

Auteur

M.D. (Michiel) aan de Stegge, MSc, adviseur DWA

PVT-panelen combineren met water/water warmtepomp biedt perspectief

In dit artikel vergelijken we alternatieve energieconcepten met PVT (PhotoVoltaicThermic)-panelen met meer gangbare energieconcepten zonder PVT-panelen. Het mogelijke voordeel van een PVT-paneel is niet zozeer de hogere energieopbrengst door gecombineerde elektra- en warmteproductie, maar de koppeling met een water/water-warmtepomp. PVT-concepten vergen een hogere investering dan een lucht/water-warmtepomp met PV-panelen, maar realiseren een lager elektriciteitsverbruik van de warmtepomp en minder CO₂-uitstoot. Bovendien kunnen met PVT-concepten veel voorkomende problemen van een lucht/water-warmtepomp worden vermeden. Gecombineerd met een WKO-systeem bieden PVT-panelen de meeste voordelen.

Met de uitfasering van aardgas is warmtepomp-techniek sterk in opkomst. Vaak valt de keuze op een lucht/water (lu/wa) warmtepomp, vanwege de lage investering. Deze heeft echter bijeffecten zoals geluidsproductie, ruimtelijke inpassingsproblematiek van de buitenunit, afvalwarmteproductie en is (vaak) visueel onaantrekkelijk. Een water/water (wa/wa) warmtepomp kent deze nadelen in mindere mate, maar vereist wel een warmtebron (vaak wordt de bodem gebruikt), die vaak veel duurder is in aanleg, bij aanleg de tuin overhoop haalt en soms is er geen toegang tot de bodem.

Dit onderzoek betreft fotonvoltaïsche-thermische (PVT)-panelen van het merk Triple Solar, die als bron voor de warmtepomp gebruikt kunnen worden. Met inachtneming van bovenstaande zijn verschillende energieconcepten geanalyseerd om het potentieel van PVT-panelen en de meerwaarde van inzet van PVT-panelen aan te tonen.



Praktijkonderzoek naar thermische opbrengst van het Triple Solar PVT-paneel

Het Triple Solar PVT-paneel bestaat uit een fotonvoltaïsch (PV)-paneel waarop aan de onderzijde een warmtewisselaar is bevestigd met een lijm laag en is schakelbaar, zodat het dakoppervlak volledig kan worden benut en randverliezen worden beperkt (zie figuur 1).

In 2017 is door TNO onderzoek gedaan naar de thermische opbrengsten van Triple Solar PVT-panelen, om zo een formule op te kunnen stellen voor de thermische opbrengst [1]. Voor dit onderzoek en voor de verwerking van de meetgegevens is de Quasi-Dynamische Testmethode (QDT-methode) volgens EN-12975-2 toegepast. Deze methode is gericht op buitenmetingen aan de zogeheten 'onafgedekte collectoren'; collectoren zonder omkapping die als zonnecollector zowel als warmtewisselaar kunnen functioneren. Voor het onderzoek van TNO zijn metingen verricht in een testopstelling waarin PVT-panelen met een oppervlak van 5 m² werden gekoppeld aan een wa/wa-warmtepomp. Gedurende een periode in mei 2017 werden metingen gedaan onder verschillende

weersomstandigheden: zowel 's nachts als overdag, bij bewolkt en onbewolkt weer en met meer en minder wind. De collectorkarakteristieken van het Triple Solar PVT-paneel zijn bepaald afhankelijk van het totaal aan zoninstraling op het collectorvlak, de omgevingstemperatuur, de windsnelheid, de hoek van de stralingsinval op basis van de bundel en diffuse verdeling en de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de collector.

Figuur 1: Triple Solar PVT-panelen.



PVT als lu/wa-warmtewisselaar

Uit de technische analyse van het TNO-onderzoek blijkt dat het thermisch functioneren van het Triple Solar PVT-paneel meer overeenkomt met een lu/wa-warmtewisselaar dan een zonnecollector die zoninstraling vangt. Het gedrag wijkt dus sterk af van een vacuümbuis collector, die ontworpen is om zo veel mogelijk hoogwaardige warmte te oogsten bij lage buitentemperaturen. Alleen bij windsnelheden onder 0,5 m/s en bij intredetemperaturen die onder de buitentemperatuur liggen, kan het Triple Solar PVT-paneel zonne-energie invangen [1]. De temperatuur van de geproduceerde warmte is sterk afhankelijk van de buitentemperatuur. Dit lijkt dus op de werking van een droge koeler, met het verschil dat er geen ventilator aanwezig is. De lu/wa-warmtewisselaarswerking van het paneel kan worden verklaard door het ontwerp.

