasverbruik		-20.1	-1.2	-6.4	-2.3	m ³
<i>Procentuele besparing op gasverbruik</i>		-19.8%	-1.1%	-6.3%	-2.2%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.2	0.6	2.0	0.6	0.6	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	2.3	0.9	2.5	0.9	0.9	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	3.6	1.5	4.5	1.5	1.5	kWh
<i>Procentuele besparing op totaal elektricit.verbruik</i>		58.6%	-25.2%	58.6%	58.6%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	68.4	164.1	88.4	164.1	164.1	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	30.7	140.1	56.1	140.1	140.1	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	99.1	304.2	144.5	304.2	304.2	kWh
<i>Procentuele toename verkoop electriciteit</i>		207%	45.9%	207%	207%	
Piek in gasafname	0.0320	0.0357	0.0341	0.0339	0.0332	m ³ /h
<i>Procentuele reductie piekafname</i>		-11.6%	-6.4%	-5.9%	-3.6%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	3 177	3 412	3 019	3 189	3 135	uur
Totaal aantal draaiuren gasketel	776	1 695	3 285	2 149	2 592	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 717	8 760	6 078	8 760	8 760	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		0.0	0.0	1.5	2.9	kg
Overschot warmte (buffer vol)	0.577	0.184	0.354	0.097	0.042	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	77.2	44.3	67.0	30.6	26.5	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		32.9	10.2	46.6	50.8	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	2.716	1.559	2.356	1.078	0.931	GJ/m ²
<i>Procentuele reductie primair energieverbruik</i>		42.6%	13.3%	60.3%	65.7%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.137	0.078	0.119	0.054	0.047	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.058	0.018	0.082	0.090	ton
<i>Procentuele reductie CO₂-emissie</i>		42.6%	13.3%	60.3%	65.7%	

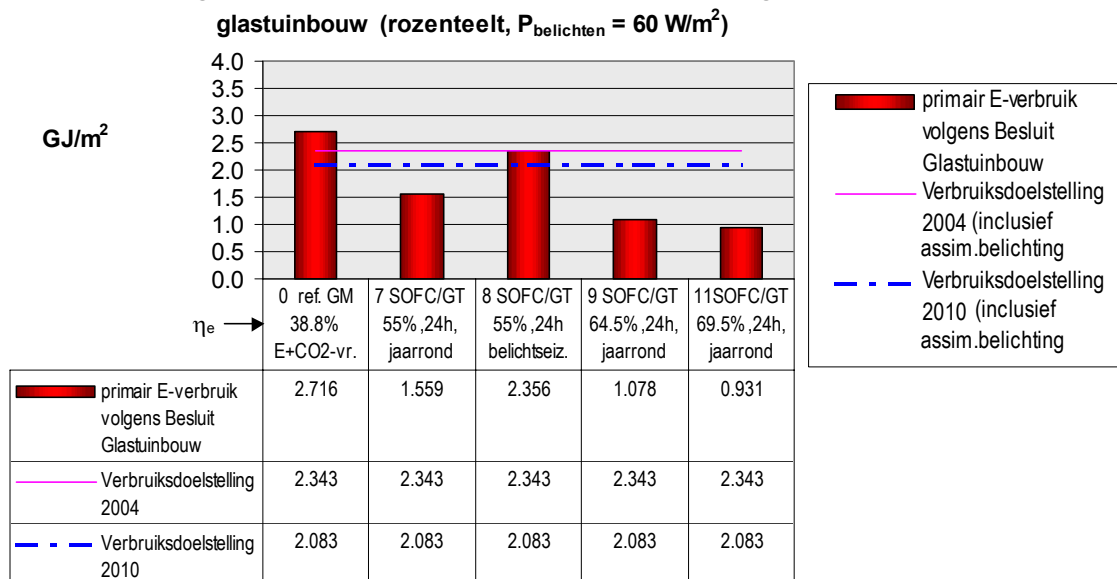
**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde

Primair energieverbruik MCFC-BCWK alternatieven vs doelstellingen Besluit



Figuur E.1 Vergelijking primaire-energieverbruikscijfers van MCFC-BCWK-varianten bij een belichtingsniveau van $60 \text{ W}_e/\text{m}^2$

