

50964148.100-TOS/NET 09-5391

Eindrapport “Haalbaarheid van directe elektriciteitsopwekking uit warmte met een thermo elektrische generator”

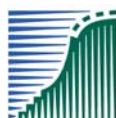
Arnhem, 8 september 2009

Auteurs M.H. Huibers¹, R. Jansen²

¹ *New Energy Technologies, KEMA Nederland BV.*

² *Praktijkonderzoek Plant en Omgeving (PPO), Wageningen UR*

In opdracht van Productschap Tuinbouw, Ministerie van LNV



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit



Auteur : M.H. Huibers	09-09-08	beoordeeld : P.D.M. de Boer	09-09-
B 41 blz. - bijl.	WSc	goedgekeurd : T.J. Bosma	09-09-

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

Het is verboden om dit document op enige manier te wijzigen, het opsplitsen in delen daarbij inbegrepen. In geval van afwijkingen tussen een elektronische versie (bijv. een PDF bestand) en de originele door KEMA verstrekte papieren versie, prevaleert laatstgenoemde.

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.

De inhoud van dit rapport mag slechts als één geheel aan derden kenbaar worden gemaakt, voorzien van bovengenoemde aanduidingen met betrekking tot auteursrechten, aansprakelijkheid, aanpassingen en rechtsgeldigheid.

INHOUD

blz.

SAMENVATTING	5
1 Inleiding	6
1.1 Achtergrond	6
1.2 Aanleiding van het project	7
1.3 Doel	7
1.4 Opzet van dit rapport	8
2 Theorie.....	9
2.1 Thermo-Elektrische Generatoren: principe.....	9
2.2 Prestatie en theoretische efficiëntie	10
2.3 Toepassingsgebieden en schaalgrootte	15
2.4 Alternatieve technologieën voor energie uit restwarmte	17
2.4.1 Organic Rankine Cycle	17
2.4.2 Kalinacyclus.....	18
2.4.3 Stirlingcyclus.....	18
2.4.4 Algemene kenmerken en vergelijking met TEG's.....	18
3 Warmtesystemen in de kas	21
3.1 Inleiding	21
3.2 WKK.....	21
3.3 Buisverwarming	22
3.4 Warmtebuffer	23
3.5 Verlichting	23
4 Toepassing TEG's bij warmtesystemen.....	25
4.1 Selectiecriteria beste scenario.....	25
4.1.1 Investeringskosten.....	25
4.1.2 Temperatuur warmtebron	25
4.1.3 Temperatuur koudebron	26
4.1.4 Beschikbaarheid warmte in de tijd	26
4.1.5 Aansluitbaarheid op het elektriciteitsnet	26
4.1.6 Levensduur	27
4.1.7 Overzicht criteria en weegfactoren	27
4.2 TEG bij warmtekrachtkoppeling	28
4.3 Buisverwarming	29

4.4	Warmtebuffers	29
4.5	Verlichting	30
4.6	Conclusie	30
5	Koppeling Tegn aan WKKs.....	31
5.1	Inleiding	31
5.2	Technische implementatie	32
5.3	Economische verkenning.....	32
6	Perspectieven	36
7	Conclusies en aanbevelingen.....	38
7.1	Conclusies	38
7.2	Aanbevelingen	38
	REFERENTIES	40

SAMENVATTING

Door in de toekomst slimmer om te gaan met energie in de glastuinbouw verwacht men aanzienlijk te kunnen besparen op het aardgasverbruik. Veel ontwikkelingen richten zich momenteel op verhoging van de energie efficiëntie in de glastuinbouw. Het slim omgaan met warmte speelt vaak een belangrijke rol bij het verhogen van energie efficiëntie. In het in dit rapport beschreven onderzoek wordt gekeken of warmte beter benut kan worden door gebruik te maken van thermo elektrische generatoren (TEG's). TEG's maken gebruik van het zogenaamde Seebeck-effect om warmte direct om te zetten in elektriciteit. De doelstelling van het in dit rapport beschreven onderzoek is om een eerste globaal inzicht te geven in de technische en economische haalbaarheid van de toepassing van TEG in de glastuinbouw. Uit deze haalbaarheidsstudie kan worden geconcludeerd dat het gebruik van TEG's voor omzetting warmte in elektriciteit binnen de glastuinbouw nu en in de nabije toekomst technisch haalbaar kan zijn maar economisch niet rendabel is. De kosten voor TEG-elementen zijn nu nog te hoog en het rendement van de omzetting te laag. De voordelen van TEG's, zoals het geruisloos kunnen werken en de extreem lange levensduur, zijn niet van direct voordeel voor de glastuinbouw.

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

Naar verwachting zal de komende jaren wereldwijd de vraag naar energie toenemen, waardoor de prijs van energie zal stijgen. Deze constatering is belangrijk voor de Nederlandse glastuinbouw omdat energie en glastuinbouw nauw met elkaar verbonden zijn. Bijna 10 procent van het Nederlands aardgasverbruik is voor rekening van de glastuinbouw [1]. Dit gas wordt met name gebruikt voor het verwarmen van de kassen. Echter, vanuit energetisch oogpunt is het omzetten van hoogwaardig aardgas naar een laagwaardige toepassing zoals verwarmen niet logisch. Door in de toekomst slimmer om te gaan met energie in de glastuinbouw verwacht men aanzienlijk te kunnen besparen op het aardgasverbruik. Zo is in het programma 'Kas als Energiebron' om in 2020 in nieuwe kassen energieneutraal te kunnen telen. Naast de besparingen op aardgasverbruik heeft het slimmer omgaan met energie ook een positief effect op een verlaging van de CO₂-emissie en geeft daarmee samenhangend een verlaging van de milieubelasting.

Veel ontwikkelingen richten zich momenteel op verhoging van de energie-efficiëntie in de glastuinbouw en ook op absolute reductie van de warmtevraag (het zogenoemde "Nieuwe Telen" dat met 40-50% minder warmtevraag dezelfde productie geeft). Onder energie-efficiëntie wordt verstaan de hoeveelheid nuttige productie per eenheid gebruikte energie.

Een eerste ontwikkeling betreft onderzoek naar het isoleren van kassen. Hier is inmiddels veel vooruitgang geboekt en isolatie wordt veel toegepast. In 2004 maakte bijvoorbeeld 79% van de tuinders gebruik van een beweegbaar energiescherm om de warmte binnen de kas te houden.

Een tweede ontwikkeling betreft het gebruik van duurzame biobrandstoffen zoals houtsnippers voor verwarming van kassen. Ook hier is veel vooruitgang geboekt. Het aandeel duurzame energie nam in de periode 2000-2007 toe van 0,1 tot 0,8% [5].

Een derde ontwikkeling welke zorgt voor een meer efficiënter gebruik van energie is het gebruik van warmtekrachtkoppeling (WKK). Bij traditionele elektriciteitsproductie in elektriciteitscentrales wordt de gebruikte brandstof met een efficiëntie van ongeveer 35-50% omgezet in elektriciteit. Het resterende deel gaat verloren als onbenutte warmte. Bij gebruik van WKK – de gecombineerde productie van elektriciteit en warmte – wordt zo'n 90% van de brandstof omgezet in bruikbare energie, wat een zeer hoge energie-efficiëntie is.

Een vierde ontwikkeling is het gebruik van aardwarmte. In 2006 werd gestart met een pilot-project waarbij geboord werd naar een watervoerende laag op 1700 meter diepte. Het water heeft op deze diepte een temperatuur van 60 °C en geeft haar warmte af aan de kassen door middel van warmtewisselaars. De installatie heeft een gunstige verhouding tussen de uiteindelijk verkregen warmte (of koeling) en de voor het proces benodigde elektriciteit. De hoge efficiëntie is een sterk punt van aardwarmte. De kosten voor de boring zijn echter nog steeds erg hoog en de terugverdientijd lang.

Een vijfde ontwikkeling is de tijdelijke opslag van warmte. Zo wordt op dit moment in de zomer warmte opgeslagen in aquifers zodat deze in de winter gebruikt kan worden om de kas op te warmen. Dit concept werkt, doch is relatief kostbaar en niet altijd toepasbaar omdat geschikte bodemlagen niet overal beschikbaar zijn.

Door bovenstaande ontwikkelingen kwam de glastuinbouw in 2007 uit op 60% minder primair brandstofverbruik per eenheid product dan in 1980.

1.2 Aanleiding van het project

Uit het bovenstaande blijkt duidelijk dat warmte vaak een belangrijke rol speelt bij het verhogen van energie efficiëntie. Er is dan ook veel aandacht voor warmte en energie vraagstukken in de glastuinbouw want inherent aan het gebruik van een glazen overkapping is de accumulatie van warmte. Deze warmte kan dus worden opgeslagen maar vrijwel altijd wordt door middel van ventilatie een groot deel van de warmte afgevoerd.

1.3 Doel

In het in dit rapport beschreven onderzoek wordt gekeken of warmte beter benut kan worden door gebruik te maken van thermo elektrische generatoren (TEG). TEG's maken gebruik van het zogenaamde Seebeck effect om warmte direct te converteren in elektriciteit. De doelstelling van het in dit rapport beschreven onderzoek is om een eerste globaal inzicht te geven in de technische en economische haalbaarheid van de toepassing van TEG in de glastuinbouw.

