

Thermische zonne-energie: principes, technologieën en uitdagingen voor de energietransitie

Wat als de sleutel tot energieonafhankelijkheid op onze daken te vinden was, niet alleen in de vorm van licht, maar ook in de vorm van warmte? Terwijl Europa streeft naar een drastische decarbonisatie van zijn economie, vertegenwoordigt warmte nog steeds meer dan de helft van ons eindverbruik van energie.

Zonne-energie, die vaak in de schaduw van fotovoltaïsche energie is gebleven, ondergaat momenteel een spectaculaire technologische transformatie en is een van de meest volwassen en efficiënte technologieën voor directe benutting van zonne-energie.

Van hybride PVT-systemen tot intelligente koppelingen met warmtepompen: dit artikel biedt een pedagogische samenvatting van thermische zonne-energie om inzicht te krijgen in de technische, economische en systemische uitdagingen van deze technologie.

Table des matières

1. Warmte weer centraal stellen in de energietransitie	2
2. Fysische principes van thermische zonne-energie	3
3. Technologieën voor thermische zonnecollectoren	8
4. Hydraulische architectuur en regeling van thermische zonne-energiesystemen	11
5. Integratie van thermische zonne-energie in complexe energiesystemen	13
6. Fotovoltaïsche-thermische panelen (PVT)	14
7. Voorafgaande dimensionering van thermische zonne-installaties	16
8. Rendementscurves en prestaties van collectoren	17
9. Synthese : vergelijking van zonne- en thermische technologieën	20
10. Conclusie: thermische zonne-energie, pijler van onafhankelijke en koolstofvrije warmte	21
Bibliografie	22

1. Warmte weer centraal stellen in de energietransitie

In België, net als in de hele Europese Unie, wordt meer dan 50 % van de eindverbruikte energie in de vorm van warmte verbruikt, voornamelijk voor de verwarming van gebouwen, sanitair warm water en industriële processen bij lage en gemiddelde temperaturen. De energietransitie kan zich dus niet beperken tot elektrificatie en de ontwikkeling van fotovoltaïsche energie: ze impliceert noodzakelijkerwijs een ingrijpende transformatie van de systemen voor de productie en distributie van warmte.

In deze context lijkt thermische zonne-energie een strategische technologie. Deze technologie kan zonlicht rechtstreeks omzetten in bruikbare warmte met een hoog rendement en vormt een beproefde, robuuste oplossing die een aanvulling vormt op andere hernieuwbare technologieën, met name warmtepompen en warmtenetten.

2. Fysische principes van thermische zonne-energie

2.1. ZONNESTRALING EN ENERGIEBALANSEN

De werking van thermische zonne-energie is gebaseerd op het opstellen van een energiebalans tussen de invallende zonnestraling, de warmteverliezen en de nuttige energie die wordt teruggewonnen door de warmtedrager (meestal een mengsel van water en glycol).

De totale zonnestraling die door een collector wordt ontvangen, wordt uitgedrukt in W/m^2 en is afhankelijk van:

- de oriëntatie en helling van de collector,
- de breedtegraad en het seizoen,
- de atmosferische omstandigheden.

Het nuttige thermische vermogen dat uit een collector wordt gehaald, kan worden uitgedrukt door de vergelijking van Hottel-Whillier:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [G(\tau\alpha) - U_L(T_{in} - T_a)]$$

waarbij:

- $\dot{Q}_u$ het nuttige vermogen (W) is
- A_c het oppervlak van de collector is (m^2)
- F_R : **warmteoverdrachts- (of afvoers)factor** van de collector. Deze geeft de efficiëntie van de warmteoverdracht naar de vloeistof weer.
- G de zonnestraling of zonlicht dat op de collector valt (W/m^2)
- **$\tau\alpha$ het product van transmissie en absorptie:**

Wanneer een thermische zonnecollector zonlicht ontvangt, wordt slechts een deel van deze lichtenergie daadwerkelijk omgezet in bruikbare warmte. Er vinden twee optische verschijnselen plaats voordat de energie de absorber van de collector bereikt:

- **Transmissie (τ):** dit is het deel van het zonlicht dat door het glas heen dringt. Een deel gaat altijd verloren door reflectie, zoals bij elk glas.
- **Absorptie (α):** dit is het deel van het doorgelaten licht dat daadwerkelijk wordt opgevangen door het zwarte oppervlak van de collector, *de zogenaamde absorber*.

Het product (**$\tau\alpha$**) vertegenwoordigt dus het deel van de invallende zonnestraling dat daadwerkelijk in de collector in warmte wordt omgezet. Het is een centrale optische parameter van de zonnecollector. Het is rechtstreeks afhankelijk van:

- van de spectrale eigenschappen van het glas,
- de selectieve coating die op de absorber is aangebracht,
- de invalshoek van de zonnestraling.

Deze parameter beïnvloedt verschillende belangrijke aspecten van de prestaties:

- het optische rendement η_0 zoals gedefinieerd in de norm EN ISO 9806,
- het gedrag van de collector bij een klein temperatuurverschil (ΔT),
- de gevoeligheid voor vervuiling, stof en veroudering van de materialen.

Een efficiënte sensor zal dus trachten het volgende te maximaliseren:

- τ , de transmissie van het glas over het zonnenspectrum (0,3-2,5 μm),
- α , de absorptie van de absorber,

en tegelijkertijd de infraroodemissiviteit minimaliseren, die geen invloed heeft op ($\tau\alpha$) maar een essentiële rol speelt bij het verminderen van warmteverlies.

Om een orde van grootte te geven: als 95 % van het licht door het glas gaat ($\tau = 0,95$) en 95 % van dat licht door de absorber wordt geabsorbeerd ($\alpha = 0,95$), dan is ($\tau\alpha$) $\approx 0,90$. Met andere woorden, tot 90 % van de invallende straling kan door de absorber worden geabsorbeerd, wat de hoge rendementen verklaart (vaak 50 tot 75 % in reële omstandigheden): een van de redenen waarom thermische zonne-energie zeer hoge rendementen haalt, veel hoger dan die van fotovoltaïsche energie.

- U_L de totale warmteverliescoëfficiënt ($\text{W/m}^2\text{K}$): zelfs als een collector veel zonlicht ontvangt, **verliest hij ook warmte naar buiten** via de lucht, de wanden en straling.

