

PVT INSHAPE



Januari 2020

Openbaar eindrapport PVT inSHaPe

PVT inSHaPe: PVT integrated Solar Heat Pump systems

Project TEUE116189

GEGEVENS PROJECT

Projectnummer: TEUE116189

Projecttitel: PVT integrated Solar Heat Pump systems

Projectperiode: 1 januari 2017 - 1 november 2019

Penvoerder: TNO

Medeaanvragers: TNO
Dimark Solar
Solartech International B.V.
Exasun B.V.
NRGTEQ Support B.V.
RE-Source Renewable Energy
Conico Valves B.V.
Technische Universiteit Eindhoven (TU/e)
W/E Adviseurs Duurzaam Bouwen

Datum van inzending: Januari 2020

Contactpersoon: Corry de Keizer
Corry.dekeizer@tno.nl

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

INHOUDELIJK EINDRAPPORT

Inleiding

De gebouwde omgeving moet duurzamer. Vanwege de beperkte ruimte in Nederland is de ontwikkeling van kostengunstige gebouwgeïntegreerde zonne-energieproducten wenselijk. Een veelbelovende mogelijkheid is de koppeling van een (modulerende) vloeistof-vloeistof warmtepomp met onafgedekte PVT collectoren.

Doelstelling

Het doel van het PVT inSHaPe project was het ontwerpen, realiseren en valideren van drie geïntegreerde compacte PVT-warmtepompsystemen, afgestemd op Nederlandse woningen en gebruikersprofielen. Daartoe wordt een aantal systeemontwerpen opgeleverd en gesimuleerd. Drie systemen werden in de praktijk gebouwd en in een gecontroleerde labomgeving en in buitencondities doorgemeten en onderzocht. Voor het realiseren van de testopstellingen werden de laatste ontwikkelstappen gezet voor de systeemcomponenten. Door een techno-financiële analyse werd gekeken naar de businesscase voor deze systemen, door deze af te zetten tegen gangbare duurzame alternatieven. Naast EPG analyses, werden ook LCA-analyses van de materialen voor deze concepten gemaakt worden. De werkzaamheden werden uitgevoerd in een breed consortium.

De systeemcomponenten en outdoor onderzoek

Binnen het PVT inSHaPe project is door drie partijen een PVT collectorvlak opgeleverd voor een veldtest op de outdoor onderzoekslocatie SolarBEAT.

Links op het hellend dak is door Solartech International een zogenaamde Energiekap gerealiseerd. Deze bestaat uit een basis sandwichpaneel (dakpaneel), waarop achtereenvolgens zijn aangebracht: een bitumineuze dampdichte laag, een zon-thermisch Energiedak, EPDM dakbaan, MiaSolé flexibele PV. De Energiekap is opgebouwd uit twee afzonderlijke panelen, elk ongeveer 6 m² groot. Deze zijn prefab geproduceerd en op 25 januari 2018 naar Solarbeat getransporteerd, met een mobiele torenkraan op het dak geplaatst en aangebracht op de proefopstelling. De afwerking bestond uit het naadloos laten aansluiten van de isolatie tussen de beide dakpanelen, de dampremmer en de dakbedekking. Alle aansluitingen (nok, goot, boeiboord, verholen goot met naastgelegen pannendak en de aansluiting tussen beide dakpanelen) zijn afgewerkt met zink. Het leidingwerk en de PV-bekabeling zijn via een holte in de nok naar binnen geleid en aangesloten op het thermische en elektrische meetinstrumentarium van TNO.



De 'Building Integrated en Ventilated PVT-module' van Dimark, in het midden, is bedoeld om zowel overdag als wanneer de zon niet schijnt, een duurzame en praktische energiebron te blijven. Bij het in dit project beoordeelde ontwerp heeft Dimark gekozen voor een glas/glas PV-module gecombineerd met een hoog efficiënt geleidende Aluminium warmte absorber. De Aluminium warmte absorber is op een bijzonder wijze onder de PV-module gebouwd, waardoor naast warmte zonlicht ook energie uit de lucht wordt benut. Speciaal voor Dimark ontworpen, maken deze elementen onafhankelijk van de lucht- of module temperatuur, uitstekend contact met alle PV-wafers, waardoor de PV-modules over hun volledige voltaïsche oppervlak gelijkmatig 'gekoeld' blijven worden door een prima warmte overdracht.