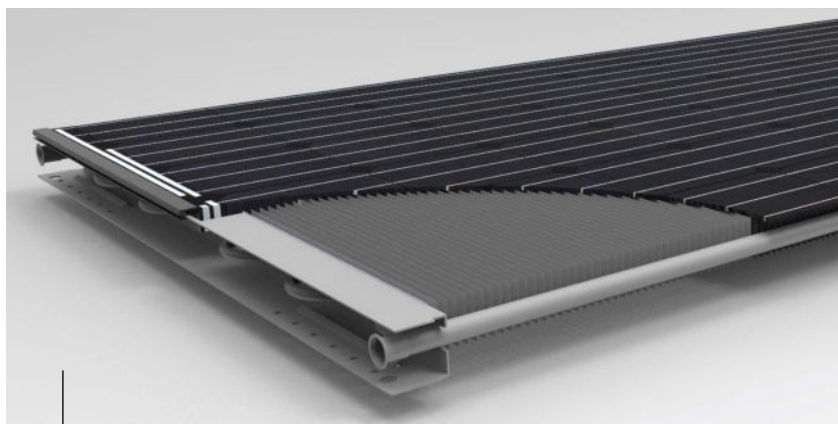
Het buizenstelsel onder het PV-paneel heeft veel contact met de buitenlucht en er is geen sprake van isolatie aan de onderkant van het paneel. Daarnaast kan warmtegeleiding van het PV-paneel naar de collector alleen plaatsvinden

via de lamellen, zoals weergegeven in figuur 2. Omdat deze flinterdunne lamellen verticaal op het PV-paneel zijn gelijmd, kan warmtegeleiding alleen plaatsvinden via de lijm vanwege het beperkte aanhechtingsoppervlak. Dit leidt ertoe dat zoninstraling een beperkt effect heeft op de uittredetemperatuur, terwijl koeling van het PV-paneel wordt gestimuleerd.

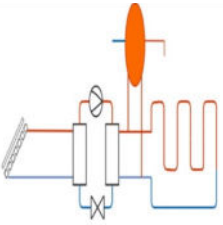
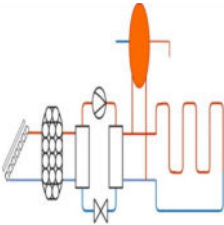
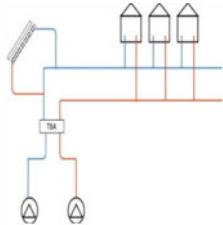
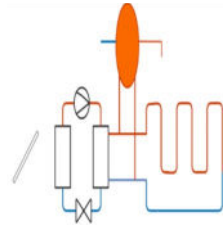
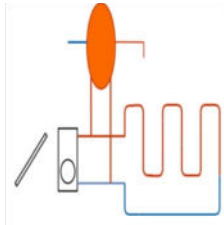
De PVT-panelen kunnen onafhankelijk van zoninstraling water/glycol produceren met een temperatuur die meestal iets onder de buitentemperatuur ligt. Dus ook 's nachts. Nu PVT-panelen sterk afhankelijk zijn van de buitentemperatuur produceren ze gedurende de winter water/glycol met constant lagere temperaturen die bij directe levering aan de warmtepomp nadelig zijn voor het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp.

Beschrijving van de energieconcepten

Met inachtneming van het bovenstaande zijn drie concepten met PVT-panelen en twee referenties zonder PVT-panelen geanalyseerd. De concepten met PVT-panelen hebben allemaal een wa/wa warmtepomp, waarbij ze verschillen in de vorm van opslag van warmte. Concept 1 betreft de toepassing van PVT met een wa/wa warmtepomp. Hieraan is in concept 2 een *phase change material*-buffer (PCM-buffer) van 0,25 m³ opslagtechniek toegevoegd. Gekozen is voor PCM met een smeltemperatuur van 4 °C, wat betekent dat de overdag geproduceerde warmte boven de 4 °C gebufferd wordt, om daarmee 's nachts de warmtepomp te kunnen voeden. De PCM-buffer wordt vooral benut in de maanden december, januari en februari, omdat in deze maanden de gemiddelde temperatuur rond de 4 °C ligt. In concept 3



Figuur 2: Bevestiging van de Triple Solar collector aan het PV-paneel via de lamellen.

Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4	Concept 5
- PVT-panelen (16m ²) - Wa/wa warmtepomp - 180 L boiler vat	- PVT-panelen (16m ²) - Wa/wa warmtepomp - 180 L boiler vat - PCM-buffer (0,25m ³)	- PVT-panelen (16m ²) - Wa/wa warmtepomp - 180 L boiler vat - Collectief WKO	- PVT-panelen (16m ²) - Lu/wa warmtepomp - 180 L boiler vat	- PVT-panelen (16m ²) - Combiketel
				

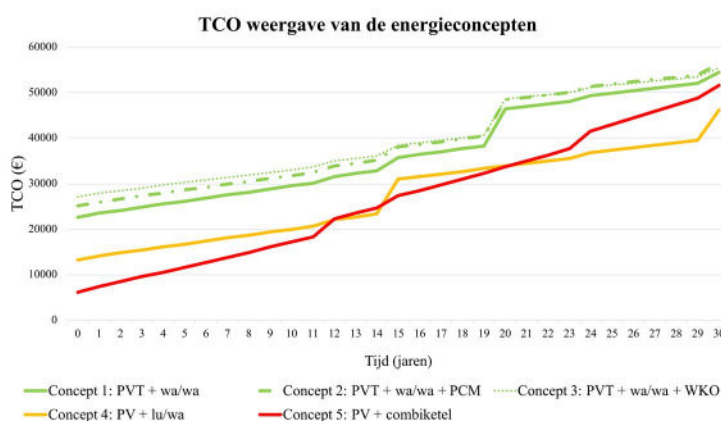
Tabel 1: Overzicht van de energieconcepten

is aan de PVT-panelen en de wa/wa-warmtepomp een collectief warmteopslag systeem (WKO-systeem) voor seizoenopslag toegevoegd. Van concept 3 zijn de gemiddelde kosten van het WKO-systeem voor één woning berekend. Deze drie nieuwe concepten zijn vergeleken met de twee meer conventionele concepten die als referentie dienen, te weten concept 4, een lu/wa-warmtepomp met PV-panelen en concept 5, een traditionele combiketel op aardgas in samenhang met PV-panelen. Zie tabel 1 voor een overzicht van de energieconcepten.

Doorrekenmethode

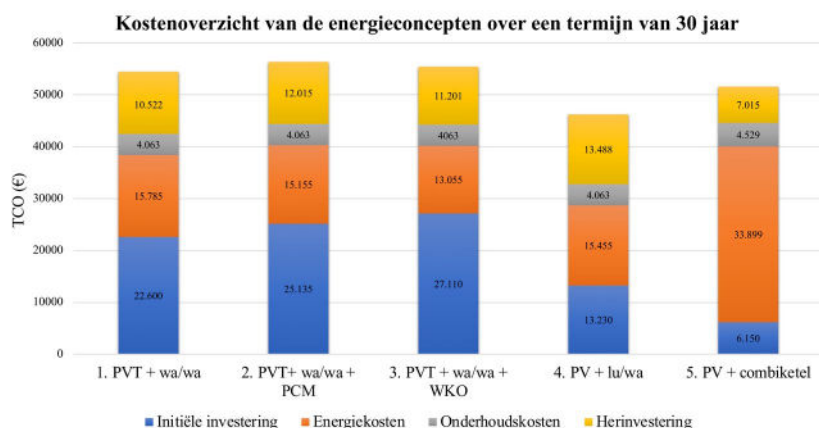
Bovengenoemde concepten zijn doorerekend met een model op basis van de computerprogrammeertaal Python. Aan de hand van de productspecificaties en klimaatomstandigheden zijn de geproduceerde temperaturen berekend en zijn gekoppeld aan het warmteprofiel van een bestaande woning om zodoende het elektrisch verbruik van de warmtepomp te kunnen berekenen. Deze woning heeft een jaarlijkse warmtevraag van 34 Gigajoule (GJ) (equivalent van 1.074 m³ aardgas), een elektriciteitsvraag van 3.000 kilowattuur (kWh) en een zuidgeoriënteerd beschikbaar dakoppervlak voor PVT- of PV-panelen van 16 m². De CO₂-uitstoot berekening is gebaseerd op de inkoop van 'grijze' stroom en de verbranding van aardgas. De Total Cost of Ownership (TCO) is over een periode van dertig jaar voor iedere jaar separaat berekend. Daarbij is rekening gehouden met de initiële investering, de jaarlijkse energie- en onderhoudskosten en de benodigde

herinvesteringskosten met inbegrip van de toepasbare discontovoet en indexering van de algemene prijs, gas- en elektrakosten. De onderzoeksresultaten zijn weergegeven in figuur 3, 4, 5 en 6.