Primair-energieverbruik SOFC-GT alternatieven vs doelstellingen Besluit



Figuur E.2 Vergelijking primaire-energieverbruikscijfers van SOFC-GT-BCWK-varianten bij een belichtingsniveau van $60 \text{ W}_e/\text{m}^2$

Bijlage E

Belichtingsniveau 75 W_e/m² (8130 lux)Tabel E.3 Jaarrondenergicijfers van MCFC-varianten bij een belichtingsniveau van 75 W_e/m²

Jaarrondcijfers belichte rozenteelt met MCFC-WK Energiesysteem: ↓ type → referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel Belichtingsniveau: 75 W/m ² CO ₂ -dosering door	Referentie 0	1	3	5	4	
	gasmotor realist.rend.	MCFC-WK conserv.rend	MCFC-WK realist.rend	MCFC-WK optim..rend	MCFC-WK realist.rend	per m ² per jaar
		altijd	altijd	altijd	altijd in belichtseizoen	
	WK	BCWK	BCWK	BCWK	BCWK/ketel	eenheid
Jaargasverbruik	115.9	166.9	161.0	152.0	129.1	m ³
Reductie gasverbruik		-51.1	-45.2	-36.1	-13.3	m ³
Procentuele besparing op gasverbruik		-44.1%	-39.0%	-31.2%	-11.4%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.1	0.4	0.4	0.4	1.9	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	2.1	0.7	0.7	0.7	2.3	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	3.3	1.1	1.1	1.1	4.1	kWh
Procentuele besparing op totaal E-inkoop		66.0%	66.0%	66.0%	-26.4%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	64.1	205.5	205.5	205.5	110.7	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	29.2	175.4	175.4	175.4	70.3	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	93.4	380.9	380.9	380.9	181.0	kWh
Procentuele toename totaal E-verkoop		308%	308%	308%	94%	
Piekgasafname	0.0323	0.0391	0.0358	0.0351	0.0317	m ³ /h
Procentuele reductie piekafname		-20.9%	-10.8%	-8.7%	2.0%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	3 588	4 275	4 498	4 331	4 080	uur
totaal aantal draaiuren ketel	544	163	80	140	1 882	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 656	8 670	8 760	8 760	6 078	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		0.0	0.0	0.0	0.0	kg
Overschot warmte (buffer vol)	0.872	0.876	1.173	0.964	1.036	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	92.8	69.7	63.9	54.8	83.9	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		23.1	29.0	38.0	8.9	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	3.265	2.453	2.246	1.928	2.950	GJ/m ²
Procentuele reductie primair energieverbruik		24.9%	31.2%	40.9%	9.6%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.164	0.123	0.113	0.097	0.148	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.041	0.051	0.067	0.016	ton
Procentuele reductie CO ₂ -emissie		24.9%	31.2%	40.9%	9.6%	

**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde

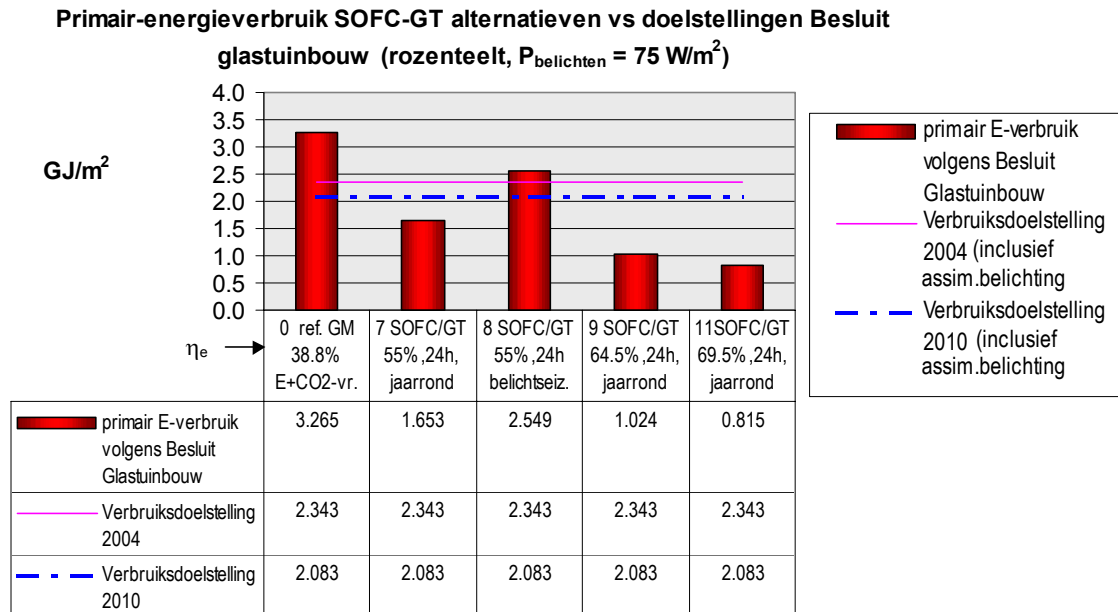
Tabel E.4 Jaarrondenergiefcijfers van SOFC-GT-varianten bij een belichtingsniveau van 75 W_e/m²