Onder deze bij Dimark geassembleerde PVT's, is verder een waterkerende spouwruimte voorzien. Daarin is voldoende ruimte voor de leidingwerk en optimizers maar en passant ook voor een toereikende luchtstroom.

Eenmaal op een (schuin) dak aangebracht, ontstaat in elke module kolom een schacht waarin door convectie een luchtstroom ontstaat (warmte of koudeval), met de bedoeling dat de capaciteit daarvan, onder alle omstandigheden een geluidloze concurrent blijft voor de lucht/water warmtepomp zoals die inmiddels zo vaak wordt toegepast bij NOM-concepten.

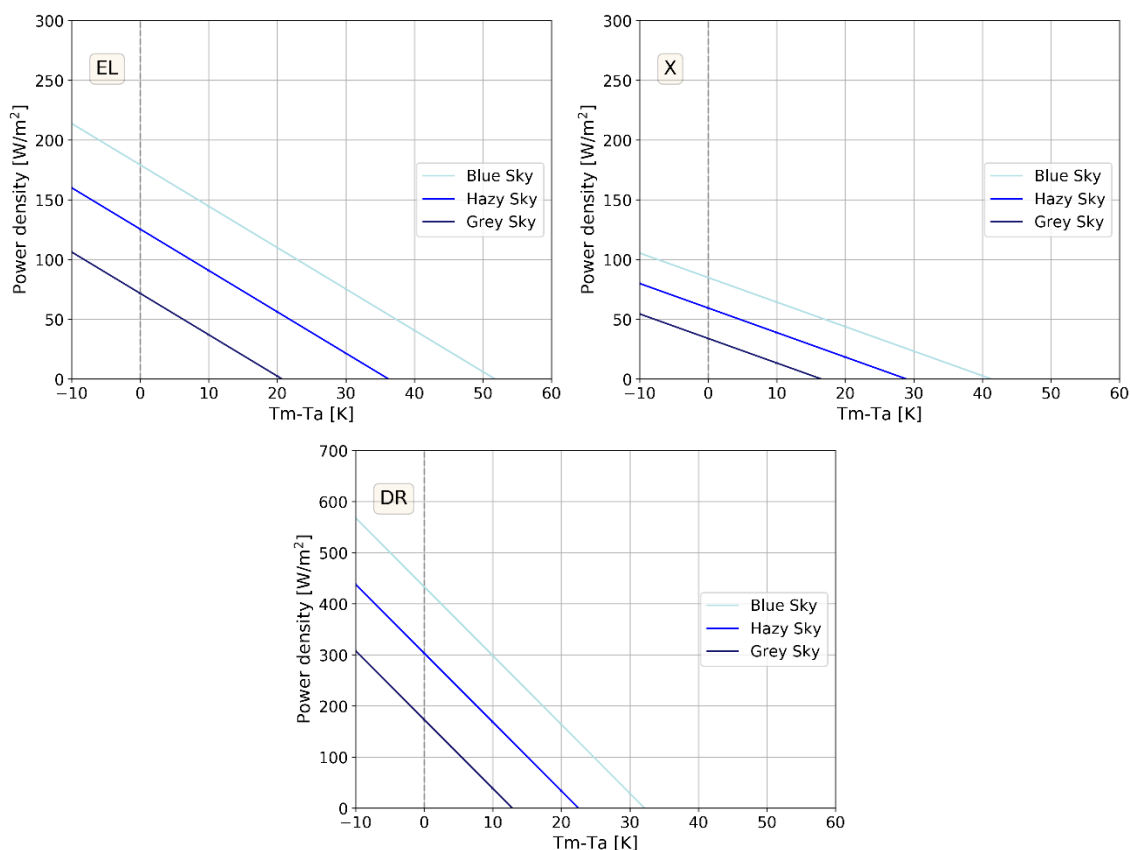
Het PVT-ontwerp van Exasun bestaat uit een enkele continue thermische buis die onder de zonne-installatie is gemonteerd en die respectievelijk door elk paneel en elke rij loopt. Het belangrijkste ontwerpelement van het PVT-systeem is de thermische absorber welke geïntegreerd is in de bevestigingsstructuur van het paneel. Dit werd om verschillende redenen gedaan: 1) voor een esthetisch ontwerp, 2) installatiegemak, 3) onderhoudsgemak, en 4) kosteneffectiviteit. Systeeminstallaties kunnen een aanzienlijk percentage vormen van de initiële kosten voor een project. Zeker voor thermische systemen. Het ontwikkelde systeem heeft een eenvoudig ontwerp en snelle installatietijd. Zo kan er worden bespaard in de installatiekosten.



