Duurzaam verwarmingssysteem Rijksgebouwendienst Zoetermeer

Maximalisering zonne-energie per vierkante meter met PVT

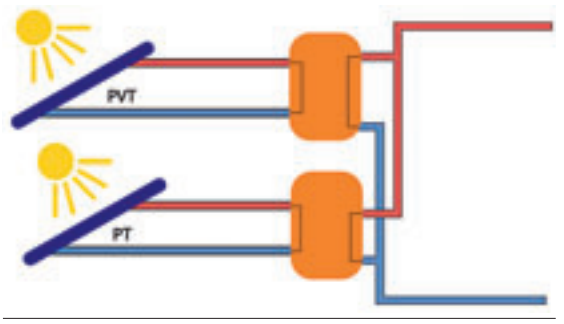
Wim van Helden,
Bart Roossien,
Jan Mimpen

Om de haalbaarheid van PVT-panelen ten opzichte van pv en zonnecollectoren te bepalen is een kantoorgebouw van de Rijksgebouwendienst in Zoetermeer gemonitord. Het PVT-systeem is aangesloten op het warmtapwatersysteem, gecombineerd met zowel pt als pv. Het doel is betrouwbare opbrengsten te kunnen berekenen en de toepasbaarheid in Nederland te testen.

De installatie is sinds februari 2011 in werking en wordt – via een uitgebreid meetsysteem – vanaf juli 2011 gemonitord. In de eerste meetperiode, van juli 2011 tot mei 2012, werden de werking en opbrengsten van de systemen bepaald en gebruikt om enkele verbeteringen in de installatie aan te brengen.
In een tweede meetperiode, van juni tot en met augustus 2012, is bepaald of de aanpassingen tot een betere werking van de systemen hebben geleid. De gemeten prestaties van de systemen zijn met elkaar vergeleken en met de uitkomsten van een simulatiemodel. De PVT-installatie moest worden ingevoegd in een al bestaand warmtapwatersysteem, dat niet voldoende kon worden geoptimaliseerd op het PVT-systeem. Daarom is ook nog een simulatie van een PVT-systeem in een ideale installatie gedaan en zijn de opbrengsten hiervan vergeleken met de gemeten, niet-ideale opbrengsten.

Monitoringsysteem

Het systeem bestaat uit 27 m^2 afgedekte vlakkeplaat-, hybride pv-/thermische modules, 12 m^2 afgedekte vlakkeplaatzonnecollectoren en 4 m^2 pv-panelen. Alles is gemonteerd op het dak van een kantoorgebouw, met een oriëntatie iets ten westen van zuid (200°) onder een hoek van 30°.
De pv-panelen en PVT-modules produceren elektriciteit die aan het elektriciteitsnet wordt teruggeleverd. De zonnecollectoren en PVT-modules produceren warmte die wordt gebruikt voor het verwarmen van tapwater. Als de warmte uit de duurzame systemen niet voldoende is qua omvang of temperatuurniveau, wordt deze aangevuld door een warmtepomp of een gasgestookte ketel. Zonnecollectoren en PVT-modules zijn elk verbonden met een warmwatertank van 400 liter. De oppervlakken van beide systemen zijn zodanig gekozen dat ze ongeveer dezelfde hoeveelheid warmte leveren. Hierdoor zijn de systemen zeer geschikt voor een onderlinge vergelijking.
Een monitoringssysteem meet de grootheden die nodig zijn om de systemen met elkaar en met de theoretische waarden te kunnen vergelijken: warmtestromen, temperaturen en de zoninstraling in het vlak van de collectoren. De gemeten buitentemperatuur en zoninstraling zijn vergeleken met de KNMI-data van twee nabijgelegen meteostations. De data bleken goed overeen te komen.
De metingen geven de daadwerkelijke prestatie van de elektrische en thermische systemen weer. Om te zien of deze prestatie in overeenstemming is met de theoretisch te verwachten waarden, zijn er modellen gebruikt om deze theoretische prestatie te bepalen. De elektrische opbrengst wordt berekend met een formule die rekening houdt met de gemeten zoninstraling, de temperatuur van het paneel, de gevoeligheid van het paneel voor lagere instraling, de temperatuurcoefficiënt van de pv-cellen en het opgegeven elektrische rendement van het paneel. Daarnaast wordt het geleverde vermogen gecorrigeerd met het rendement van de omvormer.
De gemodelleerde thermische opbrengst wordt berekend uit het opgegeven fabrieksrendement, de gemeten zoninstraling, de warmteverliescoëfficiënt, de buitentemperatuur, de temperaturen van de inlaat en de uitlaat van de collectoren en vergeleken met de gemeten opbrengst.