De U_L -coëfficiënt geeft aan hoe snel de sensor warmte verliest wanneer deze warmer is dan de omgevingslucht.

Hoe lager de U_L , hoe beter de collector geïsoleerd is. Daarom:

- vlakke collectoren zeer goed presteren bij lage temperaturen,
- vacuümbuizen beter zijn bij koude temperaturen of wanneer men zeer warm water wenst.

U_L ($\text{W/m}^2\text{K}$) is een samenvoeging van alle uitgaande warmtestromen, namelijk geleiding (via de achterkant en zijkanten), convectie (natuurlijk en geforceerd/wind) en infraroodstraling. Deze parameter is vrijwel constant¹ voor een bepaalde collector en bepalend voor de helling van het rendement $\eta(\Delta T/G)$, een belangrijk criterium voor het vergelijken van vlakke collectoren en vacuümbuizen.

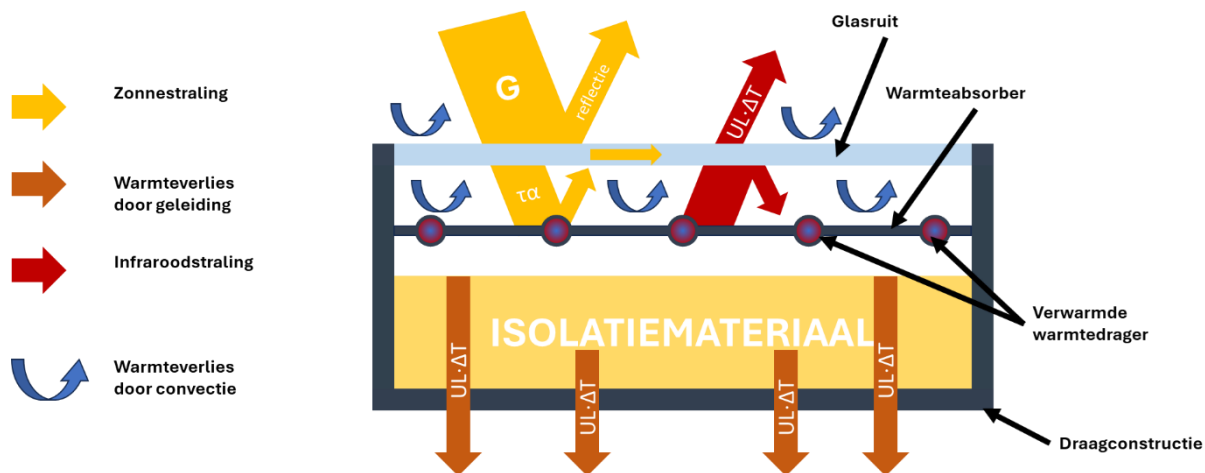
- T_{in} de gemiddelde temperatuur van de vloeistof
- T_a de omgevingstemperatuur
- $T_{in} - T_a$ kan worden afgekort met ΔT (wat in de bovenstaande formule kan worden vereenvoudigd tot $U_L \Delta T$)

Deze relatie benadrukt het belang van het beheersen van warmteverliezen, vooral wanneer de bedrijfstemperatuur stijgt.

2.2. ENERGIEOMZETTINGSKETEN

De omzettingssketen van thermische zonne-energie kan als volgt worden geschematiseerd:

¹ In de praktijk is U_L enigszins afhankelijk van de wind, de infraroodstraling van de hemel en de absolute temperatuur.



Het bovenstaande schema illustreert de omzetting van zonnestraling in bruikbare thermische energie. Dit proces is niet integraal en kan worden onderverdeeld in drie afzonderlijke stromen:

- **De energie-inbreng (G):** De invallende straling gaat door het glas (transmissie τ) voordat ze wordt opgevangen door de zwarte absorber (absorptie α). Het product ($\tau\alpha$) vertegenwoordigt het maximale deel van de energie dat in warmte kan worden omgezet, wat bij moderne collectoren ongeveer 90 % kan bedragen.
- **Optische verliezen:** Een deel van de straling bereikt de absorber nooit vanwege reflectie op het glas of absorptie door het glas zelf.
- **Warmteverliezen ($U_L\Delta T$):** Dit is de grootste uitdaging van de technologie. Zodra de absorber opwarmt, probeert hij deze warmte af te voeren naar de koudere omgevingslucht. Deze verliezen ontsnappen via:
 - **Convectie en infraroodstraling** door het voorste glas.
 - **Geleiding** door de isolatie en de draagconstructie (bruine pijlen op de tekening)

De nuttige energie ($\dot{Q}_u$) is dus het resterende saldo: dit is de warmte die de warmtedrager aan het paneel kan 'onttrekken' om deze naar de opslagtank of het gebruik te transporteren. Zoals de relatie van Hottel-Whillier aangeeft, geldt dat hoe hoger de temperatuur van de vloeistof (T_{in}) is, hoe groter de pijlen van de verliezen (U_L) worden, waardoor de uiteindelijke nuttige energie mechanisch wordt verminderd.

2.2.1. Zonnestraling en thermische omzetting

Thermische zonne-energie is gebaseerd op een eenvoudig principe: de absorptie van zonnestraling door een absorberend oppervlak, waardoor de temperatuur stijgt en deze warmte wordt overgedragen aan een warmtedragende vloeistof. In tegenstelling tot fotovoltaïsche energie, waarbij slechts een fractie van het lichtspectrum wordt omgezet in elektriciteit, kan een groot deel van het invallende zonnespectrum worden benut in de vorm van warmte².

Het directe energierendement van thermische zonnecollectoren kan meer dan 70 % bedragen, wat hun relevantie voor directe thermische toepassingen verklaart.

2.2.2. Fundamentele componenten

² De **gereflecteerde** en naar achteren **doorgelaten** straling worden niet benut.