Jaarrondcijfers belichte roze teelt met SOFC-GT WK	Referentie 1	7	8	9	11	
	gasmotor realis.rend.	SOFC-GT conserv.rend	SOFC-GT conserv.rend	SOFC-GT realist.rend	SOFC-GT optim.rend	per m ² per jaar
Energiesysteem: ↓ type → referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel						
Belichtingsniveau: 75 W/m ² BCWK in als →		altijd	altijd in belicht.seizoen	altijd	altijd	
CO ₂ -dosering door	WK	BCWK	BCWK/ketel	BCWK	BCWK	eenheid
Jaargasverbruik	115.9	144.2	117.7	126.3	120.4	m ³
Reductie gasverbruik		-28.3	-1.9	-10.4	-4.5	m ³
Procentuele besparing op gasverbruik		-24.4%	-1.6%	-9.0%	-3.9%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.1	0.4	1.9	0.4	0.4	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	2.1	0.7	2.3	0.7	0.7	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	3.3	1.1	4.1	1.1	1.1	kWh
Procentuele besparing op totaal elektricit.verbruik		66.0%	-26.4%	66.0%	66.0%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	64.1	205.5	110.7	205.5	205.5	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	29.2	175.4	70.3	175.4	175.4	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	93.4	380.9	181.0	380.9	380.9	kWh
Procentuele toename verkoop electriciteit		308%	93.9%	308%	308%	
Piek in gasafname	0.0323	0.0384	0.0363	0.0365	0.0356	m ³ /h
Procentuele reductie piekafname		-18.7%	-12.2%	-12.8%	-10.2%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	3 588	3 760	3 248	3 465	3 383	uur
Totaal aantal draaiuren gasketel	544	853	2 579	1 248	1 680	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 656	8 760	6 078	8 760	8 760	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		0.0	0.0	0.0	0.0	kg
Overschot warmte (buffer vol)	0.872	0.346	0.471	0.210	0.120	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	92.8	47.0	72.5	29.1	23.2	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		45.8	20.3	63.7	69.6	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	3.265	1.653	2.549	1.024	0.815	GJ/m ²
Procentuele reductie primair energieverbruik		49.4%	21.9%	68.6%	75.0%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.164	0.083	0.128	0.052	0.041	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.081	0.036	0.113	0.123	ton
Procentuele reductie CO ₂ -emissie		49.4%	21.9%	68.6%	75.0%	