1. Principeschema van het thermisch-hydraulische systeem voor zonnecollectoren (PT) en PVT.

Resultaten

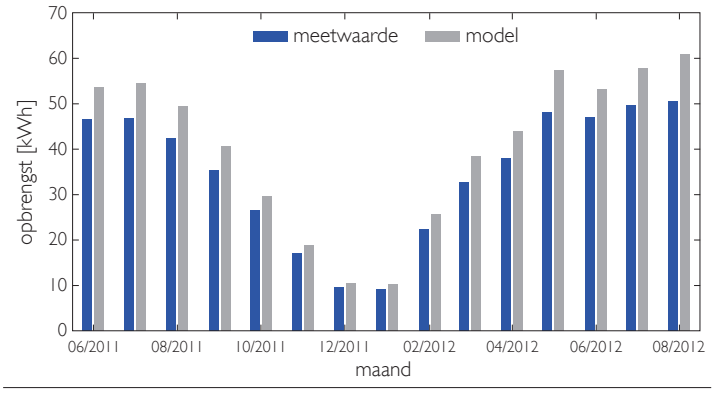
De metingen zijn verricht van juli 2011 tot en met augustus 2012. De eerste periode, tot 1 mei 2012, is gebruikt om de werking van het systeem vast te stellen en na te gaan of het mogelijk is om de werking van het totale systeem te verbeteren. Deze verbeteringen zijn in mei 2012 doorgevoerd en de tweede periode, van juni tot en met augustus 2012, is

	periode	1 [kWh]	1 [%]	2 [kWh]	2 [%]
pv-paneel	gemeten	327	8,9	147	8,5
	model	374	10,2	172	9,9
PVT-modules	gemeten	1.901	7,4	872	7,2
	model	2.346	9,1	1088	9,0

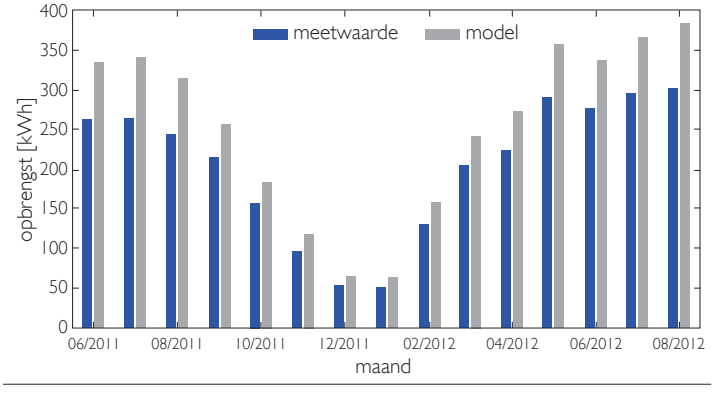
Tabel 1. De gemeten en gemodelleerde elektrische opbrengsten van het pv-paneel en de PVT-modules gedurende de eerste en de tweede meetperiode.

	periode	1 [kWh]	1 [%]	2 [kWh]	2 [%]
pv-paneel	gemeten	4.010	36,3	2153	39,1
	model	4.662	42,2	2029	41,5
PVT-modules	gemeten	3.870	15,0	2153	17,8
	model	4.640	18,0	2332	19,3

Tabel 2. Gemeten en gemodelleerde thermische opbrengsten van de zonnecollectoren en de PVT-modules, voor de eerste en tweede meetperiode.



2. De maandelijkse elektrische opbrengst van het pv-systeem, zoals gemeten en berekend.



3. De maandelijkse elektrische opbrengst van het PVT-systeem, zoals gemeten en berekend.

gebruikt om te controleren of wijzigingen daadwerkelijk tot hogere opbrengsten hebben geleid. De tabel geeft de gemeten en gemodelleerde elektrische opbrengsten voor het pv-paneel en de PVT-modules, voor de eerste en tweede meetperiode.