Een thermisch zonne-energiesysteem bestaat doorgaans uit de volgende onderdelen:

- **Thermische zonnecollectoren** (beglaasde vlakken, niet-beglaasde vlakken of vacuümbuizen) die dienen om zonnestraling om te zetten in warmte met een minimum aan optische en thermische verliezen. Ze zorgen voor een selectieve absorptie en realiseren een warmteoverdracht naar de warmtedrager.
Deze collectoren hebben een lange levensduur van meer dan 25 jaar en zijn zeer goed bestand tegen stagnatie (het vermogen om **zonder schade bestand te zijn** tegen extreme omstandigheden die optreden wanneer de warmtedrager **niet meer circuleert** en de collector nog steeds zonlicht ontvangt).
- **Warmtedragende vloeistof**, vaak een mengsel van water en glycol om bevriezing te voorkomen (thermodynamisch en operationeel compromis), bedoeld om warmte te transporteren, op te slaan en te herverdelen. De vloeistof heeft als functie een efficiënte warmteoverdracht, vorstbescherming, corrosiebeperking en moet op lange termijn chemisch stabiel zijn.
- **Hydraulisch circuit** met circulatiepomp dient om de warmtestroom te regelen en de veiligheid te garanderen door de circulatie te beheersen, uitzettingen op te vangen en te beschermen tegen overdruk en koken.
Dit omvat een pomp, expansievat, klep, ontluchters en kleppen.
- **Warmtewisselaar** scheidt het zonnecircuit (warmtedragende vloeistof) van het gebruikerscircuit.
- **Warmteopslagvat:**

De zon verwarmt niet noodzakelijkerwijs op het moment dat we warm water nodig hebben. De boiler dient dus om de warmte die wordt geproduceerd wanneer de zon schijnt, *op te slaan*, zodat deze later kan worden gebruikt, wanneer we deze echt nodig hebben.

Technisch gezien zorgt hij voor een **temporele ontkoppeling**: productie en verbruik hoeven niet meer synchroon te lopen. Dankzij deze opslag kan een zonne-installatie een veel groter deel van de dagelijkse behoeften dekken. Dit wordt **de zonne-dekkingsgraad** genoemd.

Een goede boiler slaat niet alleen warm water op. Hij regelt ook de **thermische stratificatie**, dat wil zeggen de natuurlijke opeenstapeling van waterlagen met verschillende temperaturen. Deze stratificatie is essentieel: ze zorgt ervoor dat de zonnecollector onder goede omstandigheden kan werken (door het koudste water naar de collector te sturen) en dat het beschikbare warme water optimaal wordt benut.

Kortom, de opslagboiler is veel meer dan alleen een reservoir. **Het is het element dat zonne-energie, die van nature intermitterend is, omzet in echt bruikbare warmte die op het juiste moment beschikbaar is.** Zonder een goed ontworpen opslagsysteem zou het totale rendement van een thermische zonne-installatie instorten.

- **Regelsysteem** voor de optimalisatie van de energiestromen.
In een thermische zonne-installatie speelt de regeling een absoluut essentiële rol. Zonder deze regeling zou het systeem slecht functioneren... en zelfs gevaarlijk kunnen worden. Het doel ervan is eenvoudig: **de energiestromen voortdurend optimaliseren** om het beste uit de zon te halen en tegelijkertijd de installatie te beschermen.

Concreet vergelijkt de regeling continu de temperatuur van de zonnecollector met die van de opslagboiler. Zodra de collector warmer wordt dan het water in de boiler, start de regeling de pomp

om de warmte over te brengen. Omgekeerd, als de collector kouder is, voorkomt de regeling onnodige circulatie. Dit voorkomt **ongewenste circulatie**, die de boiler zou afkoelen in plaats van verwarmen.

Maar daar houdt haar rol niet op. De regeling zorgt ook voor de **veiligheid** van de installatie. Bij zeer hoge temperaturen beheert ze **stagnatiesituaties** om oververhitting te voorkomen. In de winter kan ze **antivriesmaatregelen** activeren om het zonnecircuit te beschermen.

Vanuit technisch oogpunt maximaliseert de regeling dus:

- **de daadwerkelijk teruggewonnen bruikbare energie,**
- **de levensduur** van de componenten,
- **de stabiliteit** van het systeem onder alle weersomstandigheden.

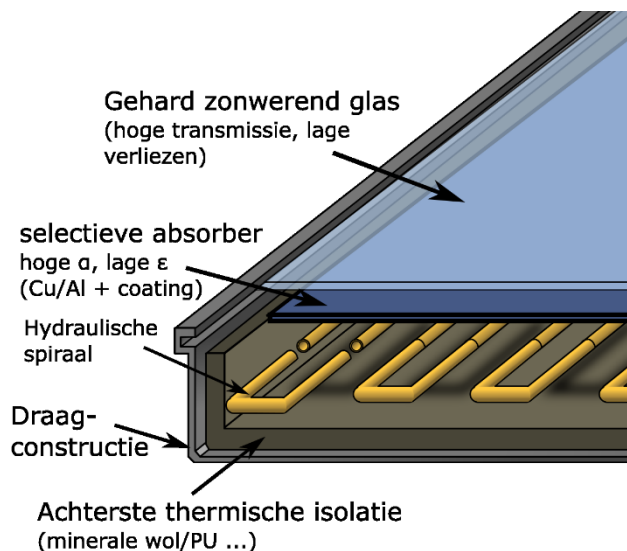
Kortom, de regeling is het brein van de thermische zonne-energie. **Zij maakt van een eenvoudige collector een efficiënt, betrouwbaar en duurzaam systeem.**

3. Technologieën voor thermische zonnecollectoren

3.1. VLAKKE GLAZEN COLLECTOREN: GEDETAILLEERDE SAMENSTELLING EN WERKING

Vlakke glazen collectoren zijn de meest gebruikte technologie voor residentiële en tertiaire toepassingen bij lage temperaturen.

Een vlakke glazen collector bestaat uit de volgende lagen (van voor naar achter):



- ein Zonnepaket
- ein selektives wärmeabsorbierendes Material
- ein wärmetransportierendes Schaltkreis bestehend aus Röhren (Spirale) für den Transport des wärmetransportierenden Fluids
- eine isolierende Schicht
- und ein festes Rahmen

Die selektive Beschichtung spielt eine Schlüsselrolle: Diese maximiert die Absorption der Sonnenstrahlung ($\alpha \approx 0,95$) und minimiert gleichzeitig die Infrarotemission ($\epsilon \approx 0,05$), wodurch Strahlungsverluste reduziert werden.