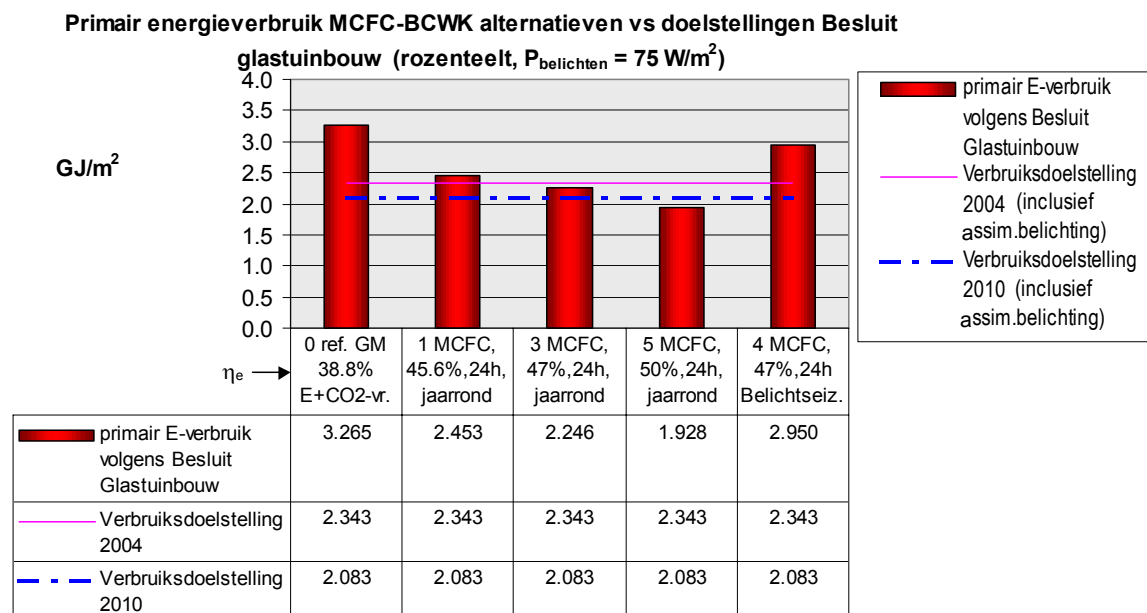
**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde

Figuur E.1 Vergelijking primaire-energieverbruikscijfers van MCFC-BCWK-varianten bij een belichtingsniveau van 60 W_e/m²

Bijlage E



Figuur E.3 Vergelijking primaire-energieverbruikscijfers van MCFC-BCWK-varianten bij een belichtingsniveau van $75 \text{ W}_e/\text{m}^2$



Figuur E.4 Vergelijking primaire-energieverbruikscijfers van SOFC-GT BCWK varianten bij een belichtingsniveau van $75 \text{ W}_e/\text{m}^2$

Belichtingsniveau 90 W_e/m² (9760 lux)

Tabel E.5 Jaarrondenergicijfers van MCFC-varianten bij een belichtingsniveau van 90 W_e/m²

Jaarrondcijfers belichte rozenteelt met MCFC-WK	Referentie 0	1	3	5	4	
	gasmotor realist.rend.	MCFC-WK conserv.rend	MCFC-WK realist.rend	MCFC-WK optim..rend	MCFC-WK realist.rend	per m ² per jaar
Energiesysteem: ↓ type → referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel						
Belichtingsniveau: 90 W/m ²		altijd	altijd	altijd	altijd in belichtseizoen	
CO ₂ -dosering door	WK	BCWK	BCWK	BCWK	BCWK/ketel	eenheid
Jaargasverbruik	132.1	198.5	192.2	180.8	150.8	m ³
Reductie gasverbruik		-66.4	-60.1	-48.7	-18.7	m ³
<i>Procentuele besparing op gasverbruik</i>		-50.3%	-45.5%	-36.9%	-14.2%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.0	0.4	0.4	0.4	1.8	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	1.9	0.5	0.5	0.5	2.1	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	3.0	0.9	0.9	0.9	3.9	kWh
<i>Procentuele besparing op totaal E-inkoop</i>		71.5%	71.5%	71.5%	-28.8%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	63.5	246.9	246.9	246.9	133.0	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	29.3	210.7	210.7	210.7	84.4	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	92.8	457.5	457.5	457.5	217.4	kWh
<i>Procentuele toename totaal E-verkoop</i>		393%	393%	393%	134%	
Piekgasafname	0.0345	0.0227	0.0220	0.0207	0.0220	m ³ /h
<i>Procentuele reductie piekafname</i>		34.1%	36.1%	40.1%	36.1%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	3 834	8 744	8 736	8 757	6 855	uur
totaal aantal draaiuren ketel	430	47	2	26	1 841	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 653	8 670	8 760	8 760	6 078	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		0.0	0.0	0.0	0.0	kg
Overschot warmte (buffer vol)	1.186	1.267	1.644	1.378	1.383	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	109.1	81.6	75.3	64.0	96.1	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		27.5	33.8	45.1	13.0	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	3.837	2.871	2.649	2.250	3.381	GJ/m ²
<i>Procentuele reductie primair energieverbruik</i>		25.2%	31.0%	41.4%	11.9%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.193	0.144	0.133	0.113	0.170	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.049	0.060	0.080	0.023	ton
<i>Procentuele reductie CO₂-emissie</i>		25.2%	31.0%	41.4%	11.9%	