In tabel 1 is een vergelijking te zien van de gemeten en gemodelleerde elektrische opbrengsten van pv-panelen en PVT-modules. Uit deze tabel blijkt dat de rendementen van de PVT-modules een stuk lager liggen dan van de pv-panelen. Dit wordt veroorzaakt door de gemiddeld hogere temperatuur van de PVT-modules. Dit is ook te zien in de volgende staafdiagrammen, die de maandelijkse opbrengsten voor beide systemen laten zien.

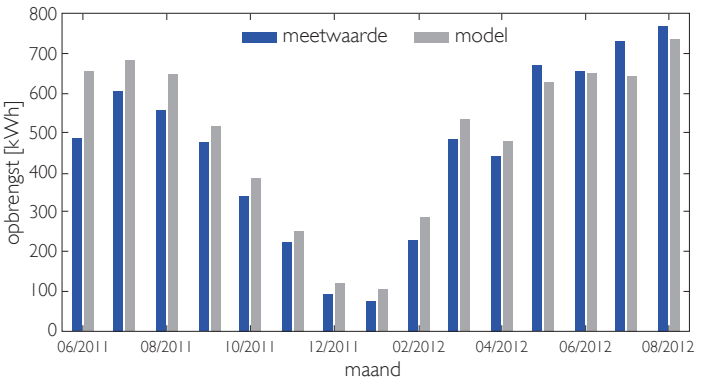
Voor de verschillen tussen meting en model zijn diverse oorzaken aan te wijzen. Ten eerste is er gedurende een klein deel van de dag beschaduwing van een dakopbouw, waardoor de opbrengst tijdelijk lager is. Daarnaast is de werkelijk gemeten temperatuur van de PVT-modules waarschijnlijk hoger dan gemeten, en rekent het model dus met een te lage temperatuur. Een hogere temperatuur van het pv veroorzaakt een lager elektrisch rendement. Een derde oorzaak is het gebruik van het door de fabriek opgegeven pv-rendement, dat in de praktijk afwijkt.

Thermische opbrengsten

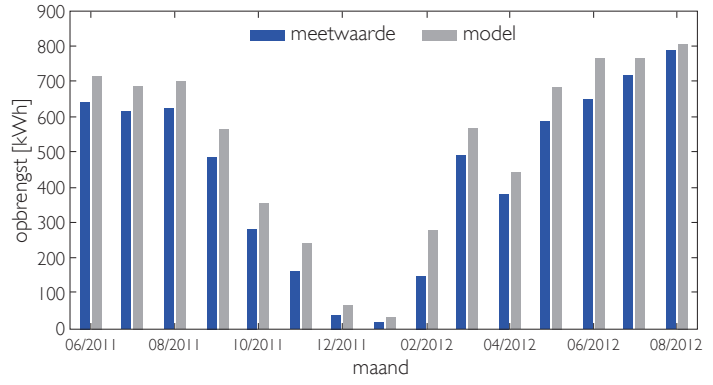
De maandelijkse thermisch opbrengsten voor de zonnecollector, respectievelijk de PVT-modules, staan in de volgende twee figuren. Het verschil tussen de gemeten opbrengst en de berekende opbrengst in de eerste meetperiode is ongeveer 14 procent voor de zonnecollector en 17 procent voor het PVT-systeem. In de tweede periode is het verschil voor het PVT-systeem gereduceerd tot 7 procent en leverde de zonnecollector zelfs 6 procent meer op dan berekend door het model.

Dit verschil tussen gemeten en berekende opbrengst is alleszins acceptabel, aangezien een berekeningsmodel van een zonneboiler voor een groot deel afhangt van de daadwerkelijke tapwatervraag van de toegepaste pompregeling. Beide konden niet uit de praktijk worden achterhaald en moesten dus worden geschat. Wat de metingen wél duidelijk maken, is dat de werkelijke opbrengst in de tweede fase aanzienlijk hoger is dan in de eerste fase. Dit wordt veroorzaakt door de doorgevoerde aanpassingen in de installatie.