1.4 Opzet van dit rapport

In hoofdstuk 2 wordt de achtergrond, de aanleiding en het doel van deze haalbaarheidsstudie gepresenteerd. Hoofdstuk 3 bestaat uit een theoretische uiteenzetting over TEG's. Hierbij wordt inzicht gegeven in het principe en de technische en economische prestaties van verschillende TEG's die momenteel beschikbaar zijn of in ontwikkeling zijn. Tevens worden TEG's vergeleken met alternatieve methoden om warmte in elektriciteit om te zetten. In hoofdstuk 4 worden vier potentieel interessante warmtesystemen in de kas beschreven. De mogelijkheden voor toepassing van TEG's in elk warmtesysteem worden in hoofdstuk 5 ingeschat. De meest interessante optie wordt in hoofdstuk 6 uitgewerkt en hiervan wordt een globale economische verkenning gepresenteerd. Op basis van de economische verkenning wordt in hoofdstuk 7 het perspectief voor toepassing van TEG in de glastuinbouw geschetst. Hoofdstuk 8 beschrijft de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

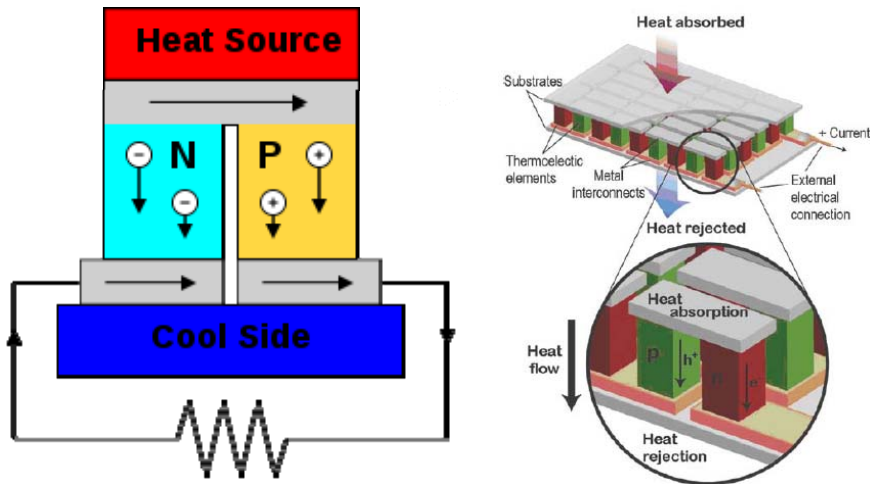
2 THEORIE

2.1 Thermo-Elektrische Generatoren: principe

Een Thermo-Elektrische Generator [2,3,4], doorgaans afgekort met TEG, is het sleutelonderdeel van een apparaat waarmee warmte rechtstreeks in elektriciteit kan worden omgezet. Geen andere energievormen, zoals mechanische of potentiële energie, spelen hierbij een rol. De werking van een TEG is gebaseerd op het thermo-elektrisch effect (ook wel “thermo-elektriciteit” genoemd), wat inhoudt dat een temperatuursverschil over een materiaal resulteert in een elektrische spanning over dat materiaal en vice versa. Een temperatuursverschil kan door zulke materialen worden omgezet in elektriciteit (TEG) en elektriciteit kan worden omgezet in een temperatuursverschil. Koeling op deze wijze heet *thermo-electric cooling* (TEC, ook wel Peltier koeling) en verwarmen is ook mogelijk.

Het thermo-elektrisch effect is in feite een samenstelling van drie verschillende effecten, te weten het Seebeck effect, het Peltier effect en het Thomson effect. Voor TEG's is het Seebeck effect van belang. De praktische toepassing hiervan is het elektrisch in serie en thermisch parallel schakelen van twee typen halfgeleiders (zie Figuur 1). In een n-type halfgeleider stromen elektronen (negatieve lading) van de warme naar de koude zijde, bij een p-type elektronengaten (corresponderend met positieve lading). Op deze wijze ontstaan een potentiaalverschil over verbonden stukjes n- en p-type materiaal, thermokoppels genoemd. Door het aansluiten van een externe elektrische belasting kan elektrische energie worden onttrokken aan het TEG-element.

Een enkele TEG heeft doorgaans een grootte van enkele mm² tot enkele tientallen cm², is één of enkele mm dik en bevat twee tot een honderdtal thermokoppels, koppels van p- en n-type materialen.



Figuur 1 Principe van een TEG. Een schematisch element (links) [6] en een TEG opgebouwd uit vele elementen elektrisch in serie en thermisch parallel geschakeld [3]

Omdat de elektriciteitsproductie van een TEG gerelateerd is aan het temperatuurverschil tussen de warme en koude zijde van het element, dient dit voor een voldoende hoog rendement in praktische toepassingen zo groot mogelijk te zijn. Bij een gegeven temperatuur van een warmtebron betekent dit dat de TEG met minimale thermische weerstand moet worden verbonden met de warmtebron en dat de koude zijde dient te worden gekoeld. Afhankelijk van de toepassing (temperatuurverschil, beschikbare ruimte et cetera) kan passief worden gekoeld met of zonder een koellichaam, of actief door middel van ventilatoren of waterkoeling.

2.2 Prestatie en theoretische efficiëntie

Om een duidelijke beschouwing te kunnen geven over prestaties en toekomstperspectieven van energieopwekking door TEG's (zie hoofdstuk 6 en 7), moet het begrip *ZT-waarde* worden uitgelegd. De *ZT-waarde* is de primaire prestatie-indicator van TEG-materialen en is thermodynamisch gerelateerd aan de maximale theoretische efficiëntie van TEG's. De *ZT-waarde* is afhankelijk van de gemiddelde absolute temperatuur, en drie materiaaleigenschappen: thermische geleidbaarheid, soortelijke weerstand en Seebeck-coëfficiënt

(zie formule 1). Deze laatste wordt ook wel *thermopower* genoemd en is onder andere afhankelijk van de elementaire samenstelling en kristalstructuur van het materiaal.

$$ZT = \frac{S^2 T}{k\rho} \quad \text{formule 1}$$

waarin

ZT	= ZT-waarde	(-)
S	= Seebeck coëfficiënt	(V / K)
T	= gemiddelde absolute temperatuur	(K)
k	= thermische geleidbaarheid	(W / m·K)
ρ	= soortelijke weerstand	($\Omega \cdot m$)

De ZT-waarde is feitelijk het product van een constante Z (in 1 / K) en de gemiddelde absolute temperatuur. Voor prestatievergelijking van TEG-materialen blijkt het duidelijker om dit product te hanteren dan alleen de constante Z.

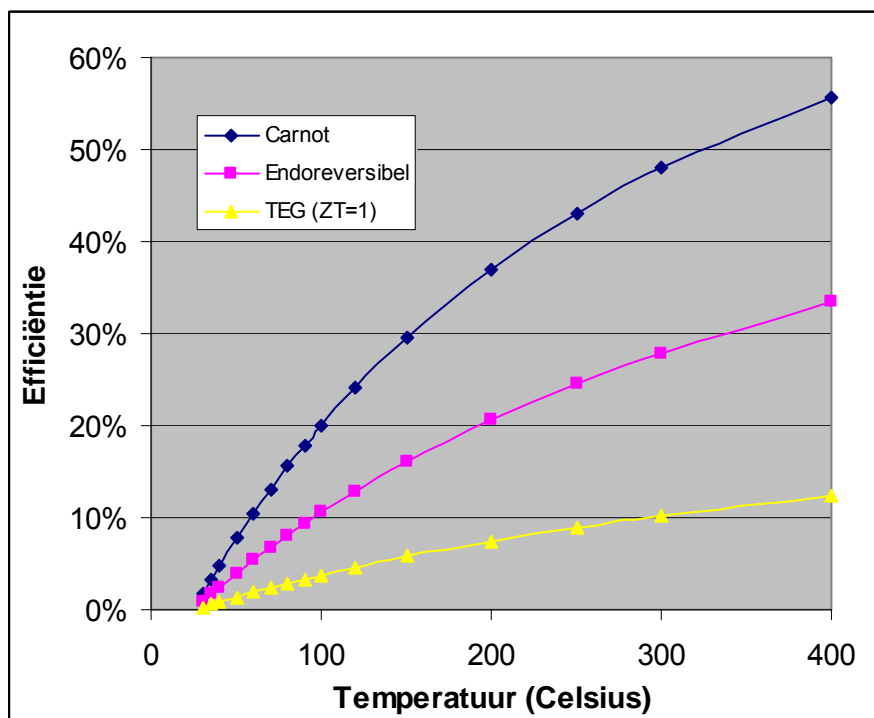
De maximale theoretische efficiëntie van TEG's, dus de maximale nuttige arbeid die uit de warmte-energie gehaald kan worden, is als volgt afhankelijk van de ZT-waarde (formule 2)

$$\eta = \frac{T_{\text{warm}} - T_{\text{koud}}}{T_{\text{warm}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_{\text{koud}}}{T_{\text{warm}}}} \quad \text{formule 2}$$

waarin

η	= thermodynamische efficiëntie	(-)
T_{warm}	= absolute temperatuur warme zijde	(K)
T_{koud}	= absolute temperatuur koude zijde	(K).

De eerste term is daarin is de Carnot-efficiëntie, die de efficiëntie geeft van Carnotcyclus, het maximaal haalbare rendement voor alle omzettingen van warmte in nuttige arbeid. Hieruit volgt dat de efficiëntie van dergelijke warmtemachines sterk afhankelijk is van het heersende temperatuursverschil. De tweede term in formule 2 is specifiek voor TEG's. Het is te zien dat hoe hoger de ZT-waarde wordt, hoe dichter de tweede term nadert tot 1, dus hoe dichter de theoretische TEG-efficiëntie nadert tot de absolute efficiëntiegrens (Carnot-efficiëntie).

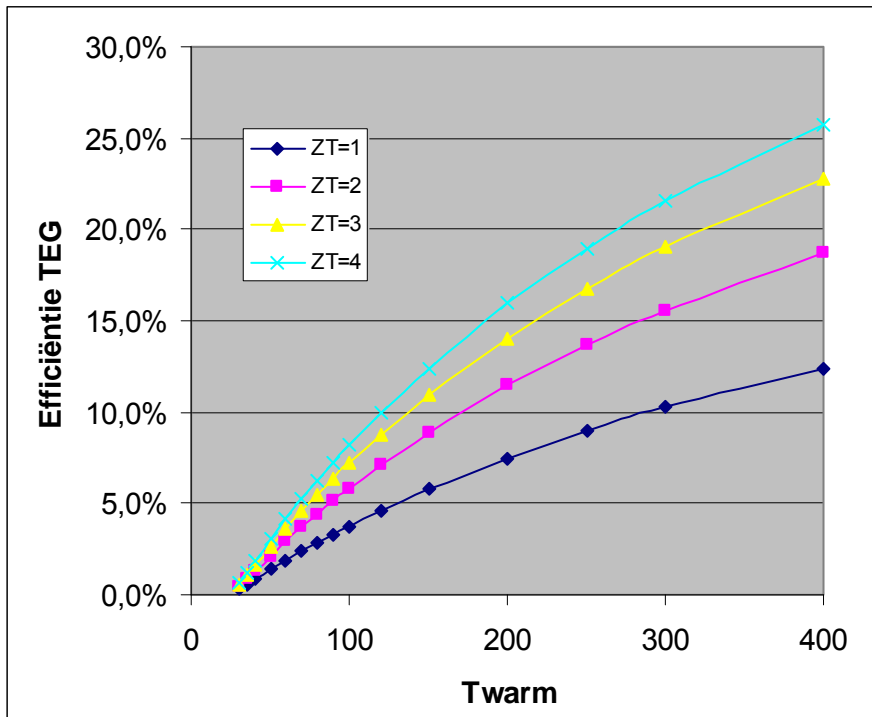


Figuur 2 Theoretische maximale efficiënties van warmtemachines (zie ook formule 2 en 3). Er is uitgegaan van een koeltemperatuur van 25 °C

Figuur 2 dient ter illustratie van het boven beschrevene. Het endoreversibele rendement [7,8] (formule 3) is ook in verwerkt in deze grafiek, omdat het een betere maatstaf is voor de maximale efficiëntie van warmtemachines in de praktijk, vanwege enkele onrealistische eigenschappen van de Carnotcyclus (zoals het hanteren van een tot nul naderende limietwaarde voor geproduceerde arbeid).