Figuur 3: De TCO van de vijf energieconcepten over een termijn van dertig jaar.

Allereerst blijkt uit figuur 3 dat concept 5 (traditionele combiketel met PV-panelen) de laagste investering vergt en de laagste TCO op een termijn van tien jaar heeft, als wordt uitgegaan van de huidige (belasting) tarieven en subsidies (overigens is voor nieuwbouw een aardgasaansluiting normaal gesproken niet beschikbaar). Echter, naar mate de termijn waarover de TCO wordt berekend toeneemt, wordt het kostenverschil tussen alle concepten steeds kleiner, waarbij de verminderde operationele energiekosten van de duurzame concepten uiteindelijk de investering vrijwel geheel compenseren (zie figuur 4). Over een termijn van dertig jaar zijn de kosten nagenoeg gelijk. Dus niet de TCO, maar de investering in eerste aanvang en de financiering daarvan kunnen als doorslaggevend worden beschouwd voor de inzetbaarheid en acceptatie van aardgasvrije woonconcepten.



Figuur 4: Overzicht van de kosten van de verschillende concepten over een termijn van dertig jaar. Met daarin een discontovoet van 3%, algemene prijsindex van 2%, index gasprijs van 5%, index elektriciteitsprijs van 3%.

Financieringsmogelijkheid

Nu lijkt het dat de investeringen gefinancierd zouden moeten kunnen worden, aangezien deze zodanig renderen dat ze kunnen worden terugverdiend. In de praktijk echter blijken hypotheekgevers hiertoe (nog) niet altijd bereid óf in staat door regelgeving. Om deze investeringsbarrière te overwinnen, zou de overheid kunnen overwegen om meer mogelijkheden te creëren om duurzame concepten te financieren. Niet in de vorm van subsidies, maar in de vorm van terug te betalen aan huiseigenaren te verstrekken leningen (*revolving funds*). Het lijkt erop dat het op deze manier gasloos maken van wijken dan zonder nadere substantiële subsidies realiseerbaar zou kunnen zijn.

Elektrische opbrengst

De elektrische opbrengst van het PV-gedeelte is hoofdzakelijk afhankelijk van de productspecificaties, de temperatuur van de PV-cel én van de oriëntatie, hellingshoek en schaduw. Hier verwijzen de productspecificaties naar het vermogen (Wp) en de temperatuur coëfficiënt (%/°C) naar het vermogensverlies boven de 25 °C. Dankzij het buizenstelsel, bevestigd aan de onderkant van het PV-paneel, kan afhankelijk van de temperatuur van de circulerende vloeistof in het buizenstelsel een koeleffect optreden. Op zonnige dagen kan de temperatuur van een PV-paneel zomaar stijgen tot 65 °C, terwijl de collectortemperatuur van een Triple Solar PVT-paneel vaak niet hoger is dan de buitentemperatuur. Dit impliceert dat de collector geen verhoging van de temperatuur van het PV-gedeelte veroorzaakt en dus ook niet leidt tot een reductie van de elektrische opbrengst. Onder deskundigen op het gebied van verduurzaming van de gebouwde omgeving lijkt de opvatting te zijn dat het koeleffect