In tabel 2 staan de thermische opbrengsten van de twee systemen over de gehele eerste en tweede meetperiode. In de tweede periode heeft het PVT-systeem evenveel geleverd als het zonthermische systeem, maar minder dan door het mo-



4. De maandelijkse thermische opbrengst van de zonnecollectoren, zoals gemeten en berekend.



5. De maandelijkse thermische opbrengst van de PVT-modules, zoals gemeten en berekend.

del werd berekend. Uit deze tabel blijkt ook weer dat de gemodelleerde opbrengsten sterk van de gemeten waarden afwijken. Het thermisch rendement van een zonthermisch sys-teem is een maat voor de kwaliteit van de omzetting van zonlicht in nuttige warmte. Dit zegt niet alles over de kwaliteit van inpassing van het zonthermische systeem in de warmtapwaterinstallatie, die wordt beter weergegeven door de zogeheten zonnefractie. Dit is het deel van de totale jaarlijkse warmtevraag die door het zonlichtsysteem wordt ingevuld:

$$\textit{zonnefractie} = \frac{\textit{opbrenst zonthermisch systeem}}{\textit{totale warmtevraag}}$$

De totale opbrengst uit het zonthermische systeem is gelijk aan de som van de opbrengst van de zonnecollector en het PVT-systeem. Helaas kan het meetsysteem deze waarden alleen samen – en niet apart – meten. Er wordt aangenomen dat de totale warmtevraag gelijk is aan de totale warmteproductie. De totale warmteproductie is de som van de opbrengst van het zonthermische systeem, de warmteproductie van de warmtepomp en de warmteproductie van de gasketel. Deze worden ook niet separaat gemeten. De totale warmtevraag is gelijk aan de totale warmteproductie. Er zijn namelijk onvoldoende meetgegevens om de warmtevraag direct vast te stellen.

Figuur 6 toont de maandelijkse zonnefractie. De gemiddelde zonnefractie over deze periode is 14,1 procent. Overigens is ook in deze figuur goed te zien dat de prestaties van het systeem vanaf mei 2012 zijn verbeterd.

	collector	PVT
nulrendement		
theoretisch	76 %	56 %
gemeten	82 ± 1 %	53 ± 1%
warmteverliescoëfficiënt [W m^{-2} K^{-1}]		
theoretisch	3,41	5,2
gemeten	4,6 ± 0,3	5,6 ± 0,4

Tabel 3. Theoretische en gemeten rendementen en warmteverliescoëfficiënten van de zonnecollectoren en de PVT-modules.

In tabel 3 staat het theoretisch en gemeten nulrendement en eerste orde temperatuurcoëfficiënt van de zonnecollector en het PVT-systeem. Vaststellen van deze parameters gebeurt op basis van statistische methoden. Met een model dat de parameters bevat worden de opbrengsten van het systeem berekend. De parameters worden net zolang gevarieerd tot er een goede fit is met de gemeten opbrengsten van het systeem op een groot aantal tijdstippen. Er is een grote afwijking tussen theoretische en gemeten waarden. Dit is een gevolg van het te kleine aantal meetpunten dat kon worden meegenomen in de bepaling van de collectorcurve. Voor een goed meetpunt moeten namelijk de instraling en temperaturen gedurende minimaal een half uur constant zijn en moet de instraling voldoende hoog zijn. Met een groter aantal goede meetpunten zal de statistiek beter worden en de afwijking met de theoretische waarden kleiner.

Omdat wordt gestreefd naar een zo hoog mogelijke opbrengst zonne-energie per m^2 is het totale systeemrendement bepaald. Met dit rendement is een goede vergelijking mogelijk tussen PVT-systemen en de gescheiden pv- en zonthermische systemen. In figuur 7 is het totale systeemrendement – de som van het thermische en elektrisch systeemrendement – weergegeven voor alle drie de zonsystemen. Omdat elektrische omzetting een aanzienlijk lager rendement (12,5 procent) heeft dan thermische omzetting (76 procent), is het systeemrendement van het pv-systeem aanzienlijk lager. Echter, elektriciteit kan als hoogwaardiger worden beschouwd, omdat zo'n 60 procent van de oorspronkelijke energie (gas, kolen) al verloren is gegaan. Daarom zijn in figuur 8 de zogeheten forfaitaire systeemrendementen weergegeven. Daarbij is de thermische en elektrische opbrengst omgerekend naar primaire energie. Primaire energie is de hoeveelheid energie die in de oorspronkelijke drager, zoals steenkool, olie, gas of uranium, zit. Voor deze figuur is aangenomen dat tapwater normaliter met een cv-ketel met 85 procent rendement wordt opgewekt en dat het elektrisch rendement van centrales, inclusief netverliezen, 39 procent is.