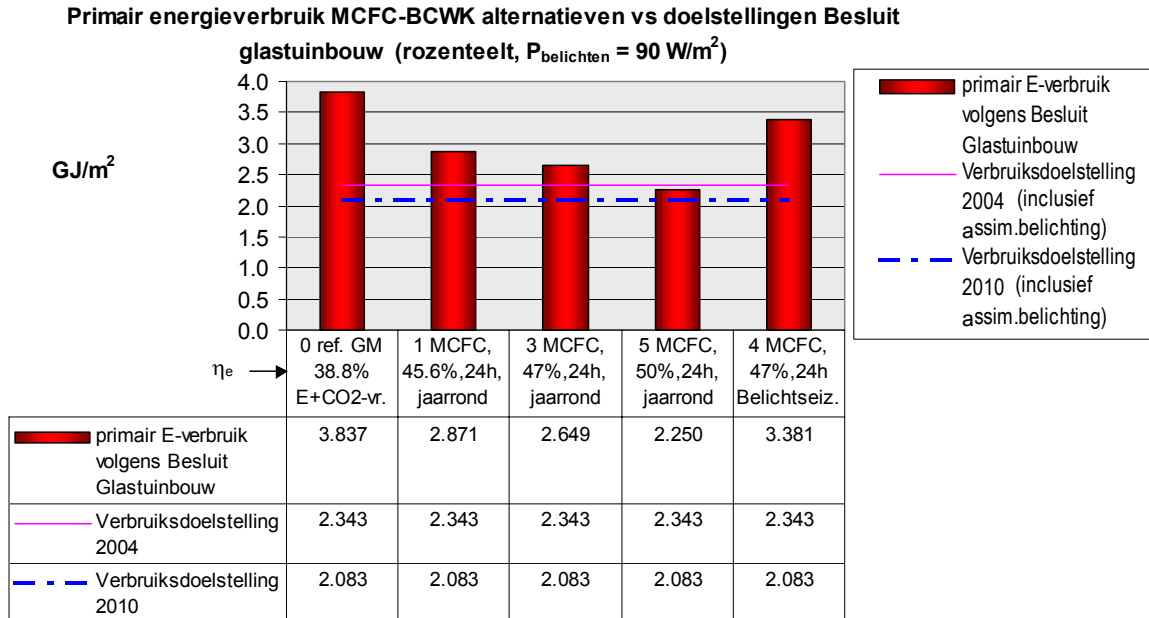
**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde

Bijlage E

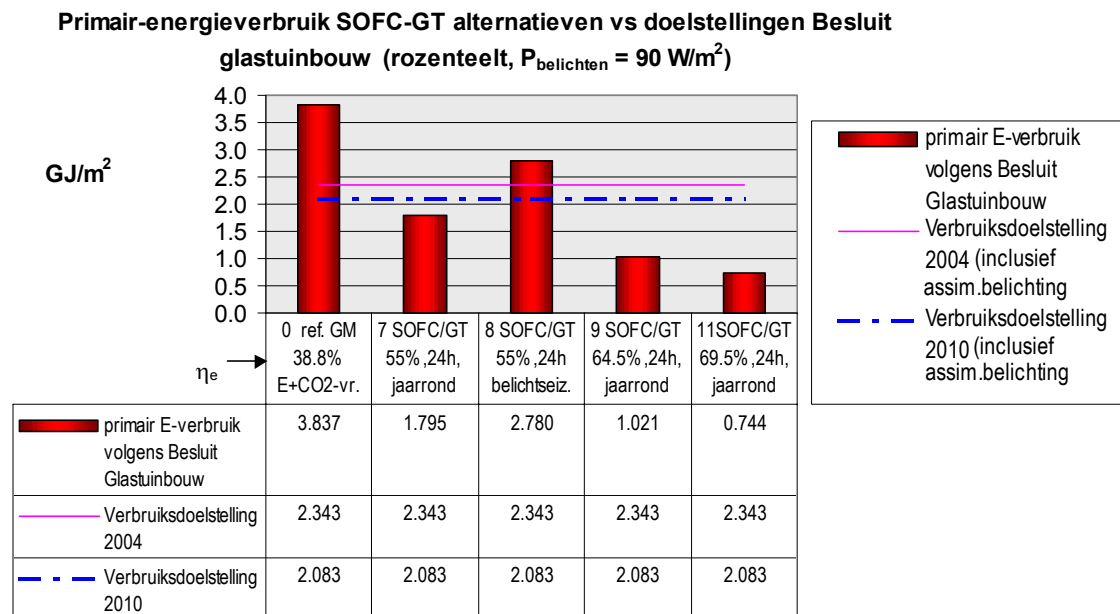
Tabel E.6 Jaarrondenergiefcijfers van SOFC-GT-varianten bij een belichtingsniveau van 90 W_e/m²

Jaarrondcijfers belichte roze teelt met SOFC-GT WK	Referentie 1	7	8	9	11	per m ² per jaar
	gasmotor realis.rend.	SOFC-GT conserv.rend	SOFC-GT conserv.rend	SOFC-GT realist.rend	SOFC-GT optim.rend	
Energiesysteem: ↓ type → referentie: gasmotor+ketel; alternatief: BCWK+ketel						
Belichtingsniveau: 90 W/m ² BCWK in als →		altijd	altijd in belicht.seizoen	altijd	altijd	
CO ₂ -dosering door	WK	BCWK	BCWK/ketel	BCWK	BCWK	eenheid
Jaargasverbruik	132.1	167.9	133.7	145.9	138.0	m ³
Reductie gasverbruik		-35.8	-1.6	-13.8	-5.9	m ³
<i>Procentuele besparing op gasverbruik</i>		-27.1%	-1.2%	-10.5%	-4.5%	
Elektriciteitsinkoop plateau-uren	1.0	0.4	1.8	0.4	0.4	kWh
Elektriciteitsinkoop daluren	1.9	0.5	2.1	0.5	0.5	kWh
Totaal elektriciteitsinkoop	3.0	0.9	3.9	0.9	0.9	kWh
<i>Procentuele besparing op totaal elektricit.verbruik</i>		71.5%	-28.8%	71.5%	71.5%	
Elektriciteitsverkoop plateau-uren	63.5	246.9	133.0	246.9	246.9	kWh
Elektriciteitsverkoop daluren	29.3	210.7	84.4	210.7	210.7	kWh
Totaal elektriciteitsverkoop	92.8	457.5	217.4	457.5	457.5	kWh
<i>Procentuele toename verkoop electriciteit</i>		393%	134.3%	393%	393%	
Piek in gasafname	0.0345	0.0393	0.0386	0.0388	0.0381	m ³ /h
<i>Procentuele reductie piekafname</i>		-14.1%	-11.9%	-12.5%	-10.4%	
Bedrijfstijd gasafname (jaargasverbruik/piek)	3 834	4 272	3 468	3 765	3 628	uur
Totaal aantal draaiuren gasketel	430	437	2 169	660	971	uur
totaal aantal draaiuren (BC)WK	6 653	8 760	6 078	8 760	8 760	uur
CO ₂ -inkoop (aanvulling op CO ₂ van BCWK)		0.0	0.0	0.0	0.0	kg
Overschot warmte (buffer vol)	1.186	0.524	0.598	0.344	0.210	GJ
Primair energieverbruik (in m ³ _{ae} , incl.E-teruglevering)	109.1	51.0	79.0	29.0	21.2	m ³ _{ae} **)
Besparing primair energieverbruik		58.1	30.1	80.1	87.9	m ³ _{ae}
Primair energieverbruik per m ² kas (Besluit glastuinbouw)	3.837	1.795	2.780	1.021	0.744	GJ/m ²
<i>Procentuele reductie primair energieverbruik</i>		53.2%	27.6%	73.4%	80.6%	
CO ₂ -emissie energieopwekking	0.193	0.090	0.140	0.051	0.037	ton
Reductie CO ₂ -emissie		0.103	0.053	0.142	0.156	ton
<i>Procentuele reductie CO₂-emissie</i>		53.2%	27.6%	73.4%	80.6%	