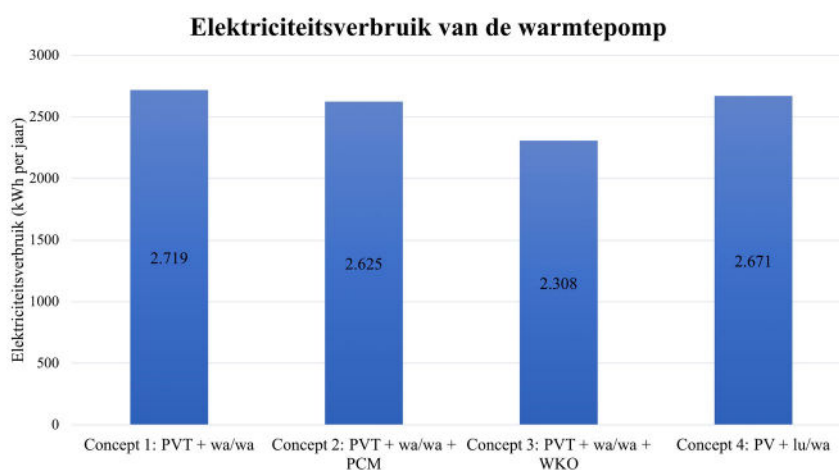
eerder een stijging van de elektriciteitsopbrengst veroorzaakt, echter het ontbreekt aan ondersteunde praktijkdata die dit bewijzen.

Evaluatie van de concepten

De integratie van thermische energieopslagtechnologie leidt tot een verbetering van de Coëfficiënt of Performance (COP) en daarmee tot een verlaging van het elektrisch verbruik van de warmtepomp (zie figuur 5 hieronder).

Om te beginnen is te zien in figuur 5 hierboven dat PVT-panelen met een wa/wa-warmtepomp en lu/wa-warmtepomp nagenoeg hetzelfde energieverbruik hebben. Dit komt omdat beide concepten functioneren als een lucht/water warmtewisselaar zonder toepassing van energieopslagtechniek, waardoor er vrijwel gelijke temperaturen aan de warmtepomp geleverd worden.

Figuur 5: Elektriciteitsverbruik van de warmtepomp per concept.



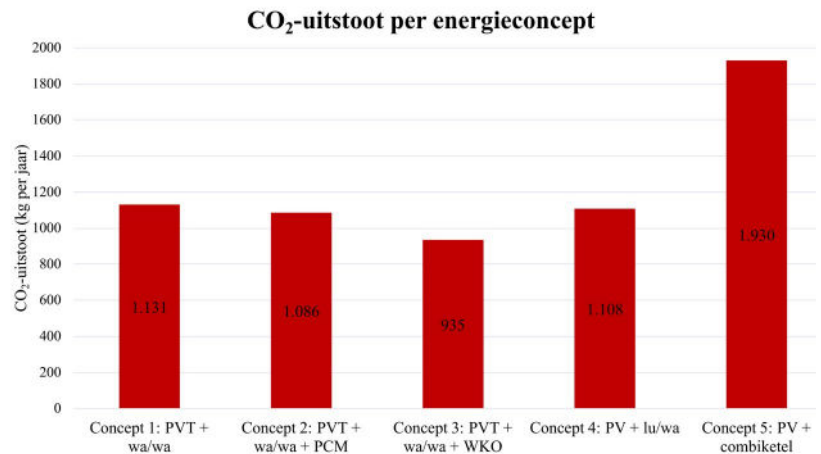
Figuur 6: Een overzicht van de jaarlijkse CO₂-uitstoot van de energieconcepten.

Verder blijkt uit de resultaten dat de toepassing van een PCM-buffer leidt tot een relatief kleine afname van de elektriciteitsvraag van de warmtepomp, namelijk slechts 3,5% lager dan zonder PCM-buffer. Dit kan worden verklaard doordat de PCM-buffer voor korte termijn opslag wordt gebruikt en doordat de geproduceerde warmte van een PVT-paneel sterk afhankelijk is van de buitentemperatuur, wat ertoe leidt dat een kleine temperatuur winst behaald wordt (i.e. het verschil tussen dag en nacht). Een PCM-buffer lijkt daarom meer geschikt voor energietechnologieën die hogere temperaturen produceren.

Concept 3 laat zien dat de toepassing van seizoensopslag gecombineerd met PVT-panelen leidt tot een significante vermindering van het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp. Dankzij de combinatie van PVT-panelen met een WKO-systeem kan een elektriciteitsvraag van de warmtepomp worden gerealiseerd die wel 15% lager is dan die van concept 1. Maatschappelijk gezien is efficiënt omgaan met elektriciteit van groot belang. De lage elektriciteitsvraag van de warmtepomp is ten eerste interessant om een lagere energierekening voor de bewoner te realiseren. Daarnaast zorgt het verlagen van de elektriciteitsrekening indirect voor een CO₂-uitstootreductie (zie figuur 6 voor een overzicht van de CO₂-uitstoot per concept), omdat dan minder (grijze) stroom wordt ingekocht. Nu een WKO-systeem de warmtepomp in de wintermaanden voedt, is de reductie in elektriciteitsverbruik van de warmtepomp vergeleken met concept 1 (zonder opslag) toe te schrijven aan de winterperiode, omdat de uittredetemperatuur van PVT sterk afhankelijk is van de buitentemperatuur. Op deze manier kan piekbelasting van het elektriciteitsnet worden gereduceerd en daarmee het mogelijk plaatsen van aanvullende voorzieningen worden beperkt.