Ideale omstandigheden

De drie zonnesystemen zijn geïnstalleerd in het kader van een gebouwrenovatie, waarbij een groot deel van de bestaande warmtapwaterinstallatie niet kon worden gewijzigd. De omstandigheden voor een PVT-systeem zijn hierdoor niet opti-

maal. Om een beter inzicht te krijgen in de opbrengst van een PVT-systeem in ideale omstandigheden zijn er nogmaals systeemberekeningen uitgevoerd.

De volgende aannames en systeemspecificaties zijn gebruikt:

- Moderne pv-panelen hebben tegenwoordig een elektrisch rendement van ongeveer 16 procent.
- De optimale oriëntatie van zonnepanelen en zonnecollector is onder een hellingshoek van 30° en precies op het zuiden gericht.
- De warmte van de zonnecollector wordt geleverd aan een wko onder de grond. De aanvoertemperatuur naar de zonnecollectoren is dan altijd 12 °C.
- De meteogegevens zijn van het KNMI-station Rotterdam voor 2011.

Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de toepassing van een zonnecollector voor een wko alleen zinvol is als de hoeveelheid warmte die in de winter uit de wko wordt onttrokken groter is dan de hoeveelheid onttrokken koude in de zomer. Moderne (nieuwe) kantoorgebouwen hebben vaak meer koude- dan warmtevraag vanwege de hoge interne warmtelast, een omgekeerde situatie. Dit is te voorkomen door een goed ontwerp van het gebouw, met aandacht voor dit aspect. Oudere (gerenoveerde) gebouwen hebben geregeld nog wel een hogere warmtevraag.

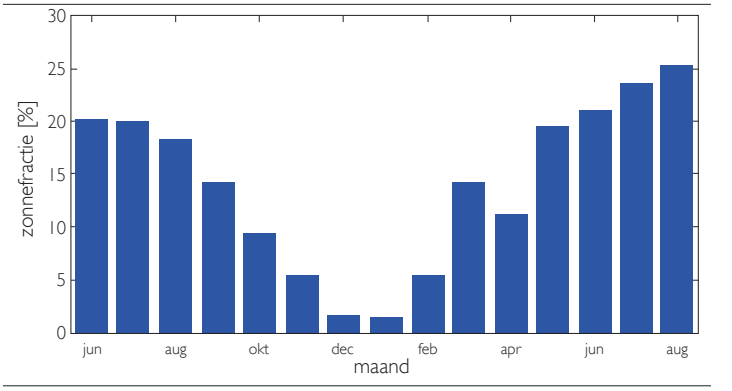
Het totale systeemrendement en totaal forfaitair (opbrengsten omgerekend naar primaire energie) zijn weergegeven in figuur 9 en 10. Uit dit laatste figuur blijkt dat vanuit primair energiegebruik gezien PVT-panelen in combinatie met een wko dus het gunstigst zijn. De berekende jaarlijkse opbrengsten liggen een stuk lager met 165 kWh/m^2 elektrische en 546 kWh/m^2 thermische opbrengst per jaar, zie tabel 4. Ter vergelijking; met de niet-geoptimaliseerde opstelling zijn de opbrengsten ongeveer 81 kWh/m^2 elektrisch en 165 kWh/m^2 thermisch per jaar.

Wanneer een beperkt dakoppervlak beschikbaar is zal de totale opbrengst van PVT een stuk hoger liggen dan de opbrengst van hetzelfde dakoppervlak aan pv en zonnecollectoren. Als bijvoorbeeld de thermische opbrengst van beide systemen gelijk moet zijn, is er per m^2 PVT ongeveer 0,67 m^2 zonnecollector nodig, waardoor 0,33 m^2 pv overblijft. Deze levert per jaar ongeveer 52 kWh op. Terwijl de PVT 165 kWh/a levert. Dit is meer dan 100 W.m^2 hogere elektrische opbrengst van het PVT-systeem.