**) op basis van een verondersteld rendement van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark inclusief transport- en distributieverliezen van 40% op bovenwaarde



Figuur E.5 Vergelijking primaire-energieverbruikscijfers van MCFC-BCWK-varianten bij een belichtingsniveau van $75 \text{ W}_e/\text{m}^2$



Figuur E.6 Vergelijking primaire-energieverbruikscijfers van SOFC-GT BCWK varianten bij een belichtingsniveau van $75 \text{ W}_e/\text{m}^2$

Bijlage F

BIJLAGE F CIJFERS RENTABILITEIT BIJ VERSCHILLENDE BELICHTINGSNIVEAUS

Tabel F.1 Rentabiliteitscijfers MCFC-BCWK's (zonder EIA)

MCFC-variant	Rentabiliteitscijfers (zonder EIA)					
	belichtingsniveau ->	45	60	75	90	W _e /m ²
NCW						
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan		-39.06	-47.31	-52.94	-34.32	EUR/m ²
3: MCFC; realist.rend.(47%); altijd aan		-24.59	-26.97	-25.20	-6.32	EUR/m ²
5: MCFC; optim.rend.(50%); altijd aan		-18.96	-17.70	-11.98	11.03	EUR/m ²
4: MCFC; realist.rend.(50%);24h aan in belicht.seizoen		-52.60	-59.32	-60.55	-52.61	EUR/m ²
TVT						
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan	> 30	> 30	> 30	16.88	jaar	
3: MCFC; realist.rend.(47%); altijd aan	> 30	18.39	16.52	13.27	jaar	
5: MCFC; optim.rend.(50%); altijd aan	> 30	15.97	14.30	8.16	jaar	
4: MCFC; realist.rend.(50%);24h aan in belicht.seizoen	> 30	> 30	> 30	> 30	jaar	
IRR						
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan		-21.25	-16.93	-14.01	-3.69	%
3: MCFC; realist.rend.(47%); altijd aan		-10.16	-6.42	-3.14	4.23	%
5: MCFC; optim.rend.(50%); altijd aan		-6.35	-2.09	1.66	9.10	%
4: MCFC; realist.rend.(50%);24h aan in belicht.seizoen		-	-24.54	-17.40	-9.18	%

Tabel F.2 Rentabiliteitscijfers SOFC-GT-BCWK's (zonder EIA)

SOFC-GT-variant	Rentabiliteitscijfers (zonder EIA)					
	belichtingsniveau ==>	45	60	75	90	W _e /m ²
NCW						
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan		26.07	45.08	62.48	79.71	EUR/m ²
8: SOFC/GT; conserv.rend.(55%);24h aan in belichtingsseizoen		-3.97	6.78	18.54	27.56	EUR/m ²
9: SOFC/GT; realist.rend.(64.5%); altijd aan		40.97	67.39	94.29	115.74	EUR/m ²
11: SOFC/GT; optim.rend.(69.5%); altijd aan		43.82	73.64	104.14	128.00	EUR/m ²
TVT						
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan		2.86	2.73	2.60	2.80	jaar
8: SOFC/GT; conserv.rend.(55%);24h aan in belichtingsseizoen		14.99	6.10	4.91	4.91	jaar
9: SOFC/GT; realist.rend.(64.5%); altijd aan		2.12	2.07	1.94	2.16	jaar
11: SOFC/GT; optim.rend.(69.5%); altijd aan		2.02	1.93	1.80	2.01	jaar
IRR						
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan		51.72	56.38	61.44	54.12	%
8: SOFC/GT; conserv.rend.(55%);24h aan in belichtingsseizoen		0.07	12.70	20.46	21.09	%
9: SOFC/GT; realist.rend.(64.5%); altijd aan		88.92	93.39	106.38	85.48	%
11: SOFC/GT; optim.rend.(69.5%); altijd aan		97.90	106.78	125.42	98.93	%