De performance van de drie systemen is geanalyseerd aan de hand van de quasi-dynamische methode uit de norm NEN-ISO9806:2017. Zie onderstaande vergelijking. Optioneel kan een a_9 term toegevoegd worden voor de effecten van condensatie.

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \eta_{0,b} K_b(b_0, \theta) G_b + \eta_{0,b} K_d G_d - a_1(\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2(\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - a_3 u(\vartheta_m - \vartheta_a) + a_4(E_L - \sigma T_a^4) - a_5 \left(\frac{d\vartheta_m}{dt} \right) - a_6 u G - a_7 u(E_L - \sigma T_a^4) - a_8(\vartheta_m - \vartheta_a)^4$$

In de norm van 2017 worden ook Standaard Referentie Conditie (SRC) gespecificeerd, blue sky (instraling $G=1000 \text{ W/m}^2$), hazy sky ($G=700 \text{ W/m}^2$) en grey sky ($G=400 \text{ W/m}^2$) met een windsnelheid van $1,3 \text{ m/s}$. De collectoren Energiedak Links, Exasun en Dimark Rechts presteren bij deze omstandigheden als volgt in afhankelijkheid van de vloeistof minus de buitentemperatuur.



In de tweede fase van de veldtest is de warmtepomp geïnstalleerd en is een emulator opgezet. NRGTEQ heeft een modulerende warmtepomp geplaatst van 6kW met als koudemiddel R513A. Warmtepompen worden normaal gesproken bij bepaalde stabiele referentiecondities getest. Bij PVT-warmtepompsystemen is het gedrag van de warmtepomp zeer dynamisch. Met de emulatoropstelling is het mogelijk om de warmtevraag van een woning te simuleren en als input aan de warmtepomp te geven. Anderzijds bevindt het PVT-systeem zich in een buitenopstelling, waar het wordt blootgesteld aan het actuele buitenklimaat voor wat betreft zoninstraling en buitentemperatuur. De broncondities voor de warmtepomp variëren hierdoor op dynamische wijze met het buitenklimaat. Om de warmtevraag aan de warmtepomp te synchroniseren met het aanbod van energie op het PVT-systeem, is een extra module ontwikkeld voor de emulator. Deze module leest het buitenklimaat in zoals dat gemeten wordt ter plaatse van het PVT-systeem, en vertaalt dat naar een input voor het gebouwsimulatiemodel. Het PVT-warmtepompsysteem wordt zo onder realistische dynamische omstandigheden getest. Voor de emulatoropstelling is dit de eerste maal dat de overdraagbaarheid van het principe naar testopstellingen buiten het laboratorium wordt gedemonstreerd. Deze opstelling was door vertragingen in januari 2019 gereed. Daarna is eerst een maand getest met continu draaiende warmtepomp, vervolgens heeft de emulator gedraaid.

Daarnaast zijn er in de zomer 2019 ook testen gedaan met een warm tapwater patroon. Dit omdat een PVT-systeem in de zomer een potentieel effectieve methode om warm tapwater te maken is,

door de hoge beschikbaarheid van zonne-energie en door de hoge buitenlucht temperatuur Een PVT-warmtepomp combinatie laat een goed potentieel zien.