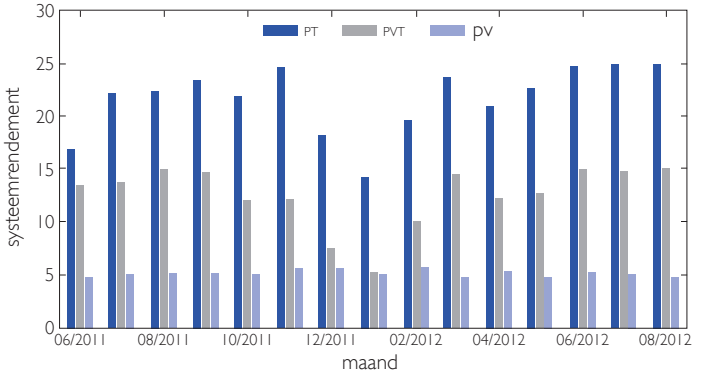
Kosten

Een belangrijk criterium voor de keuze tussen PVT of alternatieve, gescheiden systemen, vormen de kosten van de geleverde energie. Er zijn op dit moment een aantal bedrijven in Europa die PVT-modules aanbieden tegen commerciële prijzen. De markt voor PVT is echter nog klein en daarom zullen deze prijzen slechts een indicatie zijn voor de prijzen van PVT in een volledig ontwikkelde markt.

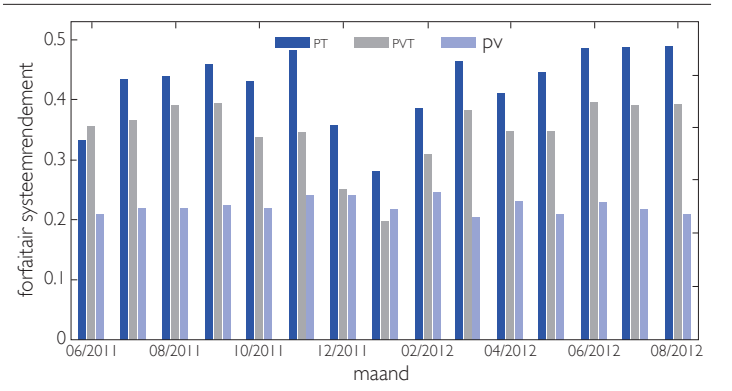
De gemiddelde prijs [1] voor PVT van vier verschillende aanbieders, is 910 €/m^2. Dit bedrag is opgebouwd uit een gemiddelde PVT-moduleprijs van 360 €/m^2 en een gemiddelde prijs voor de rest van het systeem van 550 €/m^2. Voor zonthermisch is een vergelijkbare opbouw verondersteld, met een collectorprijs van 200 €/m^2. Hiermee komt de totale prijs voor zonthermisch op 750 €/m^2. Voor pv wordt een prijs van ongeveer 320 €/m^2 verondersteld [2].



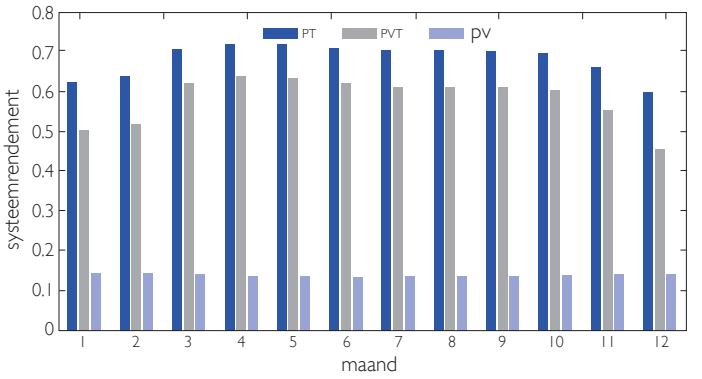
6. Zonnefractie voor het gezamenlijke zonnecollector- en PVT-systeem.



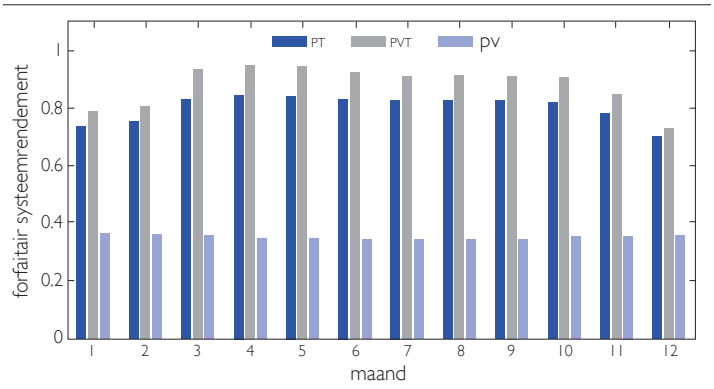
7. Totaal (thermische en elektrische opbrengst) systeemrendement voor de drie zonsystemen.