Illustration: Quelle Wikimedia

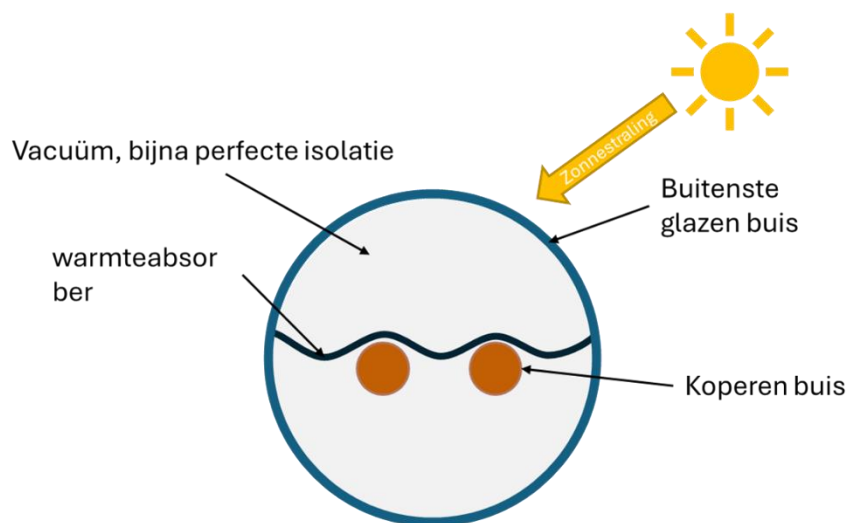
Vlakke glazen collectoren hebben:

- ein hervorragendes Rendement bei gemäßigten Temperaturunterschieden ($\Delta T < 40 \text{ K}$),
- eine allmähliche Abnahme der Leistungen, wenn die Temperatur des Fluids steigt.

Sie sind daher besonders geeignet für die Produktion von sanitärem Warmwasser (SWW) und für das Vorwärmen von niedrigen-temperatur-Netzwerken.

3.2. VACUÜMBUISCOLLECTOREN: WERKING EN SPECIFIEKE KENMERKEN

Vacuümbuiscollectoren sind entworfen, um Wärmeverluste durch Konvektion und Leitung, die Schwachstellen von Flachkollektoren in schwierigen Umständen, drastisch zu reduzieren. Das Prinzip ist basierend auf einer Reihe von doppelwandigen Glasröhren, in denen ein Vakuum erzeugt wird, wodurch eine fast perfekte thermische Isolierung entsteht, vergleichbar mit der eines Thermosflasks. Innerhalb dieser Röhren fängt eine absorbierende Platte die Strahlung auf, um eine Kupfer-Röhre zu erwärmen.



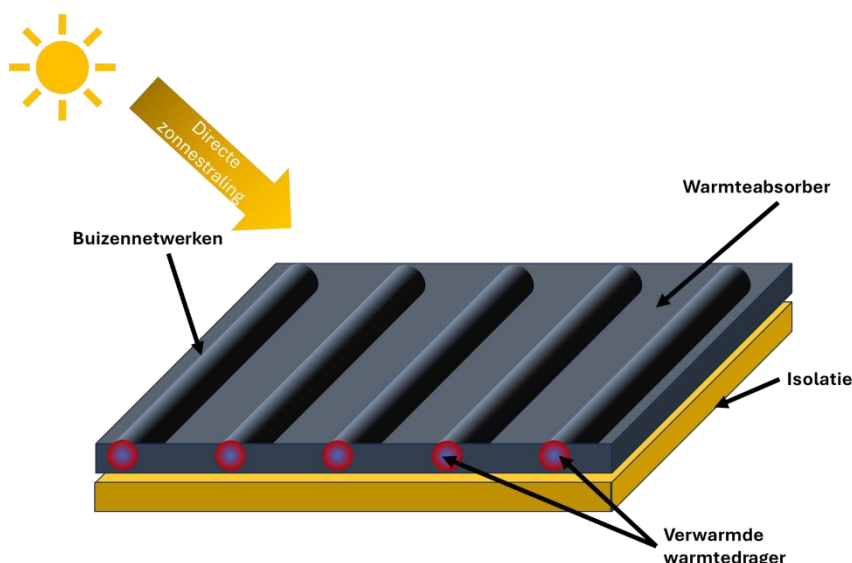
Twee technologische architecturen domineren deze markt:

- buizen met "directe circulatie", waarbij de warmtedrager door de hele buis stroomt,
- buizen met een 'warmtepijp' (*heat pipe*), waarbij een tussenvloeistof verdampt en condenseert om de warmte uiterst snel en efficiënt over te dragen.

Dankzij dit vermogen om warmte vast te houden, zelfs wanneer het temperatuurverschil met de buitenlucht groot is, zijn deze collectoren bijzonder geschikt voor koude klimaten, installaties die water met een hoge temperatuur nodig hebben, en veeleisende industriële en collectieve toepassingen. Ze behouden zo een stabielere rendementscurve dan vlakke collectoren wanneer de bedrijfstemperatuur stijgt.

3.3. ONGEGLAZUURDE COLLECTOREN EN LAGE-TEMPERATUURBRONNEN

Niet-beglaasde collectoren, vaak bestaande uit netwerken van zwarte polymeerbuisen (EPDM of polypropyleen) of eenvoudige metalen platen, werken zonder isolatie of beschermende beglazing. Door het ontbreken van een thermische barrière zijn ze uiterst gevoelig voor wind en schommelingen in de buitentemperatuur, waardoor hun gebruik beperkt is tot toepassingen waarbij de vloeistof moet worden verwarmd tot een temperatuur die zeer dicht bij die van de omgevingslucht ligt. Ze blinken dan ook uit in de verwarmen van openluchtzwembaden tijdens de zomerperiode,