Het doel van de ontwikkeling van het thermodifferentiaalventiel van Conico is een bypass schakeling in het PVT circuit door middel van een zelf-actuerend ventiel dat schakelt op basis van temperatuurverschil. Deze bypass schakeling zou de PVT-collectoren kunnen bypassen, of een opslagvat waarin de warmte uit de PVT-collectoren wordt gebufferd of opgeslagen. Hiervoor zijn twee geheel verschillende ventielontwerpen ontwikkeld, omdat in het geval van bypass-schakeling van een opslagvat de actuator in het opslagvat kan steken, en in het geval van bypass-schakeling van een PVT collector niet.

Simulaties van PVT-warmtepompsystemen

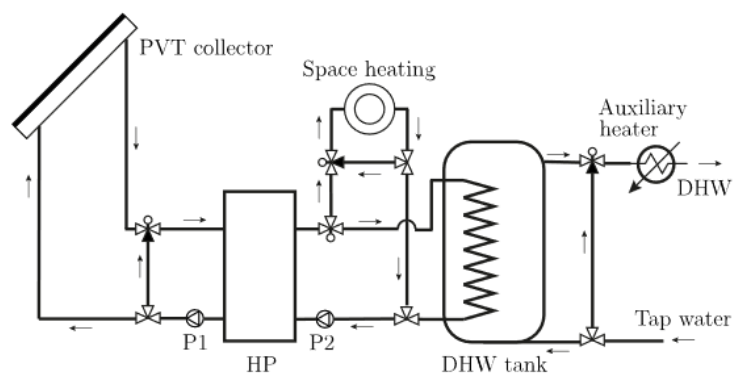
De TU/e en TNO hebben geïntegreerde PVT-warmtepompsystemen gemodelleerd en gesimuleerd. Hiertoe is gebruik gemaakt van TRNSYS en Polysun, simulatietools waarmee dynamische simulaties uitgevoerd kunnen worden. In TRNSYS is een PVT-warmtepompsysteem gesimuleerd waar de PVT warmte als bronwarmte voor de warmtepomp wordt gebruikt. We presenteren hier een selectie van de resultaten.

Doel van de simulaties

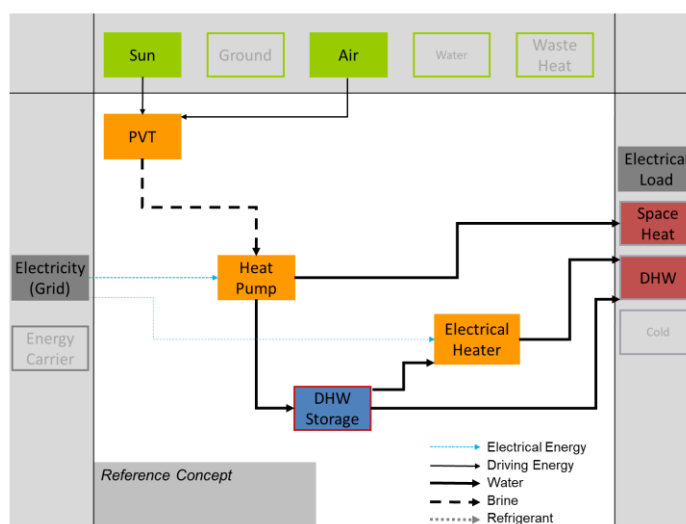
De uitgangspunten van de simulatiestudies verschillen. Er is onderzoek gedaan naar verschillende systeemconfiguraties, alsmede naar het effect van een verandering in de randvoorwaarden, zoals het gebouwtype en het gedrag van bewoners. Daarnaast is een alternatief lucht-water warmtepomp systeem gemodelleerd met als doel een referentiekader te creëren voor de simulatie resultaten van de PVT-WP-systemen.

Referentie systeem

De hydraulische systeemconfiguratie van het referentiesysteem is weergegeven in onderstaand figuur. De PVT-modules zijn aangesloten aan de bronzijde van de warmtepomp. Middels een driewegklep wordt voorkomen dat de temperatuur aan de bronzijde van de warmtepomp te hoog wordt. De warmtepomp genereert tapwater dat wordt opgeslagen in een opslagvat. Bij een tapwatervraag wordt er tapwater onttrokken aan de tank. Een verwarmingselement springt bij indien de warmtepomp niet kan voldoen aan de gewenste vraag. Naast het genereren van tapwater, voorziet de warmtepomp ook in de ruimteverwarming van het gebouw en is het aangesloten op het vloerverwarmingssysteem van het gebouw.