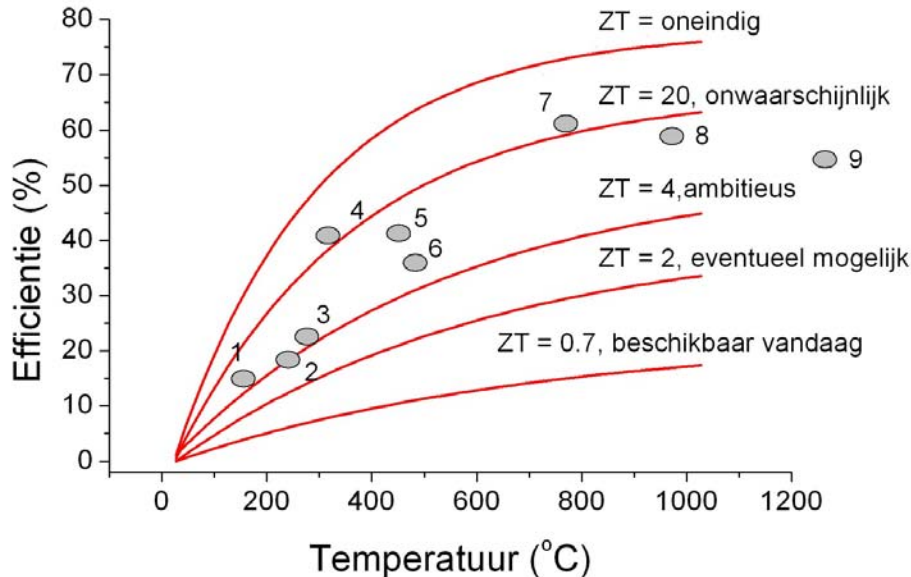
$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_{koud}}{T_{warm}}} \quad \text{formule 3}$$

Uit de figuur is direct te zien dat TEG's met een ZT van 1, bij benadering de hoogste ZT-waarde voor huidige commerciële TEG-materialen (bijvoorbeeld bismuth / lood / antimoon telluride, silicium germanide), een lage absolute en relatieve efficiëntie hebben. Praktijk-efficiënties zullen nog lager liggen vanwege niet-ideaal gedrag en systeemverliezen. Verhoging van de ZT-waarde, door synthese en gebruik van nieuwe materialen, heeft dan ook de hoogste prioriteit in internationale onderzoeksprojecten ter verbetering van TEG's.



Figuur 3 Maximale efficiëntie van TEG's voor verschillende ZT-waarden (koeling bij 25 °C)

Op laboratoriumschaal zijn materialen beschikbaar met een ZT van 2, of in een enkel geval zelfs van meer dan 3 (zie ook Figuur 3 voor theoretische efficiënties bij verschillende ZT-waarden). Het gaat hierbij echter om exotische materialen op labschaal en met een hoge prijs, waarbij het vaak onduidelijk is of en op welke termijn deze belemmeringen kunnen worden overwonnen om tot commerciële toepassing te komen. Het wordt mogelijk geacht om in praktijk een ZT van 2 te halen; hogere waarden zullen een wellicht onrealistische uitdaging voor de toekomst zijn. In Figuur 34 wordt de efficiëntie van TEG's bij verschillende, deels hypothetische ZT-waarden vergeleken met de belangrijkste energieopwekkings-technologieën van vandaag.



Figuur 4 Overzicht doorsnee efficiëntie en werkingstemperatuur van belangrijke elektriciteitsopwekkings-technologieën: 1. Geothermie / Organic Rankinecyclus (ORC); 2. Geothermie / Kalinacyclus; 3. Cement / ORC; 4. Zonne-energie / Sterlingcyclus; 5. Nucleair / Rankine, 6. Zonne-energie / Rankine, 7) Kolen / Rankine, 8) Zon / Brayton, 9) Nucleair / Brayton + Rankine [9]

Uit Figuur 4 kan worden geconcludeerd dat voor een technisch zinvolle toepassing die kan concurreren met andere opwekkingstechnologieën, ZT-waarden van hoger dan 2 en eigenlijk rond de 4 nodig zijn. Overigens gaat het hier om grootschalige opwekking; zeer kleinschalige toepassing en/of gebruik in situaties met bijzondere eisen vindt nu al plaats (zie ook volgende paragraaf). Daarnaast wordt geen rekening gehouden met de kosten van TEG-opwekking, oftewel de economische haalbaarheid. Bij een extreem lage prijs per watt zal TEG-technologie ook bij lage efficiëntie al interessant zijn, en vice versa. Hier wordt voor de glastuinbouw dieper op ingegaan in Hoofdstuk 6 en 7.

2.3 Toepassingsgebieden en schaalgrootte

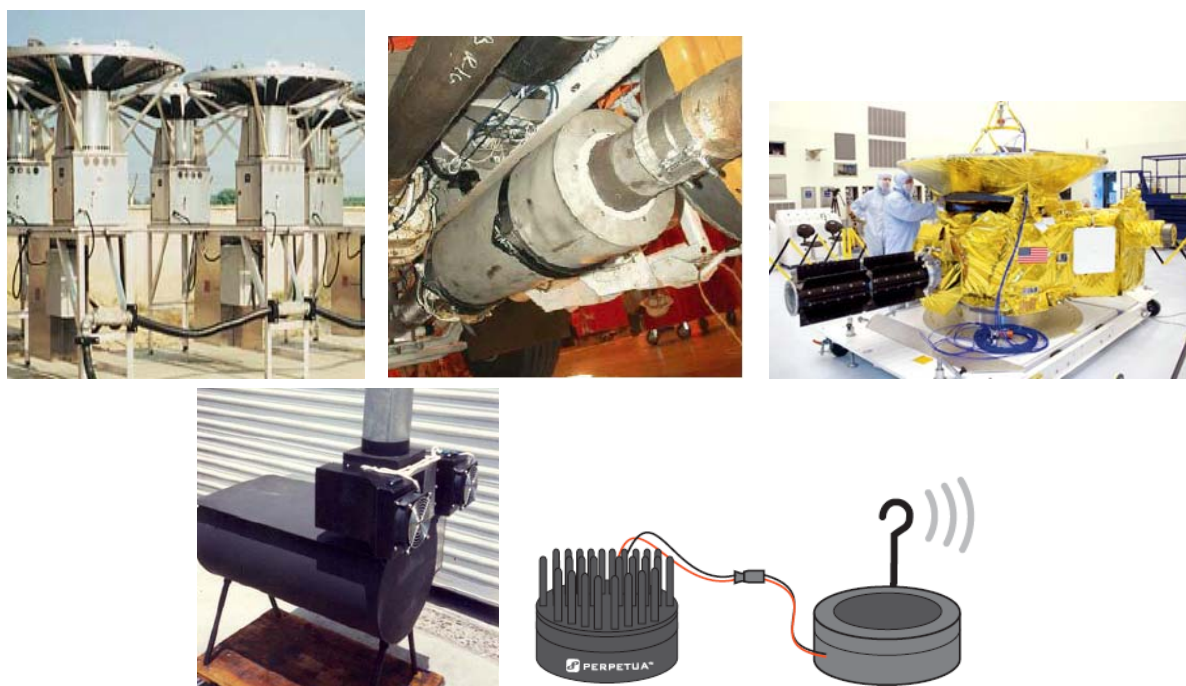
Elektriciteitsopwekking door middel van TEG's heeft unieke eigenschappen op basis waarvan de technologie een aantal commerciële toepassingen heeft gevonden. Leidende kenmerken hierbij zijn:

- geen bewegende delen
 - stilte
 - geen onderhoud
 - levensduur
- kleine footprint (neemt weinig ruimte in beslag)
- schaalbaar
- energieopwekking op μ W tot ruwweg 1 kW schaal
- hoge prijs per watt
 - lage efficiëntie
 - hoge prijs materialen.

In de huidige toepassingsgebieden van TEG's spelen deze kenmerken een doorslaggevende rol. Voorbeelden zijn (zie ook Figuur 5):

- stroomopwekking op relatief kleine schaal op afgelegen plaatsen (bijvoorbeeld langs gasleidingen)
- toepassingen waar een lange onderhoudsloze levensduur uitermate belangrijk is (bijvoorbeeld energievoorziening ruimtevaartuigen)
- continue stroomvoorziening van draadloze sensoren
- geluidarme energieopwekking (bijvoorbeeld portable generator voor het leger)
- kleinschalige houtgestookte elektriciteitsproductie (bijvoorbeeld TEG's gekoppeld aan houtkachel / houtoven)
- elektriciteitsopwekking uit uitlaatwarmte (vracht)auto's.

Wanneer de prijs en efficiëntie (ZT-waarde) van TEG's voldoende verbetert, liggen zeer interessante toepassingen in het verschiet, zoals restwarmte benutting op grote schaal (zie Tabel 1). Echter, de kans dat dit in de nabije toekomst wordt gehaald is klein. Toonaangevend onderzoek [11] geeft bijvoorbeeld aan dat de toepasbaarheid van de huidige en in de nabije toekomst te ontwikkelen TEG's voor de verschillende vermogensschalen gering is, waardoor grootschalige toepassing vooralsnog onwaarschijnlijk lijkt. Dit voorspelt tevens dat de energieopwekking in de glastuinbouw ook zeer onwaarschijnlijk zal zijn.