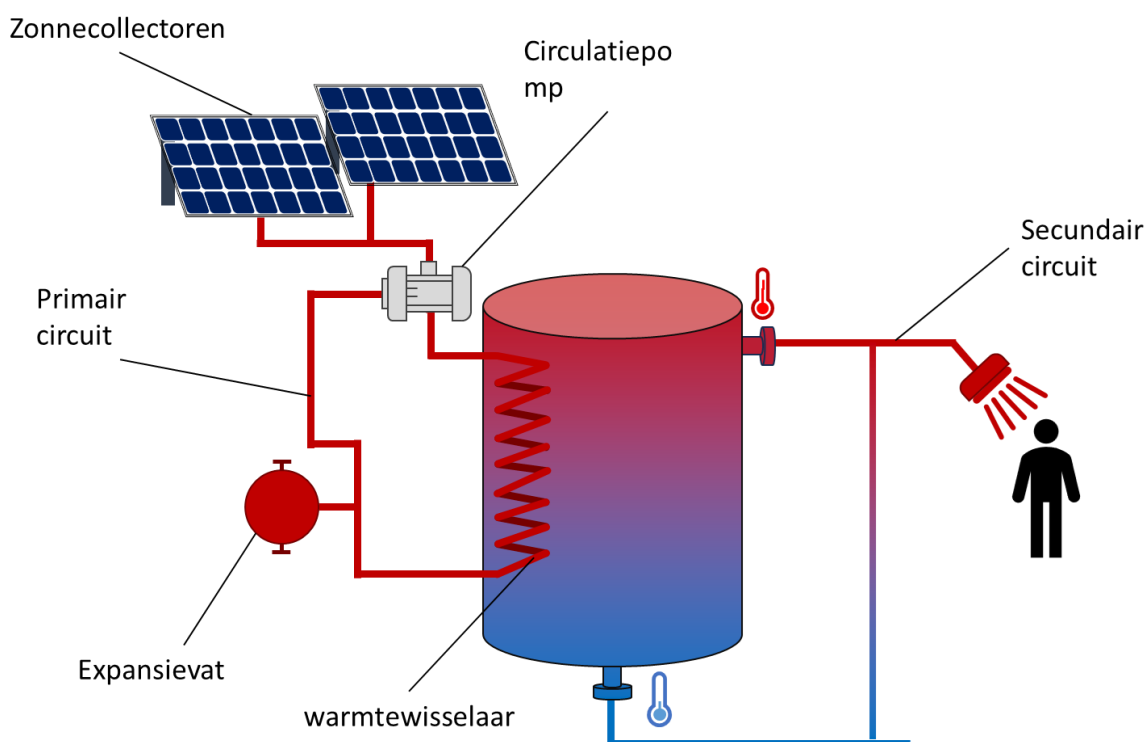


wanneer de behoefte aan temperatuurverhoging matig is. Naast dit klassieke gebruik kennen ze een grote technologische heropleving als warmtebronnen voor warmtepompen (WP) of in 'vijfde generatie' warmtenetten met ultralage temperaturen. In deze configuraties fungeert de collector als een omvormer van omgevingsenergie, die niet alleen directe zonnestraling opvangt, maar ook de warmte uit de omgevingslucht en regen, waardoor hij een efficiëntere en stabielere warmtebron biedt dan alleen de buitenlucht voor de thermodynamische cyclus van de warmtepomp.

4. Hydraulische architectuur en regeling van thermische zonne-energiesystemen

4.1. PRIMAIR CIRCUIT EN SECUNDAIR CIRCUIT

Een efficiënt thermisch zonne-energiesysteem is gebaseerd op de interactie van twee afzonderlijke hydraulische circuits, die met elkaar zijn verbonden door een warmtewisselaar die zorgt voor warmteoverdracht zonder vermenging van de vloeistoffen.



Het **primaire circuit**, dat zich tussen de collectoren en de wisselaar bevindt, werkt in een gesloten kringloop en maakt doorgaans gebruik van een mengsel van water en glycol om bevriezing te voorkomen en corrosie te beperken. Dit circuit is het kloppende hart van de installatie: het bevat kritieke veiligheidsvoorzieningen, zoals een expansievat om volumeschommelingen als gevolg van de uitzetting van de vloeistof op te vangen, een circulatiepomp (circulatiepomp) en kleppen ter bescherming tegen overdruk.

Zodra de warmte naar de warmtewisselaar is getransporteerd, wordt deze overgebracht naar het **secundaire circuit**, dat de energie distribueert naar eindgebruikers zoals sanitair warm water of het verwarmingsnetwerk. Deze scheiding zorgt ervoor dat het door de gebruiker verbruikte water sanitair blijft en beschermd is tegen de chemische componenten van het opvangcircuit.

4.2. DIFFERENTIËLE REGELING: INTELLIGENTE REGELING VAN DE STROMEN

De differentiële regeling vormt het beslissingscentrum van de thermische zonne-installatie en zorgt ervoor dat de warmteoverdracht alleen plaatsvindt wanneer dat echt nuttig is. Het principe is gebaseerd op een constante vergelijking, via precisiesensoren, tussen de temperatuur aan de uitgang van de collectoren ($T_{\text{collector}}$) en die aan de onderkant van de opslagboiler (T_{boiler}).

Het systeem activeert de circulatiepomp alleen wanneer een voldoende positief verschil wordt gedetecteerd (doorgaans $\Delta T_{on} \approx 6$ tot 10 graden), waardoor de teruggewonnen zonne-energie groter is dan het stroomverbruik van de pomp en de warmteverliezen van het leidingnet.

Omgekeerd wordt de pomp uitgeschakeld zodra dit verschil onder een kritieke drempelwaarde ($\Delta T_{off} \approx 2$ tot 4 graden) daalt om "parasitaire circulatie" te voorkomen, die het tegenovergestelde effect zou hebben en de boiler 's nachts of bij zeer bewolkt weer naar buiten zou afkoelen.

Naast dit debietbeheer omvat de moderne regeling geavanceerde veiligheidsfuncties, zoals de "vakantiemodus" (nachtelijke koeling van de boiler om stagnatie de volgende dag te voorkomen) of vorstbeveiliging, waardoor de levensduur van de componenten en de warmtedrager aanzienlijk wordt verlengd.

4.3. BEHEER VAN STAGNATIE

Het beheer van stagnatie is de grootste uitdaging voor elke thermische zonne-installatie. Stagnatie treedt op wanneer de opslagtank verzadigd is terwijl de zon nog volop schijnt. In deze toestand stopt de warmtedrager met circuleren en kan hij in damp veranderen, waardoor de componenten worden blootgesteld aan extreme druk en temperaturen (die kunnen oplopen tot meer dan 180 °C, of zelfs 250 °C voor bepaalde vacuümbuiscollectoren). Om de duurzaamheid van het systeem te garanderen, geven ontwerpers de voorkeur aan "intrinsieke veiligheidsstrategieën": het gebruik van ruim bemeten expansievaten om het volledige volume aan verdampte vloeistof op te vangen, de keuze voor vloeistoffen die bestand zijn tegen hoge temperaturen of een optimale helling van de collectoren om een natuurlijke lediging van de spiraal door zwaartekracht te bevorderen (drain-back-systemen). Een intelligente regeling kan ook op deze fasen anticiperen door 's nachts koeling in te schakelen, waarbij de vloeistof na het vallen van de avond wordt gecirculeerd om de overvloedige warmte van de boiler via de collectoren naar de sterrenhemel af te voeren.