8. Totale forfaitaire systeemrendementen nadat de opbrengst is omgerekend naar primaire energie.



9. Totale systeemrendement voor pv-, PT- en PVT-panelen onder optimale omstandigheden.



10. Forfaitair systeemrendement voor pv-, PT- en PVT-panelen onder ideale omstandighede

Wanneer de elektrische en thermische opbrengsten worden berekend met het hierboven beschreven geoptimaliseerde systeem, met een levensduur van twintig jaar, lineaire afschrijving en geen rente, dan zijn de kWh-kosten (forfaitair = primair) respectievelijk 0,10 €/kWh (pv), 0,06 €/kWh (PVT) en 0,05 €/kWh (zonthermisch). Hierbij zijn de PVT-opbrengsten elektrisch en thermisch gewoon opgeteld.

Een andere vergelijking van enerzijds PVT en anderzijds de combinatie pv en zonthermisch kan worden gemaakt op basis van de elektrische en thermische opbrengsten. Wanneer 1 m^2 PVT qua opbrengst zou worden vervangen door een passend oppervlak pv en zonthermisch, dan waren 1,04 m^2 pv en 0,67 m^2 zonnecollector nodig. De prijs van deze twee zou 835 euro zijn, tegenover 910 euro voor 1 m^2 PVT. Dit verschil is kleiner dan de onnauwkeurigheid in de schattingen van de prijzen van de drie technieken.

Uit beide vergelijkingen blijkt dat de kosten van PVT of van de twee gescheiden technieken van vergelijkbare grootte zijn. Andere factoren zullen dus de doorslag moeten geven voor de keuze voor PVT. Dit kunnen bijvoorbeeld zijn het beperkt beschikbare dakoppervlak, het meer uniforme aanzicht van slechts een (PVT-)systeem op het dak of de prijsopbouw van elektriciteit en warmte.

Bevindingen

De vergelijkende praktijkmonitoring van PVT, pt, en pv heeft de volgende bevindingen opgeleverd:

- Het thermisch systeemrendement van het PVT-systeem is aanzienlijk lager dan van het zonnecollectorsysteem. Dit wordt veroorzaakt door de gemiddeld hoge temperaturen van het tapwatersysteem.
- Er is een niet optimale afstemming tussen de zonthermische systemen en de tapwaterinstallatie geconstateerd. Dit resulteerde in een relatief lage zonnefractie van 14 procent van de PVT- en pt-systemen. In de zomermaanden liep dit op tot maximaal 25 procent.
- Na optimalisatie van de bestaande installatie, dat wil zeggen verhoging van de doorstroomsnelheid en verlaging van de opslagtemperatuur, is de thermische opbrengst van het PVT-systeem met 12 procent en van de zonnecollector met 23 procent verhoogd.
- PVT-systemen aangesloten op ht-tapwatersystemen (circa 60 °C) leveren 5 – 10 procent meer primaire energiebesparing op.
- PVT-systemen aangesloten op een laagtemperatuursysteem (circa 12 °C; bijvoorbeeld met wko) hebben een tweemaal hogere elektrische en driemaal hogere thermische opbrengst.
- PVT-systemen aangesloten op een laagtemperatuursysteem hebben een meeropbrengst van circa 100 kWh/m^2 (elektrisch) aan primaire energie bij gelijke thermische opbrengst.
- Hoewel de voor PVT berekende kWh-prijs/m^2 aan primaire energie bij een op laagtemperatuur werkend systemen, nagenoeg gelijk is aan pt en duidelijk lager dan bij pv zullen in de praktijk de kosten per m^2 op het totale installatieniveau elkaar niet veel ontlopen.

Toepassing van PVT wordt vooral bepaald door de wens om de opbrengst aan zonne-energie per m^2 te maximaliseren en veel minder door de investering per m^2 paneel. Dit is vooral van belang bij de huidige ontwikkeling om tot energieneutraal vastgoed te komen.

Bronnen en verwijzingen

[1] PVT-aanbieders: Wiosun, Solator, Fototherm en 2Power. Stand juli 2012.

[2] Gemiddelde systeemkosten voor een Midden-Europees systeem, volgens IEA: 'Technology Roadmap Solar Heating and Cooling', 2012, pagina 44.

Auteurs

Wim van Helden, directeur Renewable Heat.

Bart Roossien, project engineer EnergyGO.

Jan Mimpen, adviseur duurzaamheid en comfort (installatie) Rijksgebouwendienst.