Hoger gestapelde woningbouw

De toenemende bevolkingsgroei tezamen met een stijgende vraag naar woningen met name in de Randstad, gaat gepaard met een groei van hogere gestapelde woningbouw (hogere dan vier verdiepingen). Een potentiële toepassing van PVT-panelen, die echter niet in dit onderzoek is gekwantificeerd, betreft de toepassing van concept 3 voor dichter bevolkte woongebieden, zoals ingeval van hogere gestapelde woningbouw. De vraag blijft hoe dergelijke gebouwen te verduurzamen zijn. Door het beperkte dakoppervlak is het van belang om efficiënt om te gaan met technieken voor duurzame energieopwekking. Warmtenetten zijn niet altijd mogelijk in dichtbevolkte woongebieden. Daarbij komt dat



toepassing lu/wa-warmtepompen niet altijd haalbaar en wenselijk is, zoals Andy van den Dobbelsteen, hoogleraar Climate design & Sustainability aan de TU Delft, onlangs betoogde [2, 3]. Met name in dicht bevolkte woongebieden kunnen lu/wa-warmtepompen geluidsoverlast veroorzaken. Ook produceren lu/wa-warmtepompen restwarmte in de koelmodus waardoor er problematische warmteaccumulatie kan ontstaan zodra er veel lu/wa-warmtepompen op een relatief klein oppervlak zijn geplaatst. Hierdoor moet er meer worden gekoeld en wordt dus meer warmte uitgestoten, wat het zogeheten *heat island effect* kan verheugen. Verder opereren lu/wa-warmtepompen in de winter met lagere efficiëntie waardoor er meer elektriciteit nodig is.

Om de bovengenoemde redenen lijken lu/wa-warmtepompen geen redelijk alternatief onder hoogbouw omstandigheden, namelijk een dichtbevolkte omgeving. Er kan daarom gekozen worden voor ondergrondse thermische opslagtechniek. Concept 3 zou een alternatief kunnen zijn om bovengenoemde nadelen te beperken of te elimineren. Allereerst produceert een WKO-systeem geluid noch restwarmte, omdat warmte of koude wordt onttrokken uit en wordt afgegeven aan een grondwaterbron én tevens kan een WKO voorzien in een vraag naar koeling. Zoals eerder aangetoond, leidt thermische energieopslag tot vermindering van piekbelasting van het net.

Als PVT-panelen worden gecombineerd met een WKO-systeem, dan kunnen deze op drie manieren warmte leveren:

- Warmte voor regeneratie van de WKO-bron
- Verdamperenergie gelijktijdig met een WKO-systeem.
- Verdamperenergie met uitgeschakeld WKO-systeem.

De toegevoegde waarde van PVT-panelen zit in de optimale benutting van het dakoppervlak voor elektriciteitsopwekking in combinatie met warmte voor regeneratie van het WKO-systeem of directe levering van warmte aan de warmtepomp. Het regenereren van een WKO-systeem is nodig voor het herstellen van de onbalans in de bodem. Deze onbalans ontstaat als de warmte vraag van een gebouw groter is dan de koude vraag, wat vaak het geval is bij woningen. Daarnaast bestaat er een groeiende behoefte aan regeneratie van de bron door de ontwikkeling van warmtepomptechniek met een steeds hogere COP. Positief aan deze ontwikkeling is dat er minder elektriciteit nodig is omdat de COP stijgt en bij dezelfde warmtevraag dus meer warmte uit de bodem wordt gebruikt.