5. Integratie van thermische zonne-energie in complexe energiesystemen

Zonne-energie moet niet langer worden gezien als een op zichzelf staande oplossing, maar als een flexibele module die kan worden geïntegreerd in energiearchitecturen met meerdere bronnen. De rol ervan is het leveren van een koolstofvrije thermische basis, waarvan de waarde wordt gemaximaliseerd door intelligente koppelingen.

5.1. SYNERGIE TUSSEN THERMISCHE ZONNE-ENERGIE EN WARMTEPOMPEN (WP)

Door koppeling met een warmtepomp kunnen de temperatuurbeperkingen van elke technologie worden overwonnen.

In een gecombineerd systeem kan thermische zonne-energie op twee manieren werken:

- **Als directe aanvulling:** de zon verwarmt het water in de opslagtank voor. De warmtepomp wordt alleen ingeschakeld om de benodigde extra temperatuur te leveren, waardoor de bedrijfstijd en de slijtage van de compressor worden verminderd.
- **Als ondersteunende koudebron:** De zonnecollectoren (met name de niet-beglaasde of PVT-modellen) dienen om de koudebron van de warmtepomp (lucht of geothermie) te stabiliseren of op te warmen. Door de temperatuur in de verdampers te verhogen, wordt de seizoensgebonden Coëfficiënt van Prestatie (COP) drastisch verbeterd, wat zelfs op koude maar zonnige dagen aanzienlijke elektriciteitsbesparingen oplevert.

5.2. ZONNE-ENERGIENETWERKEN EN SEIZOENSOVERSCHRIJDENDE OPSLAG

Op wijk- of gemeenschapsniveau wordt thermische zonne-energie een pijler van de nieuwe generatie warmtenetten.

- Gedeeld gebruik en massale opslag: Door gebruik te maken van opslagtanks met een zeer grote capaciteit, of zelfs geothermische opslag (BTES), kan de overtollige warmte die in de zomer wordt geproduceerd, worden opgeslagen en in de herfst of winter worden gedistribueerd.
- Lage-temperatuurnetwerken: Door te worden geïntegreerd in zogenaamde "lage-temperatuurnetwerken" minimaliseert thermische zonne-energie de verliezen in de leidingen en maakt het gebruik van eenvoudigere en goedkopere collectoren mogelijk, terwijl een harmonieuze integratie met andere bronnen, zoals de terugwinning van industriële restwarmte, wordt gegarandeerd.

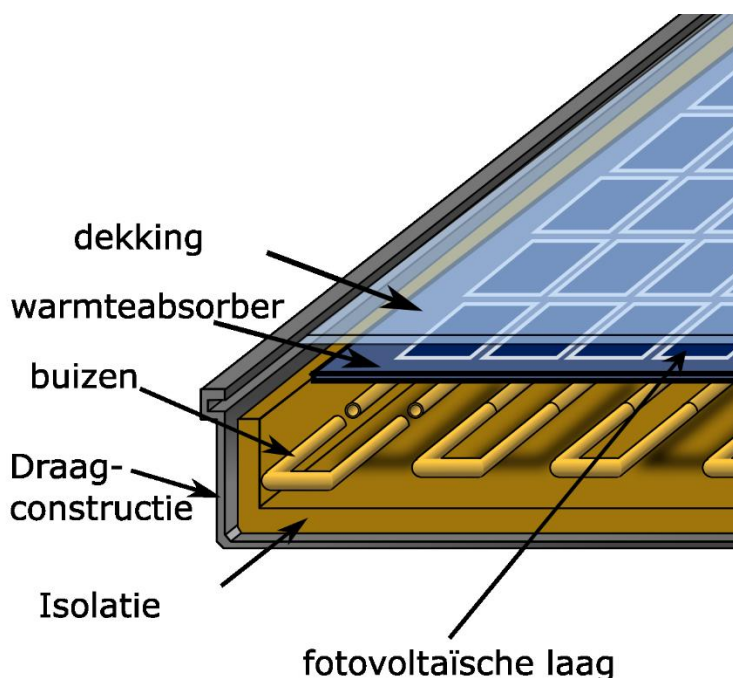
5.3. NAAR THERMISCHE ENERGIEGEMEENSCHAPPEN

De complexe integratie leidt vanzelfsprekend tot een collectief energiebeheer. Door een geoptimaliseerd opvangoppervlak en een gemeenschappelijke opslag te delen, profiteren gebruikers van lagere warmtekosten en een grotere veerkracht bij schommelingen in de prijzen van fossiele brandstoffen of elektriciteit. Deze aanpak transformeert het gebouw van een eenvoudige gebruiker tot een actieve schakel in een territoriaal energie-ecosysteem.

6. Fotovoltaïsche-thermische panelen (PVT)

6.1. MEERLAAGSE STRUCTUUR VAN EEN PVT-PANEEL

Een fotovoltaïsch-thermisch paneel (PVT) is een complex technisch onderdeel dat bestaat uit meerdere functionele lagen die samen één module omvormen tot een warmtekrachtkoppeling. De structuur is doorgaans als volgt opgebouwd:



1. De glazen voorkant (optioneel):

Net als bij een klassiek thermisch paneel beschermt deze de cellen en creëert hij een broeikaseffect. Hoewel hij het thermisch rendement verbetert, kan hij het elektrisch rendement door reflectie licht verminderen.

2. **De fotovoltaïsche laag:** Deze bestaat uit siliciumcellen (monokristallijn of polykristallijn) en vangt fotonen op om gelijkstroom op te wekken. 80 % van de zonne-energie die door deze cellen wordt opgevangen, gaat echter normaal gesproken verloren in de vorm van warmte, wat hun efficiëntie vermindert.