Figuur 5 TEG-toepassingen. Met de klok mee vanaf linksboven: 4 kW gasgestookte generator voor stroomopwekking op afgelegen plek; 1 kW TEG-systeem om vrachtwagenuitlaat; *New Horizons* ruimtevaartuig met 240W TEG (links, zwart); 20 W stroomopwekking bij houtkachel; mW TEG gekoppeld aan radiografische sensor

Tabel 1 Verlaging milieubelasting bij toepassing van TEG [11]

vermogensschaal (kWe)	voorbeelden	benodigde ZT*	haalbaarheid
> 1000	grote schaal energieopwekking, bv. vervanging “ <i>solar thermal engine</i> ”	> 8-20	zeer onwaarschijnlijk
> 10	restwarmte industrie, geothermische energie	> 4	onwaarschijnlijk
0,5 – 5	energieopwekking thuis, gebruik restwarmte voertuigen, autokoeling	> 1,5 – 2	nader te bepalen
< 0,5	energieopwekking afgelegen plekken, sensoren	0,5 - 1	nu mogelijk

2.4 Alternatieve technologieën voor energie uit restwarmte

Om een beter inzicht te krijgen in de relatieve mogelijkheden van de toepassing van TEG's, is een globale vergelijking met alternatieve warmtemachines in de glastuinbouw handig. Gegeven het feit dat TEG's gebruik maken van restwarmte, worden externe verbrandingsmotoren beschreven, geen interne verbrandingsmotoren zoals Otto- of Dieselmotoren, evenmin als overige technologieën zoals brandstofcellen.

2.4.1 Organic Rankine Cycle

Energieopwekking gebruik makend van *Organic Rankine Cycle* (ORC) technologie heeft de afgelopen jaren meer en meer commerciële toepassingen gevonden. De techniek staat voor succesvolle toepassing in de glastuinbouw nog in de kinderschoenen. In principe is ORC een variant op de Rankinecyclus oftewel de stoomcyclus, met in plaats van water een organisch oplosmiddel als werkvloeistof. Door het kiezen van een werkvloeistof met de juiste parameters, zoals kookpunt, dichtheid, warmtegeleiding en verdampingswarmte, kan de optimale efficiëntie worden afgestemd op de gewenste temperatuur. Voorbeelden van werkvloeistoffen zijn bijvoorbeeld pentaan en toluen.

Het gebruik van ORC heeft als doel om (afval)warmte om te zetten in elektriciteit. Vandaag de dag zijn er systemen zoals bijvoorbeeld Tri-o-gen, die door benutting van een deel van de (afval)warmte zo'n 10% extra elektriciteit leveren bij koppeling aan een WKK, met een efficiëntie van ongeveer 20%. De Tri-o-gen ORC gebruikt de rookgassen direct na de turbo. Vervolgens kunnen de rookgassen bij aardgas toepassingen na de ORC worden ingezet om water te verwarmen. In het geval van biogas worden de rookgassen bij 180 °C aan de buitenlucht toevertrouwd omdat condensatie van biogas moet worden voorkomen. De Tri-o-gen ORC produceert zelf ook warm water wat ontstaat door condensorkoeling. De ORC-techniek is relatief kostbaar. Voor een systeem van 150 kWe bedraagt de aanschafprijs circa EUR 750.000,--. Op dit moment zijn er diverse fabrikanten die zich vooral onderscheiden in de beschikbare vermogensrange alsmede het medium dat binnen de ORC wordt gebruikt. Dit is ook bepalend voor het temperatuurniveau dat benodigd is voor de warmte om ORC goed te laten werken. ORC is typisch om (laagwaardige) restwarmte om te zetten in elektriciteit. Uitdaging hierbij is om prijsniveau van ORC voldoende laag te krijgen om interessant te zijn. Het toepassen van ORC is met name interessant bij koppeling aan biogassystemen zoals mestvergisters. Hierbij is de warmte van de WKK voor het proces veelal niet nodig, dus warmte is hier een afvalproduct.

2.4.2 Kalinacyclus

De Kalinacyclus is een andere thermodynamische cyclus voor energieopwekking. De werkvloeistof bestaat hierbij niet uit één stof maar uit een binair (of meervoudig) mengsel. Verder is het principe vergelijkbaar met de Rankinecyclus. Het gebruik van een mengsel, in de praktijk meestal 70% ammonia met 30% water, biedt enkele voordelen zoals het feit dat er niet één vast kookpunt respectievelijk condensatietemperatuur is maar een traject, wat uiteindelijk de efficiëntie ten goede komt.

Toepassing van Kalinacyclus technologie is relatief nieuw. Met name bij lagere temperaturen van de beschikbare warmte (bijvoorbeeld 110-140 °C) of lager kan een enkele procentpunten hogere efficiëntie gehaald worden dan bij ORC-installaties. Een belangrijke toepassing voor Kalinacyclus installaties is geothermie. Nadelen ten opzichte van ORC zijn vooralsnog wat hogere investeringskosten, en minder ervaring met de techniek.

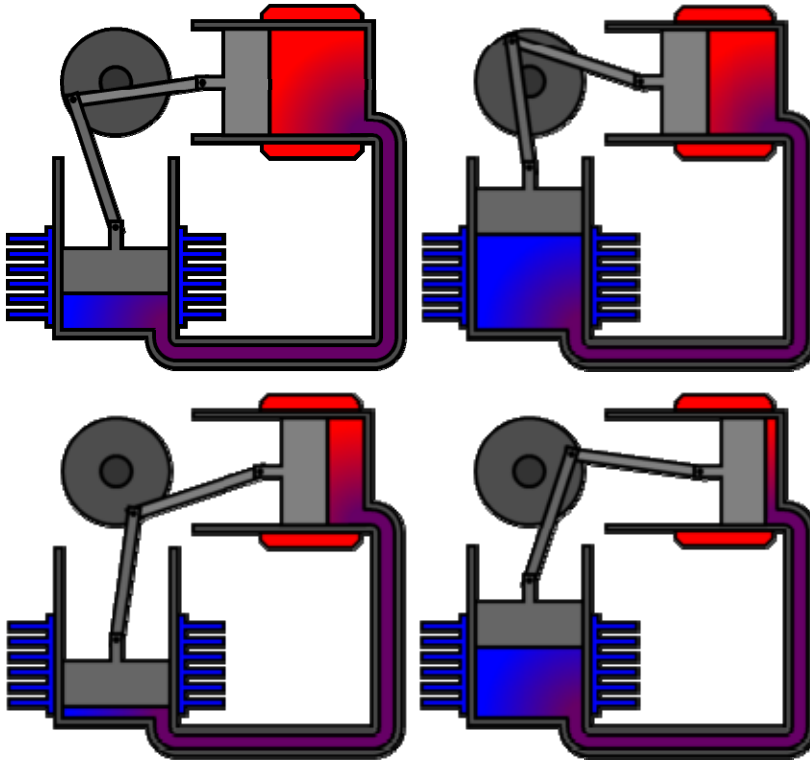
2.4.3 Stirlingcyclus

Een fundamenteel verschillende thermodynamische cyclus is de Stirlingcyclus. In tegenstelling tot de vorige cycli vinden hierbij geen faseovergangen plaats (vloeistof – gas en vice versa), maar wordt er puur gebruik gemaakt van een gas (zie ook Figuur 6). De praktische implementatie is de Stirlingmotor, waarvan er verschillende typen zijn, zoals de alfa-, beta- en gammatype motor. Eigenschappen van Stirlingmotoren zijn een voor de glastuinbouw relatief kleine gemiddelde schaalgrootte van enkele kW tot 100 à 200 kW, geluidsarme toepassing, en een efficiëntie van tussen de 10 en 20% afhankelijk van de toepassing [9]. Momenteel vindt een toename van het gebruik van Stirlingmotoren plaats in micro-WKK's, bijvoorbeeld van het merk Whispergen of Microgen.

2.4.4 Algemene kenmerken en vergelijking met TEG's

Bovengenoemde drie typen externe verbrandingsmotoren hebben een aantal gemeenschappelijke kenmerken, die van belang zijn wanneer ze met TEG's vergeleken worden. Hieronder staan de belangrijkste genoemd.

- Prijs per watt. Vergeleken met TEG's zijn de kosten van de technologieën relatief laag.
- Efficiëntie. Afhankelijk van de situatie en (hoge) temperaturen is 15-20% haalbaar, factoren meer dan TEG's momenteel kunnen halen bij realistische temperaturen.



Figuur 6 Een alfa Stirlingmotor, met twee zuigers, een as (donkergrijze cirkels), en een warme zijde (rood) en koude zijde (koud). Werking, met de klok mee: (linksboven) expansie van het gas, de zuiger aan de warme kant is maximaal gevuld; (rechtsboven) verdere expansie heeft plaatsgevonden tot het maximum, en de asbeweging laat de zuigers het gas nu naar de koude zijde stromen; (rechtsonder) het gas koelt af en wordt vervolgens naar de warme zuiger geduwd; (linksonder) het minimumvolume is bereikt, en door uitzetting wordt arbeid overgedragen aan de as [12]

- Onderhoud en levensduur. Aangezien deze machines bewegende delen bevatten evenals stromende soms corrosieve vloeistoffen en/of gassen, is vaker en uitgebreider onderhoud nodig, en is de verwachte levensduur duidelijk korter dan de 20 jaar of langer die geschat wordt voor TEG's.
- Milieueffect componenten. De werkvloeistoffen van ORC's en Kalinacyclus motor zijn doorgaans zeer schadelijk voor het milieu, waardoor adequate veiligheidsmaatregelen moeten worden genomen. TEG's hebben dit probleem niet. Wat aan het einde van de levensduur met de exotische materialen gedaan wordt is niet bekend.

- Geluidsproductie. TEG's zijn in principe geluidloos; alleen als actieve koeling gebruikt wordt zal een geringe geluidsproductie plaatsvinden. Vanwege de bewegende delen van de alternatieve technologieën is het geluidsniveau hierbij hoger. Voor de glastuinbouw is geluidsproductie alleen belangrijk als deze optreedt in het bijzijn van personeel.
- Schaalgrootte. TEG's kunnen zeer geschikt zijn voor energieopwekking op de μ W tot honderden watt-schaal. Een grotere schaal is in principe mogelijk door simpelweg meerdere modules te gebruiken. Systemeverliezen zullen wel een rol gaan spelen, en momenteel wordt de bovengrens ook beperkt door de productiecapaciteit van fabrikanten. Bovengenoemde alternatieve technologieën zijn geschikt voor ongeveer 1 kW (Stirlingmotor) of een nog hogere ondergrens, en kunnen opgeschaald worden tot zeker honderden kilowatts.
- Ervaring / volwassenheid. Elektriciteitsopwekking uit restwarmte op middelgrote of grote schaal door middel van genoemde technieken is al jarenlang bewezen in vele toepassingen, en de laatste jaren wordt ook ervaring opgedaan in de glastuinbouw. TEG-technologie is ook een bewezen technologie, maar voor andere toepassingen en op een andere schaal.