Tabel F.3 Rentabiliteitscijfers MCFC-BCWK's (met EIA)

MCFC-variant	Rentabiliteitscijfers (met EIA)					
	belichtingsniveau ==>	45	60	75	90	W _e /m ²
NCW						
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan		-27.12	-30.96	-32.43	-8.86	EUR/m ²
3: MCFC;realist.rend.(47%); altijd aan		-12.66	-10.61	-4.69	19.14	EUR/m ²
5: MCFC;optim.rend.(50%); altijd aan		-7.03	-1.34	8.52	36.49	EUR/m ²
4: MCFC;realist.rend.(50%);24h aan in belicht.seizoen		-40.72	-42.96	-40.04	-27.16	EUR/m ²
TVT						
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan		> 30	> 30	> 30	13.74	jaar
3: MCFC;realist.rend.(47%); altijd aan		> 30	14.96	13.44	7.54	jaar
5: MCFC;optim.rend.(50%); altijd aan		14.82	8.93	8.01	3.77	jaar
4: MCFC;realist.rend.(50%);24h aan in belicht.seizoen		> 30	> 30	> 30	> 30	jaar
IRR						
1: MCFC; conserv.rend.(45.6%); altijd aan		-16.45	-11.81	-8.60	2.97	%
3: MCFC;realist.rend.(47%); altijd aan		-4.04	0.08	3.92	12.62	%
5: MCFC;optim.rend.(50%); altijd aan		0.42	5.25	9.81	18.89	%
4: MCFC;realist.rend.(50%);24h aan in belicht.seizoen			-20.10	-12.34	-3.36	%

Tabel F.4 Rentabiliteitscijfers SOFC-GT-BCWK's (met EIA)

SOFC-GT-variant	Rentabiliteitscijfers (met EIA)					
	belichtingsniveau ==>	45	60	75	90	W _e /m ²
NCW						
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan		29.04	49.52	68.14	87.37	EUR/m ²
8: SOFC/GT;conserv.rend.(55%);24h aan in belichtingsseizoen		-1.00	11.22	24.19	35.22	EUR/m ²
9: SOFC/GT;realist.rend.(64.5%); altijd aan		43.94	71.83	99.95	123.40	EUR/m ²
11: SOFC/GT;optim.rend.(69.5%); altijd aan		46.78	78.09	109.79	135.66	EUR/m ²
TVT						
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan		2.35	2.24	2.13	2.30	jaar
8: SOFC/GT;conserv.rend.(55%);24h aan in belichtingsseizoen		8.11	4.99	4.02	4.02	jaar
9: SOFC/GT;realist.rend.(64.5%); altijd aan		1.73	1.69	1.59	1.77	jaar
11: SOFC/GT;optim.rend.(69.5%); altijd aan		1.65	1.58	1.47	1.64	jaar
IRR						
7: SOFC/GT; conserv.rend.(55%); altijd aan		73.37	80.22	88.18	76.46	%
8: SOFC/GT;conserv.rend.(55%);24h aan in belichtingsseizoen		4.14	19.69	29.48	29.93	%
9: SOFC/GT;realist.rend.(64.5%); altijd aan		135.94	144.27	170.17	129.27	%
11: SOFC/GT;optim.rend.(69.5%); altijd aan		153.16	171.02	211.98	154.98	%

Bijlage F

Tabel F.5 CO₂-indices (BC)WK-varianten volgens CO₂-index-regeling uit MEP

(BC)WK-systeem	elektrisch rendement	thermisch rendement	totaal rendement	CO ₂ -index
0: gasmotorreferentie	38.8%	49.9%	88.7%	32.9%
MCFC conservatief	45.6%	35.5%	81.1%	25.3%
MCFC realistisch	47.0%	43.0%	90.0%	36.4%
MCFC optimistisch	50.0%	41.0%	91.0%	38.0%
SOFC-GT conservatief	55.0%	26.6%	81.6%	29.0%
SOFC-GT realistisch	64.5%	25.5%	90.0%	38.5%
SOFC-GT optimistisch	69.5%	22.5%	92.0%	40.5%