3. **De thermische interface (inkapseling):** Dit is een cruciale overdrachtslaag. Deze moet zowel elektrisch isolerend zijn om de cellen te beschermen als zeer thermisch geleidend om de warmte naar de absorber af te voeren.

4. **De metalen absorber:** Deze plaat, meestal van koper of aluminium, is nauw verbonden met een netwerk van buizen (spiraalvormige of parallelle kanalen). Ze vangt de warmte van de PV-cellen op en geeft deze door aan de warmtedrager.
5. **De achterisolatie:** Een laag steenwol of polyurethaanschuim met hoge dichtheid beperkt het warmteverlies aan de achterkant van het paneel, waardoor de thermische energie naar het hydraulische circuit wordt geleid.

Door achter de cellen te circuleren, fungeert de vloeistof (glycolwater) als een "koeler". Door de temperatuur van de cellen met enkele tientallen graden te verlagen, voorkomt het spanningsverlies als gevolg van warmte, waardoor de elektriciteitsproductie toeneemt en tegelijkertijd waardevolle thermische energie wordt opgevangen die anders verloren zou gaan.

Deze warmteterugwinning maakt het tegelijkertijd mogelijk om:

1. **De totale energieopbrengst per vierkante meter te verhogen** door het zonnenspectrum breder te benutten dan fotovoltaïsche energie alleen.

2. **De temperatuur van de fotovoltaïsche cellen te stabiliseren**, waardoor ze binnen een optimaal werkbereik blijven om hun elektrische efficiëntie te maximaliseren.
3. **De thermomechanische belasting op de modules te verminderen**, waardoor de uitzettings-/krimpcycli worden beperkt die op termijn de cellen en elektrische verbindingen kunnen beschadigen.

6.2. PVT ALS BRON VOOR WARMTEPOMPEN

De koppeling tussen fotovoltaïsche-thermische panelen (PVT) en warmtepompen vormt een belangrijke technologische synergie voor volledig eigen verbruik. In deze configuratie vervult het PVT-paneel een dubbele rol: het produceert elektriciteit om de compressor van de warmtepomp van stroom te voorzien en dient tegelijkertijd als warmtebron voor de verdamper. Door de lage temperatuur achter de fotovoltaïsche cellen terug te winnen, stabiliseert de warmtedrager de koudebron op een temperatuurniveau dat vaak hoger en constanter is dan de buitenlucht in de winter. Dit mechanisme maakt het mogelijk om de seizoensgebonden COP (prestatiecoëfficiënt) van de warmtepomp aanzienlijk te verhogen en tegelijkertijd de fotovoltaïsche cellen te koelen, waardoor hun elektrisch rendement met 3 tot 8 % wordt verbeterd in vergelijking met een conventioneel paneel dat oververhit raakt in de zon (5 % is gebruikelijk; ~10 % in optimale omstandigheden).

7. Voorafgaande dimensionering van thermische zonne-installaties

7.1. ALGEMENE PRINCIPES

Bij het dimensioneren van een thermische zonne-installatie wordt niet gestreefd naar volledige autonomie, wat zou leiden tot een kostbare en onbeheersbare overdimensionering in de zomer. Het doel is om het economische en technische evenwichtspunt te vinden om het **aandeel** van zonne-energie te maximaliseren³, d.w.z. het percentage van de jaarlijkse behoefte dat door de zon wordt gedekt. Een nauwkeurige dimensionering is gebaseerd op de historische F-Chart-methode of moderne dynamische simulatietools, die de maandelijkse thermische behoeften, het verbruiksprofiel (vaak hoger in de ochtend en avond) en de lokale meteorologische gegevens (instraling op een hellend vlak) met elkaar vergelijken.

7.2. GROOTTEordes voor Sanitair Warm Water

Voor een individuele woning in gematigd Europa is het systeem zo gedimensioneerd dat het in de zomer 60 tot 80 % van de behoefte dekt en in de winter ongeveer 20 tot 30 %.

- Warmwaterbehoefte: het verbruik wordt geschat op ongeveer 30 tot 50 liter water van 60 °C per persoon per dag (ofwel 800 tot 1000 kWh/jaar/persoon).
- Opvangoppervlak: Over het algemeen wordt uitgegaan van 0,8 tot 1,2 m² vlakke glazen collectoren per persoon. Een gezin van 4 personen heeft dus tussen de 4 en 6 m² panelen nodig.
- Opslagvolume: De opslagratio is cruciaal voor de stabiliteit van het systeem. Aanbevolen wordt 50 tot 75 liter opslag per m² collector. Dit volume zorgt voor een "buffereffect" waardoor één tot twee dagen met weinig zonlicht, afhankelijk van het gebruik, kunnen worden opgevangen zonder dat er een aanvullende verwarming nodig is.

7.3. DIMENSIONERING VOOR VERWARMING EN COLLECTIEF GEBRUIK

Zodra verwarming of collectieve behoeften worden geïntegreerd, wordt de dimensionering complexer.

- **Verwarming (SSC):** Het oppervlak van de collector wordt vaak met een factor 2 of 3 vergroot ten opzichte van alleen warm water (ongeveer 10 tot 15 m² voor een eengezinswoning). Om oververhitting in de zomer te voorkomen, wordt de voorkeur gegeven aan een **sterke helling (60°)**: dit bevordert de opvang van de lage zon in de winter (verwarmingsbehoefte) en beperkt de blootstelling aan de verticale zon in de zomer.
- **Collectieve toepassingen (woningen, ziekenhuizen):** Het zonneoppervlak is vaak beperkt tot **10-30 % van het beschikbare dakoppervlak**. Opslag speelt een centrale rol, niet alleen voor het dagelijks egaliseren, maar ook voor het beheer van piekverbruik.
- **Systeemintegratie:** De efficiëntie wordt vertienvoudigd wanneer het systeem wordt gekoppeld aan **lage-temperatuur-emitters** (vloerverwarming of overgedimensioneerde radiatoren), want hoe lager de retourtemperatuur van het verwarmingscircuit, hoe beter het rendement van de zonnecollectoren (vermindering van de term in de vergelijking van Hottel-Whillier).