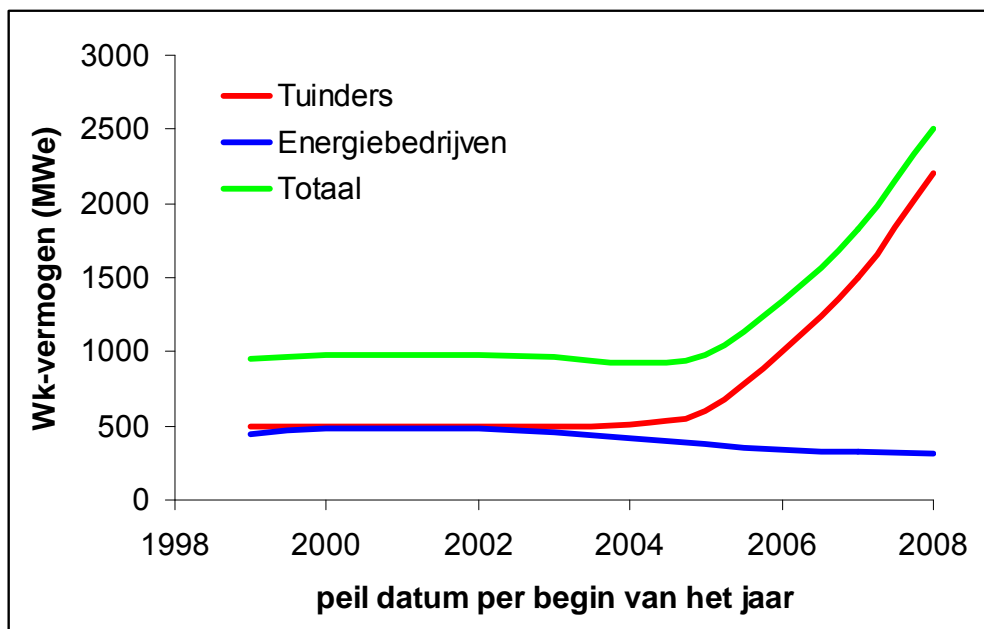
3 WARMTESYSTEMEN IN DE KAS

3.1 Inleiding

TEG's zetten warmte om in elektriciteit. Ter identificatie van mogelijke toepassingsgebieden in de glastuinbouw is een inventarisatie nodig van warmtesystemen in kassen. In dit hoofdstuk wordt deze inventarisatie gemaakt en wordt een korte beschrijving gegeven per systeem.

3.2 WKK

Een eerste warmtesysteem op een tuinbouwbedrijf is de warmtekrachtkoppeling (WKK). Het gebruik van warmtekrachtkoppeling in de glastuinbouw is fors toegenomen in de laatste jaren (zie Figuur 7). In 2009 bedroeg het in de glastuinbouw opgestelde WKK-vermogen ongeveer 3.000 MWe. Dit betekent een toename van zo'n 1.600 MWe in drie jaar. Een WKK zet brandstof om in elektriciteit, laagwaardige warmte en hoogwaardige warmte. Een deel van de energie gaat verloren via het rookgas.



Figuur 7 Geïnstalleerd WKK vermogen bij Nederlandse tuinders en energiebedrijven [13,14]

3.3 Buisverwarming

Een tweede warmtesysteem in de kas is de buisverwarming. Dit is een net van buizen waarin warm water stroomt waarmee Nederlandse kassen worden verwarmd. Voor dit systeem wordt vaak gekozen omdat het in het algemeen een goede verdeling van de warmte oplevert. Een tweede voordeel is dat met dergelijk systeem de temperatuur vrij nauwkeurig kan worden ingesteld. Er wordt zowel gebruik gemaakt van buisverwarming onderin het gewas als boven gewas. Tevens zijn er systemen waarbij de buizen in verticale richting kunnen worden verplaatst. De diameter van de buizen is meestal 53 mm en het aantal meters is erg afhankelijk van de teelt maar ligt meestal tussen de 1 en 2 meter per vierkante meter vloeroppervlak.



Figuur 8 Buisverwarming

3.4 Warmtebuffer

Een derde warmtesysteem in de kas is de warmtebuffers. Als warmtebuffer kunnen genoemd worden ondergrondse aquifers en watertanks. De volumes van dergelijke waterbuffers zijn sterk afhankelijk van het teeltoppervlak maar 100 m³ tot meer dan 300 m³ water per hectare glas is reëel [15].



Figuur 9 Warmtebuffer

3.5 Verlichting

Een vierde warmtesysteem in de kas is de verlichting. Lampen genereren natuurlijk in de eerste plaats licht, maar dit gaat altijd gepaard met de productie van een zekere hoeveelheid warmte.

Op dit moment is ongeveer 15% van de teelten belicht. De gemiddelde belichtingsintensiteit varieert sterk met het gewas evenals het aantal belichtingsuren. Meer en intensiever belichten zorgt steeds meer voor maatschappelijke weerstand. Daarom is afgesproken dat vanaf 2008 een donkerperiode van zes uur wordt gehanteerd. In deze periode wordt niet belicht of wordt het licht voor 95% afgeschermd. Afhankelijk van de teelt en het buitenklimaat wordt het gewas tot 18 à 20 uur belicht. Het bovenstaande geeft aan dat verlichting slecht

een beperkt aantal uren per dag beschikbaar is, dus ook de eventueel door TEG's te benutten afvalwarmte.



Figuur 10 Belichting van gewas in de glastuinbouw

4 TOEPASSING TEG'S BIJ WARMTESYSTEMEN

4.1 Selectiecriteria beste scenario

Een beschouwing van de theorie achter TEG's en de huidige state of the art (zie hoofdstuk 3) laat de indruk rijzen dat energieopwekking door TEG's op/aan een warmtesysteem in de kas vandaag de dag niet realistisch is. Om die reden is ervoor gekozen om niet voor alle in hoofdstuk 4 genoemde warmtesystemen een gedetailleerde haalbaarheidsevaluatie uit te voeren, maar slechts voor het warmtesysteem wat het meest geschikt is voor TEG-toepassing. Bovendien zal blijken dat slechts één systeem überhaupt potentie lijkt te hebben voor TEG-toepassingen, waardoor de anderen al bij voorbaat afvallen.

Welke criteria een rol spelen bij het evalueren van de technische en economische prestaties van energieopwekking door TEG's wordt in de volgende subparagrafen uitgelegd. In volgende paragrafen zullen met behulp van deze criteria de warmtesystemen in de kas worden geëvalueerd op geschiktheid voor TEG-toepassing.

4.1.1 Investeringskosten

Voor de economische haalbaarheid van de toepassing van TEG's in de glastuinbouw is natuurlijk de investering van belang, die gedaan dient te worden om het TEG-systeem (TEG's, koeling, elektronica et cetera) te installeren en onderhouden. Met name de (constante) kostprijs van TEG's speelt hierbij een rol, maar per warmtesysteem kan installatie van de TEG's en koeling uiteenlopen qua vereiste aanpassingen, materialen en randapparatuur, en daarmee de bijbehorende kosten.

4.1.2 Temperatuur warmtebron

De temperatuur van de warmtebron speelt een zeer belangrijke rol (zie formule 2 en 3 in paragraaf 3.2). Het temperatuursverschil met de koudebron (koeltemperatuur) dient zo hoog mogelijk te zijn om een zo goed mogelijke efficiëntie te halen. Zoals in feite ook voor de alle andere toepassingen geldt, biedt een warmtesysteem met hogere temperaturen meer mogelijkheden voor TEG-toepassing.

4.1.3 **Temperatuur koudebron**

De temperatuur van de koudebron speelt ook een belangrijke rol (zie formule 2 en 3 in paragraaf 3.2). Bij sommige warmtesystemen is het makkelijk goede lucht- of waterkoeling te gebruiken dan bij andere.

4.1.4 **Beschikbaarheid warmte in de tijd**

De beschikbaarheid van de warmte in de tijd is essentieel voor het rendement op de investering bij toepassing van TEG in de glastuinbouw. Een WKK draait bijvoorbeeld niet continu, lampen staan vaak niet aan, et cetera. De elektriciteitsproductie en bijbehorende inkomsten zijn daar rechtstreeks van afhankelijk.

4.1.5 **Aansluitbaarheid op het elektriciteitsnet**

Voordat door een TEG opwekte energie gebruikt kan worden dient het te worden omgezet in een nuttige vorm. De technische en economische haalbaarheid daarvan hoort bij de haalbaarheidsbepalende factoren. Als het niet mogelijk blijkt de elektriciteit aan het net te leveren of door de tuinder zelf te gebruiken dan zal dat toepassing van TEG's bij voorbaat uitsluiten. Het is daarom nuttig om zorgvuldig uit te zoeken wat de mogelijkheden zijn.

Een thermo-elektrische generator gedraagt zich in elektrisch opzicht als een ideale spanningsbron met daarmee in serie een inwendige weerstand. Het elektrisch vermogen dat uit een TEG gewonnen kan worden is maximaal wanneer deze wordt belast met een weerstand met een gelijke waarde aan de inwendige weerstand van de TEG. De inwendige weerstand van de TEG is een eigenschap van het onderdeel die tamelijk constant is over het temperatuurbereik. Om het elektrisch vermogen van een TEG bruikbaar te maken voor andere toepassingen, is in veel gevallen een omzetter noodzakelijk.

Als de omzetter het gedrag van een weerstand aan de ingang emuleert, wordt het beschikbare vermogen uit de TEG optimaal benut. Dit maakt het ontwerp van een converter niet bijzonder complex. De waarde van de geëmuleerde weerstand kan worden ingesteld op de voor de aangesloten TEG vereiste waarde. De uitgangsspanning van de omzetter kan datgene zijn wat de gebruiker ervan verlangt (zowel AC als DC van elke gewenste spanning), de huidige elektronica kent een grote diversiteit aan inverters (omzetters van DC naar AC) en DC/DC converters. Deze hebben een efficiency van 90% of beter. Momenteel ligt de prijs van zonne-energie inverters rond circa EUR 0,60 tot EUR 1,-- per Watt. Een

TEG- omzetter is elektronisch ongeveer even complex, waardoor bij voldoende productieaantallen een kostprijs in de zelfde orde van grootte valt te verwachten.