Ter vergelijking met de systeemconfiguraties die onderzocht zijn in de systeemsimulaties met PolySun, wordt onderstaand een alternatieve representatie van het referentie systeem weergegeven.



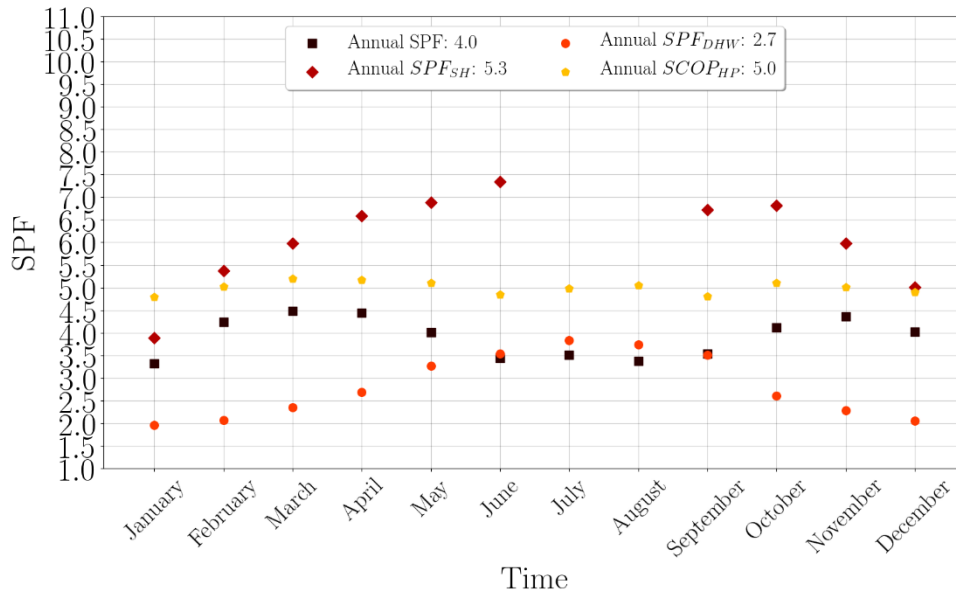
Simulatie resultaten

Als voorbeeld worden de simulatieresultaten van een casus gegeven. Het systeem bevat in dit geval de Dimark collector met een bruto oppervlak van 25 m². De capaciteit van de warmtepomp is 4 kW. Het volume van het boilervat is 175 L. De resultaten behoren bij een casus waarin het systeem geïnstalleerd is in een tussenwoning, gebouwd na 2016 en dus goed geïsoleerd. De jaarlijkse energievraag voor ruimteverwarming is 4.1 MWh (15 GJ). De dagelijkse tapwatervraag is 80 L bij een temperatuur van 60 °C, wat overeenkomt met een dagelijkse energievraag van circa 4.7 kWh.

Een van de energetische prestatie-indicatoren is de *Seasonal Performance Factor* (SPF). Eenvoudig gesteld is SPF een maat voor de efficiëntie waarmee het systeem energie uit de omgeving (zon en lucht) omzet in bruikbare energie voor ruimteverwarming en het genereren van warm tapwater; hoe hoger de SPF, hoe beter.