Door de toename van warmtepompen met een hoge COP komt het steeds vaker voor dat de WKO-bron verder uitkoelt en daarom meer regeneratie vereist. Een goed ontwerp vereist voldoende regeneratie voorzieningen. PVT-panelen kunnen daarom gebruikt worden als regeneratie voorzieningen net als droge koelers, oppervlaktewater, restwarmte van datacenters of koelinstallaties. PVT-panelen kunnen dus ook regenereren en leggen minder beslag op schaars dakruimte dan een droge koeler. Tot slot kunnen PVT-panelen ook direct de warmtepomp voeden, zonder inzet van een WKO-systeem, als de uittredetemperatuur voldoende hoog is voor warmtepompbedrijf. Deze bedrijfstoestand draagt bij aan de beperking van de onbalans in de bodem.

Conclusies

Functionaliteit en ontwikkeling

PVT-panelen zijn geschikt zijn om een optimale elektriciteitsopbrengst te halen en tevens laagwaardige warmte te produceren. De thermische opbrengst is geschikt voor koppeling met een wa/wa-warmtepomp en voor balanscorrectie van een WKO-systeem. Daarnaast zijn er veel ontwikkelingen gaande op het gebied van PVT-panelen en verschijnen er steeds nieuwe varianten van deze technologie op de markt. Zo is er bijvoorbeeld een PVT-paneel ontwikkeld waarin het contactoppervlak tussen het PV-paneel en de vloeistof die de warmte onttrekt bijna honderd procent bedraagt. Het lijkt erop dat een dergelijk paneel tot hogere uittredetemperaturen leidt die bijvoorbeeld geschikt kunnen zijn voor direct bereiding van warm tapwater zonder toepassing van een warmtepomp. Het is echter de vraag in hoeverre dit de elektriciteitsopbrengst beïnvloed.

Kosten/baten overzicht

De kosten van alle energieconcepten bij een TCO berekend over termijn dertig jaar komen dicht bij elkaar. Dit biedt met name perspectief voor partijen met belangen op de lange termijn, zoals de overheid en woningbouwcorporaties, maar ook voor burgers en bedrijven met duurzaamheidsbesef die bereid zijn hierin te investeren. Voor een zorgvuldige overweging van de energieconcepten is de TCO van wezenlijk belang. Van de duurzame concepten blijkt dat de toepassing van een lu/wa-warmtepomp met PV-panelen financieel het meest voordelig is omdat PVT-concepten een forse investering vereisen.

Maar afgezien van financiën zijn er andere motieven om PVT-concepten toe te passen zoals architectonische kwaliteit, beschikbaarheid van aardgas, geluid, een wa/wa-warmtepomp kan op ieder gewenste locatie worden geplaatst omdat geen contact met de buitenlucht is vereist, optimalisatie van WKO en het voorkomen van droge koelers voor WKO. Deze voordelen zijn met name interessant voor omstandigheden in de wat dichter bevolkte woongebieden.

PCM-buffer minder geschikt voor lage temperaturen

Voor wat betreft de combinatie van PVT-panelen, een PCM-buffer en een wa/wa-warmtepomp verdient de meer investering in een PCM-buffer zich niet terug en lijkt de toepassing van een PCM-buffer beter geschikt voor een nieuwe generatie of zonnecollectoren die hogere temperaturen produceren.

PVT-panelen met een WKO-systeem

Dankzij de toevoeging van een WKO-systeem kan het laagste elektriciteitsverbruik van de warmtepomp en de laagste CO₂-uitstoot gerealiseerd worden en wordt koeling van een huis mogelijk waarmee tevens het *heat island effect* in stedelijke gebieden verminderd kan worden. Verder beperkt de inzet van een WKO-systeem met warmtepompen de pieken in het elektriciteitsnet met bijbehorende maatschappelijke kosten van de netbeheerder voor voorzieningen om het net te verzwaren. WKO kan ook wel zonder PVT. PVT-panelen kunnen dienen als een (additionele) warmtebron om een WKO-systeem te regenereren en een deel van de warmtelevering over te nemen, zonder verspilling van dakoppervlak dat anders beschikbaar zou zijn voor elektriciteitsopwekking.



Michiel aan de Stegge,
adviseur DWA

Referenties

1. Oversloot, H.P. Bepaling collector formule Triple Solar PVT model 2017. Rapport TNO 2017 R10903. 28 juni 2017.
2. Vakbladwarmtepomp. Interview hoogleraar: 'Verduurzaming van bestaande bouw verloopt veel te traag'. 25 September 2019.
3. Vos, G. "Ik ben geen voorstander van luchtwarmtepompen". Gawalo. 17 juli 2019.