Bij een TEG bepaalt het aangelegde temperatuurverschil het beschikbare elektrische vermogen. Dit temperatuurverschil is in de meeste toepassingen niet aan te passen aan de elektrische vermogensbehoefte van de aangesloten last, en in de meeste gevallen niet constant. TEG-prototypes met enkele kilowatts elektrisch vermogen zijn in de praktijk gedemonstreerd. Dit maakt de toe- en inpasbaarheid van een TEG vergelijkbaar met die van een kleine zonne-installatie, hierbij is ook het aanbod aan oncontroleerbare fluctuaties onderhevig. Bij een elektrische vermogensbehoefte die hoger is dan de TEG kan leveren, dient een andere bron (het elektriciteitsnet of een accu) bij te springen. Andersom, als de vermogensbehoefte bij de gebruiker lager is dan wat de TEG kan leveren, kan worden teruggeleverd aan het net, of een accu worden opgeladen.

4.1.6 Levensduur

Een voordeel van TEG's is de lange technische levensduur die doorgaans gehaald kan worden. Deze levensduur hangt natuurlijk wel af van de bedrijfscondities voor de TEG's, zoals temperatuur, vochtigheid en corrosieve verbindingen.

4.1.7 Overzicht criteria en weegfactoren

De hiervoor beschreven criteria zijn opgenomen in Tabel 2. Een weegfactor wordt gebruikt om het belang van ieder criterium weer te geven. De weegfactor is vastgesteld op basis van discussies met deskundigen en literatuuronderzoek.

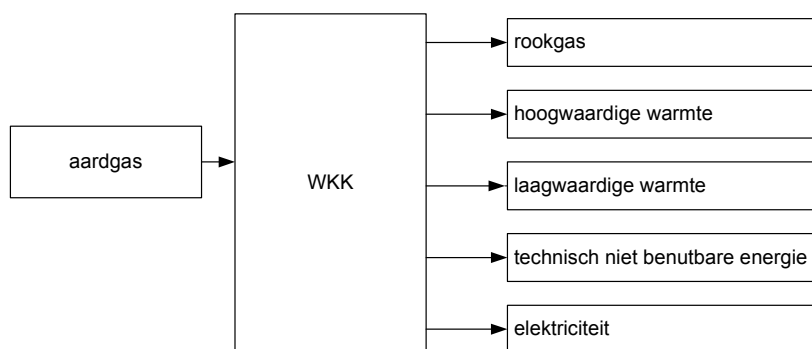
Tabel 2 Beoordelingscriteria koppeling TEG's aan warmtesystemen

criteria	weegfactor*
kostprijs	5
temperatuur warmtebron	4
temperatuur koudebron / koeling	3
beschikbaarheid warmte in de tijd	3
efficiëntie aansluiting op net	2
levensduur	3

* De weegfactor (1-5) geeft het belang van het criteria aan.

4.2 TEG bij warmtekrachtkoppeling

Bij gebruik van WKK komt naar elektriciteit zowel hoogwaardige als laagwaardige warmte vrij (Figuur 11). De temperatuur van de hoogwaardige warmte kan tot 450 °C bedragen en bij laagwaardige warmte moet gedacht worden aan 45 °C. Temperaturen die optreden in een WKK worden in detail gepresenteerd in hoofdstuk 6.



Figuur 11 Omzetting van aardgas in warmte en elektriciteit met behulp van warmtekrachtkoppeling (WKK)

In Tabel 3 staat de beoordeling van de koppeling van TEG aan WKK aan de hand van de criteria in Tabel 2. Met name vanwege de grote temperatuurverschillen die beschikbaar zijn in een WKK lijkt dit het meest geschikte warmtesysteem.

Tabel 3 Beoordeling koppeling van thermo elektrische generatoren (TEG) aan warmtekrachtkoppeling (WKK)

criteria	waardering*
investering	++
temperatuur warmtebron	++
temperatuur koudebron / koeling	+
beschikbaarheid warmte in de tijd	+
levensduur	o

* ++ = zeer positief, + = positief, o = neutraal, - = negatief, -- = zeer negatief

4.3 Buisverwarming

De warmteafgifte hangt af van de temperatuur van de buis, de diameter van de buis en van de temperatuur in de kas maar grofweg ligt deze tussen de 50 en 100 W m⁻² kasoppervlak. De buistemperatuur is gemiddeld 60 °C. De trend is om naar steeds lagere buistemperaturen te gaan waarbij gedacht moet worden aan 40 °C. In Tabel 4 staat de beoordeling van de koppeling van TEG aan buisverwarming aan de hand van de criteria in Tabel 2. De temperatuur van buisverwarming is veel te laag om het een interessante plek voor TEG-toepassing te kunnen laten zijn.

Tabel 4 Beoordeling koppeling van thermo elektrische generatoren (TEG) aan buisverwarming

criteria	waardering*
investering	--
temperatuur warmtebron	--
temperatuur koudebron / koeling	-
beschikbaarheid warmte in de tijd	+
levensduur	o

* ++ = zeer positief, + = positief, o = neutraal, - negatief, -- = zeer negatief

4.4 Warmtebuffers

De temperatuur van gebruikte warmtebuffers in de glastuinbouw is 50-100°C. In Tabel 5 staat de beoordeling van de koppeling van TEG aan warmtebuffers aan de hand van de criteria in Tabel 2. Hoewel hogere temperaturen beschikbaar zijn dan bij buisverwarming, geldt ook hierbij dat het temperatuursverschil te laag is om TEG's succesvol bij toe te passen voor energie-opwekking in de kas.

Tabel 5 Beoordeling koppeling van thermo elektrische generatoren (TEG) aan warmtebuffers

criteria	waardering*
investering	-
temperatuur warmtebron	--
temperatuur koudebron / koeling	-
beschikbaarheid warmte in de tijd	o
levensduur	+

* ++ = zeer positief, + = positief, o = neutraal, - negatief, -- = zeer negatief

4.5 Verlichting

Bij kasverlichting wordt meer dan 90% van de opgenomen elektrische energie omgezet in warmte [16]. Dit geldt niet alleen voor gasontladingslampen. Ook bij LED- systemen wordt een hoeveelheid opgenomen energie omgezet in warmte. De temperatuur die bereikt kan worden in de buurt van de lampen bedraagt ongeveer 70 °C. Bij intensieve belichting wordt tot 100 W m⁻² bijbelicht. Het aantal belichtingsuren kan 2.000 - 3.000 uur per jaar bedragen. De combinatie van lage temperatuur en beperkte beschikbaarheid zorgt ervoor dat TEG-toepassing daar niet waarschijnlijk is. In Tabel 6 staat de beoordeling van de koppeling van TEG aan verlichting aan de hand van de criteria in Tabel 2.

Tabel 6 Beoordeling koppeling van thermo-elektrische generatoren (TEG) aan verlichting

criteria	waardering*
investering	-
temperatuur warmtebron	++
temperatuur koudebron / koeling	o
beschikbaarheid warmte in de tijd	o
levensduur	+

* ++ = zeer positief, + = positief, o = neutraal, - negatief, -- = zeer negatief

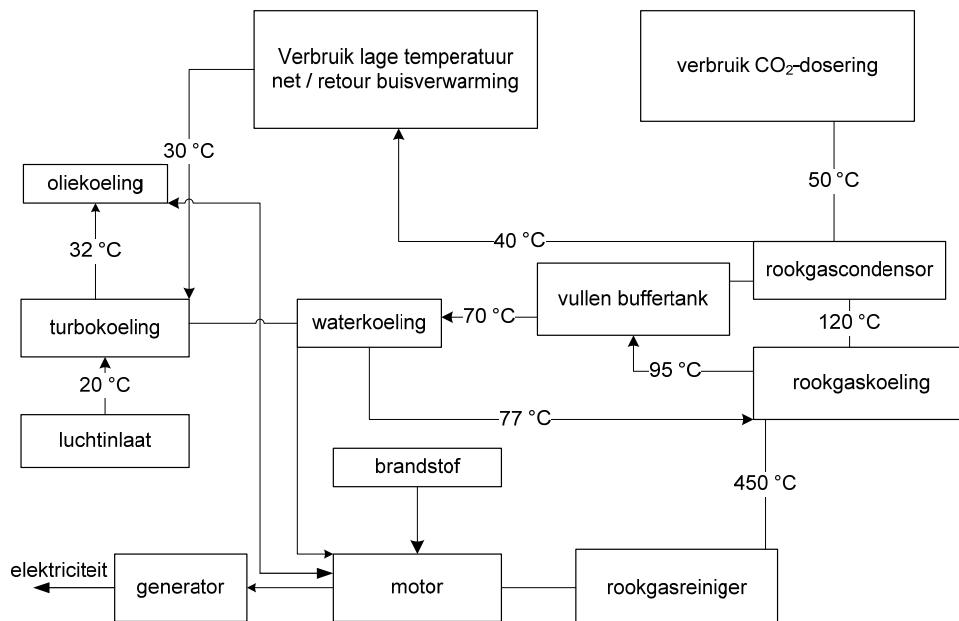
4.6 Conclusie

Voornamelijk vanwege de te lage temperaturen / temperatuurverschillen bij de andere systemen lijkt WKK het enige warmtesysteem waarbij TEG-toepassing levensvatbaar is. In een WKK zijn wel de hogere temperaturen te vinden die nodig zijn voor een efficiënte (en dus meer haalbare) elektriciteitsopwekking. Dit wil niet overigens zeggen dat deze hoge temperatuur zonder meer te benutten is. Een WKK is een thermodynamisch vergaand geoptimaliseerd apparaat, zodat aanpassingen, nodig voor TEG-integratie, waarschijnlijk niet eenvoudig zullen zijn en/of voor een verlaging van het WKK-rendement zullen zorgen. In hoofdstuk 6 wordt daarom de haalbaarheid van TEG-toepassing in WKK's onderzocht.

5 KOPPELING TEGS AAN WKK'S

5.1 Inleiding

Uit de beoordeling uitgezet in Tabel 3 t/m Tabel 6 blijkt dat de koppeling van TEG's aan warmtekrachtkoppeling (WKK) het meest positief is ingeschat. Deze koppeling wordt daarom nader uitgewerkt in dit hoofdstuk. WKK's – zeker in de hogere vermogensrange – worden ontworpen op maximaal rendement. Indicatieve rendementen hierbij zijn circa 43% elektrisch, 44% thermisch (hoogwaardige warmte, 90 °C), en 7-14% laagwaardige warmte (45 °C). WKK's zijn in de afgelopen jaren vooral ontwikkeld op zo hoog mogelijk elektrisch rendement daar dit een hogere financiële vergoeding geeft. Echter, verder opvoeren van het elektrisch rendement zal beperkt mogelijk zijn in verband met het theoretisch maximum voor zuigermotoren wat mede gegeven wordt door thermodynamische wetten. Naast de hoog waardige warmte van 90 °C worden er ook temperaturen van 450 °C gehaald direct na de rookgasreiniger (Zie Figuur 12). Door juist hier gebruik te maken van TEG is het wellicht mogelijk om efficiënt deze warmte om te zetten in elektriciteit. De bedrijfstijd van WKK in de glastuinbouw bedraagt gemiddeld 3500 uur per jaar.