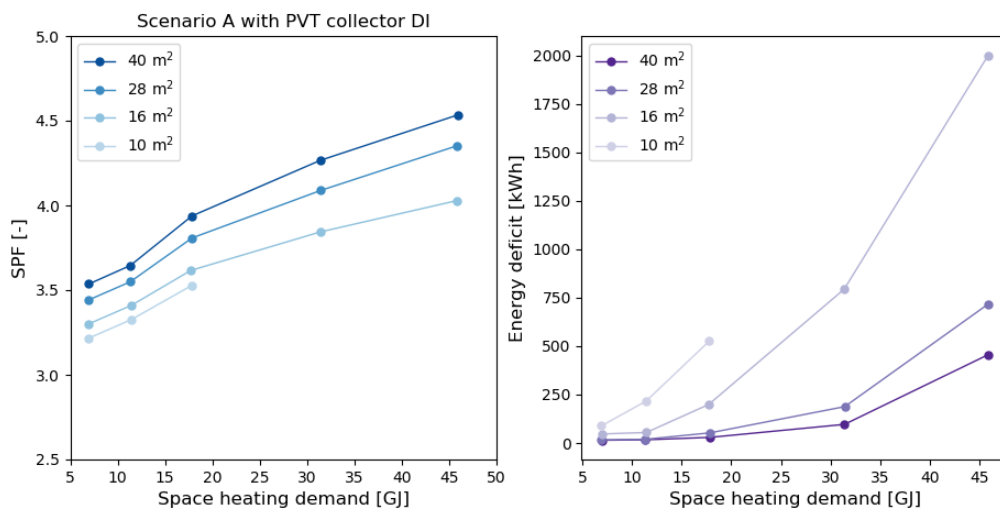
$$SPF = \frac{Q_{tapwater} + Q_{ruimteverwarming}}{E_{WP} + E_{back-up} + E_{pomp}}$$

De jaarlijkse SPF is 4.0. Uit onderstaand figuur volgt dat de SPF voor ruimteverwarming hoger is dan de SPF voor het genereren van heet tapwater. Dit is een gevolg van het feit dat de warmtepomp efficiënter opereert indien de temperatuur aan de afgiftezijde lager is. Anderzijds is te zien dat de SPF voor het genereren van heet tapwater toeneemt in de zomermaanden. Dit is een gevolg van de hogere omgevingstemperaturen, wat leidt tot een hogere temperatuur aan de bronzijde van de warmtepomp, wat op zijn beurt weer resulteert in efficiëntere operatie van de warmtepomp.



Met Polysun zijn voor deze configuratie, simulaties gedraaid met verschillende collectoren. De systeem SPF en het energietekort voor verschillende oppervlaktes van het Dimark systeem in combinatie met de ruimteverwarmingsvraag, staan de resultaten in onderstaande grafiek. Het is te zien dat het systeem met verschillende PVT oppervlaktes voldoet tot een warmtevraag van 31 GJ. Daarna is er een backup nodig.

Voor de systemen van Energiedak en Exasun is het energietekort voor ruimteverwarming hoger dan 100 kWh bij een ruimteverwarmingsvraag van 11 GJ en een PVT oppervlak van 40 m². Dat betekent dat deze panelen minder geschikt zijn voor deze configuratie.



Resultaten van configuratie PVT als directe bron voor de warmtepomp voor het Dimark systeem.

Total cost of ownership en energieprestatie eisen

W/E adviseurs heeft onderzoek gedaan naar de kansen en beperkingen van PVT-warmtepompsystemen voor toepassing in bestaande en nieuwe woningen. Dat is onderzocht door het vergelijken van de energieprestatie, het energiegebruik en de financiële consequenties van PVT-warmtepompsystemen met concurrerende technieken voor 5 verschillende woningtypen. De concurrerende technieken zijn: lucht/water warmtepomp, warmtepomp met bodembron en (voor bestaande woningen) de cv-ketel. Voor het financieel vergelijk berekenden we de 'total cost of ownership' (TCO) voor 15 jaar, de investering is inclusief alles wat nodig is voor het gasloos maken en op lage temperatuur verwarmen van de woning.

Om de energieprestatie-eisen EPC, BENG, Energie-index (en energielabel) en de EPV te kunnen berekenen is een gelijkwaardigheidsverklaring nodig. Voor een bredere toepasbaarheid van hun PVT-warmtepompsystemen moeten de leveranciers daarvan gelijkwaardigheidsverklaringen laten opstellen. De onderzochte nieuwbouwwoningen met PVT-WP installatie voldoen aan de BENG 2 en 3 eisen (tussenwoning en vrijstaande woning, die op zichzelf voldoen aan BENG 1). De EPV (energieprestatievergoeding) is een mogelijkheid voor woningcorporaties om een extra vergoeding van huurders te vragen in ruil voor gegarandeerd lage energiekosten. Om te kunnen voldoen aan de eisen voor de EPV zijn naast de PVT-WP installatie meer zonnepanelen nodig (t.b.v. het onderzoek is gerekend met 16 m²).