Figuur 12 Overzicht van temperaturen bij warmtekrachtkoppeling (WKK)

5.2 Technische implementatie

Bij koppeling van TEG's aan warmtekrachtkoppeling is het logisch om gebruik te maken van de hoogste temperaturen. Deze treden op direct naar de rookgasreiniger (Figuur 12). Om te kunnen koelen kan gebruik worden gemaakt van koelwater zoals ook gebruikt bij de toepassing van TEG voor terugwinning van elektriciteit uit een biomassa droger [17]. Een probleem kan zijn dat de temperatuur van 450 °C te hoog is, aangezien veel van de huidige commerciële TEG-modules niet geschikt zijn voor langdurig gebruik bij hogere temperaturen dan 250 à 300 graden. Er wordt in deze globale studie echter aangenomen dat dit geen problemen op zal leveren; het is waarschijnlijk relatief eenvoudig om zonder veel energieverlies met behulp van een warmtewisselaar een oppervlak met een lagere temperatuur te creëren.

5.3 Economische verkenning

Hier volgt een globale economische verkenning van de haalbaarheid van TEG-toepassing in de glastuinbouw. Aangezien de prijs van TEG's natuurlijk een cruciale factor hierbij is, is contact opgenomen met een achttal fabrikanten van TEG's (zie Figuur 13). Telefonisch en per e-mail is met hen gecommuniceerd over specificaties, technische mogelijkheden en prijzen.



Figuur 13 Geraadpleegde TEG-fabrikanten. Taihuaxing Thermoelectric is een merknaam van Thermonamic Electronics

In onderstaande Tabel 7 staat een overzicht van commercieel beschikbare TEG-modules waar voldoende informatie over verzameld kon worden om te evalueren. Op basis van beschikbare informatie is getracht het meest prijsefficiënte model van elke fabrikant te kiezen, dat geschikt is voor de beoogde omstandigheden.

Tabel 7 TEG-typen en enkele specificaties

fabrikant	typeaanduiding	oppervlakte TEG (cm ²)	vermogen (W)	prijs per TEG (EUR) ^a
Hi-Z	HZ-20	39	13	152
Tellurex	Z-Max® G1-1.4 - 219-1.14	29	5,7	57
Thermonamic Electronics	TEP1-12656-0.6	31	15	16 ^b
ThermalForce.de	TEG 199-150-2	16	10	69
Nextreme	eTEG UPF40	0,13	0,24	11
QuickCool	QCG-127-2.0-1.3	25	7,9	75
Melcor	HT6-12-40	16	4,4	20

^a Prijzen in juni 2009. Sommige prijzen werden opgegeven in dollars; deze zijn met de toenmalige dollarkoers van 1 \$ = EUR 0,76 omgerekend. ^b Hoewel geen concrete reden aangegeven kan worden, twijfelen de auteurs op basis van het geheel aan informatie van en over de fabrikant aan de betrouwbaarheid van deze prijs.

Op basis van bovenstaande informatie is een globale economische verkenning gemaakt. Alvorens daadwerkelijk te kunnen gaan rekenen worden de uitgangspunten en aannames op een rijtje gezet (Tabel 8).

Tabel 8 Uitgangspunten en aannames voor economische berekening

parameter	waarde(n)	parameter	waarde(n)
P WKK	1,5 MW _e	prijs TEG	1,10 EUR / W
η_e WKK	40%	prijs elektriciteit	0,08 EUR / kWh
η_{th} WKK	50%	prijs randapparatuur	2 EUR / W
η_{TEG}	5%, 10%	prijs onderhoud	5% in totaal
$\eta_{converter}$	90%	prijs minder warmte	0 EUR
draaiuren WKK	3800, 6500 / jaar	levensduur TEG	> 10 jaar

Aanvullende uitleg bij enkele van bovenstaande punten:

- η_{TEG} : 5% is een optimistisch maar niet onhaalbaar rendement met de huidige stand van de techniek. Puur ter vergelijking is ook gerekend met een hypothetische 10%, om te kijken hoe toekomstige ontwikkelingen de economische haalbaarheid beïnvloeden
- draaiuren WKK: natuurlijk geldt dat meer draaiuren meer restwarmte oplevert en dus meer TEG-elektriciteit die verkocht of gebruikt kan worden. Er is hier uitgegaan van twee scenario's, namelijk middelmatige belasting, en een groot aantal draaiuren
- prijs TEG: hierbij wordt twee uitersten gehanteerd, te weten een optimistische EUR 1 per watt, en een conservatieve EUR 10 per watt
- prijs randapparatuur: het gaat hierbij onder andere om alle bij koeling en elektriciteitsconversie benodigde apparatuur
- prijs onderhoud: dit is een ruwe schatting op basis van fabrikantinformatie
- prijs minder warmte: een TEG zet warmte om in elektriciteit. Deze warmte, plus het verlies bij de omzetting, moet in geval van warmtebehoefte in de kas aangevuld worden. Dit warmteverlies zal bij goede implementatie van de technologie waarschijnlijk echter niet hoog zijn, en de kosten hiervan zijn voor deze beschouwing op 0 gesteld.

Met de uitgangspunten van Tabel 7 en Tabel 8 kan globaal berekend worden wat de economische haalbaarheid van TEG-toepassing is, in acht verschillende scenario's. Per jaar wordt berekend hoeveel vermogen aan elektriciteit kan worden opgewekt door TEGs, en daarmee de hoeveelheid kWh per jaar. Dit komt overeen met een bepaald bedrag, wat wordt vergeleken met de investerings- en onderhoudskosten.

Tabel 9 Globale economische haalbaarheidsresultaten

draaiuren WKK (uur)	prijs per TEG (EUR)	η_{TEG} (-)	terugverdientijd (jaar)	vermogen TEGs (kW)	rendement WKK (pp)*
6500	10	5%	27	94	+ 2,5
6500	1	5%	7	94	+ 2,5
6500	10	10%	16	188	+ 5,0
6500	1	10%	6	188	+ 5,0
3800	10	5%	46	94	+ 2,5
3800	1	5%	12	94	+ 2,5
3800	10	10%	27	188	+ 5,0
3800	1	10%	10	188	+ 5,0

*Verhoging elektrisch rendement bij TEG-gebruik, in procentpunt.

Het moet nogmaals gezegd worden dat deze berekening globaal is en in feite uitgaat van een ideale situatie (“best case scenario”) met betrekking tot de volgende aspecten:

- geen rentekosten bij investering
- geen vervangingskosten door TEG-gebruik verloren warmte (zie Tabel 8)
- TEG's functioneren in de WKK bij hun optimum temperatuur en zijn daar geschikt voor
- alle TEG's gebruiken alle warmte optimaal, er zijn dus geen systeemverliezen.

Met name de laatste aanname is een grote. Ter illustratie, bij een ruw gemiddelde van $0,4 \text{ W/cm}^2$ komt 188 kW TEG-vermogen overeen met 47 m^2 . Het optimaal voorzien van een dergelijk oppervlak aan TEG's van warmte, waarbij alle TEG's werken bij hun de optimale temperatuur, de koeling overal optimaal functioneert, en tenslotte geen restwarmte verloren gaat, is onmogelijk. Een literatuurstudie die dergelijke aspecten nauwkeuriger heeft bestudeerd [18] komt bij verschillende scenario's voor TEG-toepassing in een WKK uit op 0,3 tot 0,5 procentpunt verhoging van WKK rendement, tegenover de hier berekende 2,5 tot 5 procentpunt verhoging.

Zelfs met de blijkbaar redelijk grote aannames die gedaan zijn, blijkt dat TEG technologie voorlopig nog niet haalbaar is. Uit Tabel 9 blijkt dat bij 3800 WKK-draaiuren de terugverdientijd in alle gevallen te lang is. Bij 6500 draaiuren zijn alleen de scenario's enigszins interessant waarbij een TEG EUR 1 per watt kost. Zelfs in die situatie, die mogelijk bij massaproductie en verdere ontwikkelingen binnen enkele jaren realiteit kan worden, is de terugverdientijd nog aan de lange kant, namelijk 6 tot 7 jaar – en dat is onder ideale condities (zie vorige paragrafen). Er kan dus gesteld worden dat op het moment van schrijven TEG-toepassing in de glastuinbouw duidelijk niet haalbaar is. Bij significante prestatieverbetering en drastische verlaging van prijzen is de toepassing van TEG in de glastuinbouw wel denkbaar.

6 PERSPECTIEVEN

Uit de voorgaande hoofdstukken blijkt dat TEG-toepassing in de glastuinbouw vooralsnog economisch niet haalbaar is. De vraag rijst nu welke factoren een rol spelen in de haalbaarheid van TEG-toepassing, en vooral of en tot welk niveau deze kunnen verbeteren in de toekomst. Met deze kennis kan in de toekomst eenvoudig worden gekozen wanneer TEG-toepassing opnieuw wordt beschouwd en overwogen.

Hieronder volgt een lijst van factoren die de economische haalbaarheid van TEG-toepassing beïnvloeden, opgedeeld in samenstellende subfactoren. Indien bekend is per subfactor aangegeven of en hoe verbetering mogelijk wordt geacht.

- Prijs (per watt)
 - de kostprijs van de TEG zelf. Door massaproductie, nieuwe productietechnieken en/of het vinden van goedkopere TEG-materialen is hier wellicht een sterke reductie mogelijk
 - koeling, accessoires
 - onderhoud; weinig kosten, en weinig verbetering nodig en mogelijk.
- TEG-vermogen (per euro)
 - efficiëntie, met name afhankelijk van de ZT-waarde.
 - TEG systeem verbeteringen. Hier valt enkele tientallen procenten te winnen [19]
 - groter temperatuurschil ΔT . Dit is (afgezien van temperatuurtolerantie van de materialen) een externe factor
 - grotere T bij toepassing (idem).
- Levensduur. Theoretisch, naar verwachting is deze al zodanig groot dat weinig verbetering te verwachten is.
- Elektriteitsprijs (een externe factor)
 - direct
 - gesubsidieerd via SDE of andere subsidies.

Een zeer belangrijke factor is de efficiëntie van TEG, waarvoor doorgaans de ZT-waarde als maatstaf wordt gehanteerd. Deze ZT-waarden zijn de afgelopen decennia verbeterd door gebruik van nieuwe materialen. Op grote schaal commercieel te produceren TEGs met ZT-waarden (gemiddeld van p- en n-type materiaal) van zeker 2 en liefst 3 tot 4 nodig, bij een prijsniveau aan de ondergrens van het huidige spectrum. Of en zo ja wanneer dat gehaald wordt, is de vraag; er zijn veel ontwikkelingen gaande, maar een ZT-waarde van meer dan 2 (op grote schaal commercieel beschikbaar) wordt als zeer ambitieus gezien en wordt de eerstvolgende jaren niet verwacht.

Voor een rendabele toepassing van TEG zal ook de prijsontwikkeling van elektriciteit en gas een belangrijke rol spelen. Wereldwijd zal de vraag naar energie toenemen waardoor de prijs van energie zal stijgen. Deze ontwikkeling maakt toepassing van TEG voor de glastuinbouw eerder rendabel; vanwege de lage onderhoudskosten is de aanschafprijs de enige grote kostenpost en wordt de terugverdientijd bij benadering omgekeerd evenredig met de elektriciteitsprijs. Bij een hogere elektriciteitsprijs worden alternatieven (ORC, Kalinacyclus et cetera) echter evenveel interessanter. Deze technologieën hebben al een technologische en economische voorsprong, en zijn beter geschikt voor grote schaal. Naast ontwikkeling in de gas- en elektriciteitsprijs is nog steeds technologische ontwikkeling nodig.

Tenslotte is de prijs van TEG's natuurlijk een zeer belangrijke factor. Zelfs als de efficiëntie relatief weinig verbetert, dan kan TEG-technologie alsnog interessant worden bij een voldoende lage prijs van TEG's. Daarvoor is naar schatting een prijs van onder de 1 EUR/watt nodig.

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 Conclusies

Uit deze haalbaarheidsstudie kan worden geconcludeerd dat het gebruik van TEG voor omzetting warmte in elektriciteit binnen de glastuinbouw nu en in de nabije toekomst niet rendabel is. De kosten voor TEG elementen is nog te hoog en het rendement van de omzetting nog te laag. De voordelen van TEG zoals het geruisloos kunnen werken, de lange technische levensduur en de lage kosten voor onderhoud lijken niet zwaarwegend voor de glastuinbouw. Geruisloos gebruik is met name belangrijk in bijvoorbeeld militaire toepassingen terwijl lange levensduur en betrouwbaarheid als argument worden gebruikt voor toepassing van TEG in de ruimtevaart. Belangrijk is verder het begrip schaalgrootte. Bij vermogens op de schaal van tientallen en honderden kilowatts zijn mechanische omzettingen van warmte in elektriciteit zoals bijvoorbeeld bij gebruik van organische Rankine-cyclus (ORC) in het voordeel. Een belangrijk nadeel van mechanische omzetting zijn slijtage en uitval, en de bijbehorende kosten voor onderhoud.

Alternatieve technologieën lijken als geheel beschouwd beter geschikt voor opwekking op honderd(en) kilowattschaal van elektriciteit uit restwarmte bij de glastuinbouw. De voornaamste redenen hiervoor zijn kosten, efficiëntie, (ontbrekende) ervaringen met TEG-technologie en schaalgrootte.

Uit dit verkennend onderzoek blijkt dat temperaturen een belangrijke rol spelen. Te lage temperaturen zijn de belangrijkste redenen waarom TEG niet efficiënt kan worden toegepast bij buisverwarming of warmtebuffers in de glastuinbouw. Voor toepassing van TEG in de nabijheid van verlichting geldt het argument dat deze koppeling technisch gecompliceerd is omdat huidige ontwerpen juist uitgaan van hoge temperaturen. Vermoedelijk is een koppeling van TEG aan warmtekrachtkoppeling het eerst rendabel. Hier treden voldoende hoge temperaturen op en worden aanzienlijke vermogens gehaald. Met name de lange technische levensduur van TEG en het te verwachte minimum aan onderhoud bieden belangrijke voordelen boven mechanische omzettingen zoals ORC. Echter, vanwege te lage efficiëntie en te hoge prijs per watt heeft TEG-technologie momenteel een te lange terugverdientijd om toegepast te worden in de glastuinbouw.

7.2 Aanbevelingen

Deze haalbaarheidsstudie is gebaseerd op de internationale literatuur en gesprekken met deskundigen. Er dient wel te worden nagegaan of de daarbij verkregen TEG-rendementen

daadwerkelijk gehaald kunnen worden in de praktijk, op grote schaal en onder werkelijke omstandigheden. Uit dergelijke praktijkproeven kan tevens worden nagegaan of TEG-elementen robuust zijn en hoe deze zich gedragen bij kortdurende overbelasting. De aanbeveling wordt hier gedaan om dat pas te doen bij gunstige ZT en kostenontwikkelingen, zoals beschreven in hoofdstuk 7.

Een aantal toepassingmogelijkheden van TEG zijn niet behandeld in dit rapport omdat deze mogelijk pas verder in de toekomst relevant worden. Een niet direct voor de hand liggende toepassing is het koppelen van TEGs aan warmtesystemen om hiermee draadloze sensoren van energie te voorzien. Deze sensoren worden steeds meer toegepast in de glastuinbouw, bijvoorbeeld om ruimtelijke temperatuur distributies te bepalen. Dergelijke sensoren worden nu nog met behulp van batterijen van elektriciteit voorzien. Mogelijk dat warmtesystemen zoals de buisverwarming in de kas mogelijkheden bieden om de sensoren van elektriciteit te voorzien. Juist dan is het geruisloos kunnen omzetten wel van groot voordeel in verband met aanwezig personeel in de kas.

Een ander niet direct voor de hand liggende mogelijkheid is het koppelen van TEG's aan het 'Elkas principe'. Bij dit principe wordt met behulp van een parabolisch gevormd dak van de kas de zonnewarmte geconcentreerd. Hierbij worden hoge temperaturen bereikt. Deze hoogwaardige warmte kan eventueel met behulp van TEG's worden omgezet in elektriciteit.

Een punt van aandacht is de ontwikkeling van WKK. Door toekomstige ontwikkelingen zoals het beschikbaar komen van goedkope en efficiënte TEG's kan het interessant zijn om prestaties van huidige WKK installaties te verbeteren door middel van koppeling aan deze TEG's. Echter, de technische levensduur van WKK is beperkt, namelijk zo'n 10 tot 15 jaar. Verder zijn er ook een aantal ontwikkelingen gaande in energieopwekking (bijvoorbeeld ontwikkelingen met betrekking tot brandstofcellen) die gezamenlijk de vraag doen rijzen of WKKs over één of twee decennia nog wel de grote rol spelen in de glastuinbouw die ze nu spelen. Voor grote afnemers zoals de Nederlandse glastuinbouw is het daarom ook aan te bevelen om de ontwikkelingen van nieuwe -meer efficiënte- WKK's en ook toekomstige energiesystemen te volgen en zo mogelijk te stimuleren, naast, of wellicht in plaats van, het efficiënter maken van nu in bedrijf zijnde WKK's. Integratie, efficiëntie en kosten van technologieën is dan beter. Dat neemt niet weg dat gezocht dient te blijven worden naar aan WKK energieopwekkende en -besparende technologieën, als die zich binnen afzienbare tijd (bijvoorbeeld vijf jaar) terugverdienen, of waar een groot praktisch of milieuvoordeel mee gehaald kan worden.

REFERENTIES

- 1 Mulder, S; Cochijs, T. "Glastuinbouw Maatschappelijk Verantwoord Ondernemen 2004-2005", 57, LTO Nederland, 2006.
- 2 Bell, L. E., *Science*, 321, 1457-1462, 2008.
- 3 Snyder, G. J. *The Electrochemical Society Interface*, Fall 2008, 2008.
- 4 Crane, D. T.; Bell, L. E. *Proceedings of the 25th International Conference on Thermoelectrics*, 11-16, 2006.
- 5 Van de Velden, N.; Smit, P. "Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2007", 2008.
- 6 Brazier, K.; retrieved from http://en.wikipedia.org/wiki/File:Thermoelectric_Generator_Diagram.svg, on July 2, 2009. Reproduced here under the Creative Common Attribution ShareAlike 3.0 license; see <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/> .
- 7 Novikov, I. I. *Journal Nuclear Energy II*, 7, 125 - 128, 1958. Translated from *Atomnaya Energiya*, 3, 409, 1957.
- 8 Chambadal, P. "Les centrales nucléaires", Armand Colin, Paris, France, 4, 1-58, 1957.
- 9 Vining, C. B. "The Limited Role for Thermoelectrics in the Climate Crisis", Solutions Summit panel on Nanotechnology and New Materials, May 2008.
- 10 Van Loo, S.; Koppejan, J. "The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing", Earthscan Publ., 2007.
- 11 Vining, C. B. *Nature materials* 8, 83-85, 2009.
- 12 Wheeler, R.; retrieved from http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine, on July 2, 2009. Reproduced here under the Creative Common Attribution ShareAlike 3.0 license; see <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/> .
- 13 Cogen Projects (www.cogenprojects.com).

- 14 Lei (www.lei.wur.nl).
- 15 Smit, P. X., van de Velden, N. J. A. "Energiebenutting warmtekrachtkoppeling in de Nederlandse glastuinbouw". LEI, 2008.
- 16 Tantau, H. J. *Acta Horticulturae* 418,177-188, 1997.
- 17 Maneewan, S., Chindaruksa, S. *Journal of electronic materials* 38 (7), 2009.
- 18 Chen, M. "Design, modeling and utilization of thermoelectrical materials and devices in energy systems" (PhD thesis), Department of Energy Technology, Aalborg University, 2009.
- 19 Verdere prestatieverhoging kan bereikt worden door verbeteringen in het thermoelectrische systeem als geheel. Het gebruik van 'heat pipes' en systemen met vloeistoffen met hoge thermische geleiding, alsook ontwerpoptimalisaties voor specifieke systemen, hebben prestatieverbeteringen laten zien van tot 10%, en het potentieel bestaat voor nog eens 20%. Zie verder: Bell, L. E., "Prospects for Broadened Use of Thermoelectrics in Automotive Vehicles," Next Generation Thermal Management Materials and Systems Conference, Irving, Texas, 2002.