De TCO van de verschillende onderzochte gasloze installaties ligt dicht bij elkaar, het verschil over 15 jaar is minder dan 10%, projectafhankelijke zaken kunnen de doorslag geven. In vergelijking met een bestaande (goed geïsoleerde) woning met gasgestookte cv-ketel dalen de energiekosten fors bij toepassing van een PVT-WP. Vanwege de aanzienlijke investering is de TCO in 15 jaar niet gunstig. Dat speelt bij veel gasloze technieken. Het bruto-aanvangsrendement van de investering in een PVT-WP installatie en gasloos maken voor een bestaande woning ligt tussen de 2,5 en 4%. De TCO van de PVT-WP is voor woningcorporaties of

andere verhuurders minder gunstig dan voor lucht/water warmtepompen of cv-ketels, tenzij (een deel van) de hogere investering aan de huurders doorgerekend kan worden.

In vergelijking met de lucht/water warmtepomp is de PVT-warmtepompinstallatie in het voordeel vanwege lagere energiekosten. De investering voor een PVT-WP is hoger. Mogelijk kan een vorm van financiering naar voorbeeld van die bij NOM-woningen of de energiebespaarlening hier met name particulieren over de streep trekken. Voordelen zijn dat er geen geluid is van de bron in de omgeving, dat de bron 'verborgen' is achter zonnepanelen, en dat vervanging van de bron minder vaak nodig is. In vergelijking met de warmtepomp met bodembron is de investering voor een PVT-WP installatie iets lager en is het energiegebruik is iets hoger. Voordelen van PVT-WP ten opzichte van warmtepompen met bodembron is dat de bodemgesteldheid niet van belang is en dat er geen ruimte nodig is voor (het boren van) bodembronnen.

Om op financieel vlak (TCO) de concurrentiepositie van PVT-WP te verbeteren ten opzichte van andere warmtepompen, is een seizoensrendement (SPF) van 3,5 à 4 nodig. Het argument voor PVT-warmtepomptechniek wordt sterker als dit rendement in de praktijk gedemonstreerd of zelfs gegarandeerd kan worden, bijvoorbeeld voor de energieprestatievergoeding (EPV), of een vorm van financiering gerelateerd aan de hoogte van de energiekosten. Daarnaast kan de TCO verbeterd worden door verlaging van de investering, bijvoorbeeld door schaaleardeffecten, standaardisatie en routine in het installatiewerk.

Toelichting wijze van kennisverspreiding

Er zijn twee conferentiepapers gepubliceerd:

- de Keizer, C., Bottse, J., Folkerts, W., de Jong, M., An Overview of PVT Modules on the European Market and the Barriers and Opportunities for the Dutch Market, EuroSun 2018, September 10-13, Rapperswil, Switzerland
- Corry de Keizer, Minne de Jong, Len Rijvers, Camilo Rindt, Photovoltaic-thermal systems: Producing heat and power in the building skin, Advanced Building Skins, 28-29 October 2019, Bern, Switzerland

Daarnaast is er een publiek rapport over de marktstudie voor PVT en de kansen en barrières:

- de Keizer, C., Bottse, J., de Jong, M. & Folkerts, W., 2018. PVT Benchmark; An overview of PVT modules on the European market and the barriers and opportunities for the Dutch Market, Eindhoven: TNO-SEAC, <http://publications.tno.nl/publication/34635158/idTvLm/keizer-2018-pvt.pdf>

De TU/e (Len Rijvers) schrijft momenteel een publicatie over de PVT warmtepomp simulaties met TRNSYS.

Len Rijvers heeft in januari 2020 zijn PDEng scriptie afgerond:

- Rijvers. L.P.M. *Performance Analysis of PVT-HP Systems As Alternative Domestic Energy System for Residential Buildings located in the Netherlands*. PDEng thesis report. (January 2020). Eindhoven University of Technology.