³ De zonne fractie, vaak aangeduid als f , verwijst naar de verhouding tussen de bruikbare thermische energie die door de zonne-installatie wordt geleverd en de totale thermische vraag of belasting van het gebouw (behoefte aan sanitair warm water en verwarming). Deze factor staat centraal in de door Duffie en Beckman ontwikkelde F-Chart-methode, waarmee de prestaties van een systeem kunnen worden voorspeld door de geabsorbeerde zonne-energie en de warmteverliezen van de collectoren met elkaar te vergelijken. Een index van 0,6 (f) betekent dat 60 % van de jaarlijkse behoefte door de zon wordt gedekt en de resterende 40 % door de bijverwarming.

8. Rendementscurves en prestaties van collectoren

De prestaties van een thermische zonnecollector kunnen niet worden samengevat in een eenvoudig percentage dat in een commerciële brochure wordt vermeld. Ze worden in de fundamentele fysische modellen beschreven door de Hottel-Whillier-vergelijking, die het nuttige vermogen uitdrukt. In tegenstelling tot veel andere energietechnologieën **hangt het rendement van een zonnecollector rechtstreeks af van de bedrijfsomstandigheden**, met name de temperatuur waarbij hij werkt en de beschikbare zonnestraling.

Om een objectieve vergelijking tussen collectoren mogelijk te maken, worden de prestaties gemeten volgens de norm **EN ISO 9806** en beschreven door een relatie van het momentane rendement:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

In deze uitdrukking staat η_0 voor het optische rendement van de collector, d.w.z. zijn vermogen om zonnestraling te absorberen wanneer zijn temperatuur dicht bij die van de omgevingslucht ligt. De coëfficiënten a_1 en a_2 geven respectievelijk de lineaire en stralingswarmteverliezen weer, die toenemen wanneer de collector bij een hogere temperatuur werkt. De term $(T_m - T_a)/G$ vat dus het thermische verschil met de omgeving en de intensiteit van de zonnestraling samen.

Deze formulering benadrukt een fundamenteel punt: **het rendement van een zonnecollector is nooit constant**. Het neemt geleidelijk af naarmate de bedrijfstemperatuur stijgt, omdat de warmteverliezen groter worden.

Bij een klein temperatuurverschil tussen de collector en de omgevingslucht blijft het rendement dicht bij het maximum. In deze omstandigheden komt het potentieel van thermische zonne-energie volledig tot zijn recht, met name voor de productie van sanitair warm water, het verwarmen van zwembaden of de voeding van lage-temperatuurnetwerken. Wanneer de gevraagde temperatuur stijgt, nemen de warmteverliezen toe en daalt het rendement geleidelijk. Bij zeer hoge temperaturen zijn het vooral de stralingsverliezen die de overhand hebben, wat leidt tot een snellere daling van de prestaties.

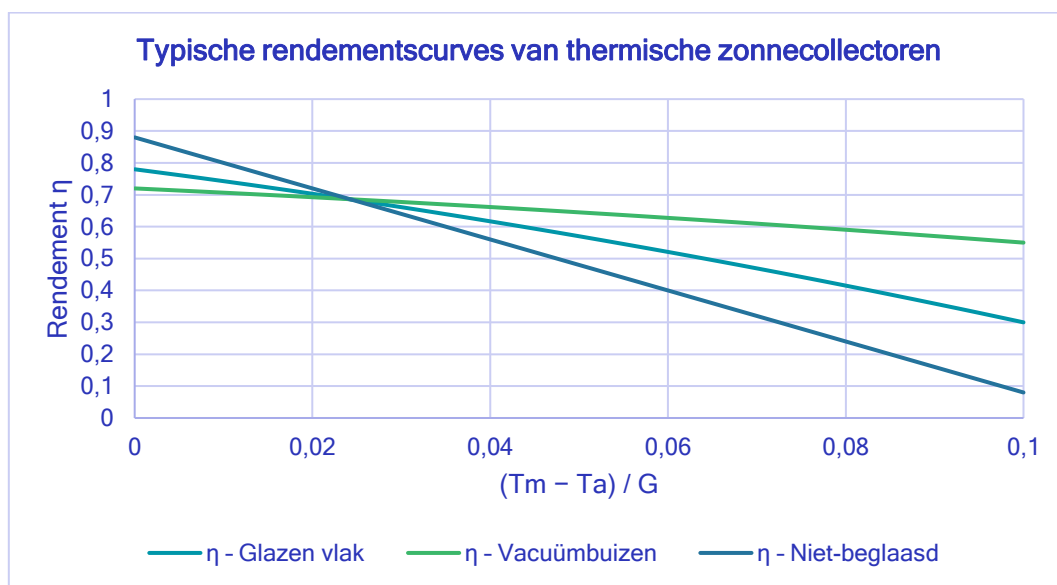
Deze ontwikkeling wordt weergegeven door de **rendementscurves**, waarmee de verschillende collectortechnologieën objectief kunnen worden vergeleken. Vlakke glazen collectoren hebben over het algemeen een uitstekend optisch rendement in het begin, waardoor ze bijzonder goed presteren bij lage en gemiddelde temperaturen. Daar staat tegenover dat hun warmteverliezen sneller toenemen wanneer de temperatuur van de vloeistof stijgt. Omgekeerd beperken vacuümbuiscollectoren dankzij hun versterkte isolatie deze verliezen sterk en behouden ze betere prestaties wanneer het temperatuurverschil met de buitenlucht groot wordt.

Er bestaat dus geen 'beste collector' in absolute zin. **De geschiktheid van een technologie hangt vooral af van het temperatuurbereik van het systeem** waarin ze wordt geïntegreerd. Een correct gedimensioneerde vlakke collector zal vaak efficiënter en zuiniger zijn voor een sanitair warmwatersysteem, terwijl een vacuümbuiscollector in het voordeel is voor toepassingen die hogere temperaturen vereisen of in koude klimaten.

Naast de specifieke kenmerken van de collectoren zijn de werkelijke prestaties sterk afhankelijk van de bedrijfsomstandigheden. De retourtemperatuur naar de collector speelt een doorslaggevende rol: hoe kouder de terugkerende vloeistof, hoe beter het rendement. Daarom zijn thermische zonne-energiesystemen bijzonder efficiënt wanneer ze worden gecombineerd met lage-temperatuur-emitters en goed gelaagde opslagtanks. Ook de oriëntatie, de hellingshoek, de blootstelling aan de wind en de kwaliteit van de hydraulische regeling zijn van invloed op de jaarlijkse nuttige productie.

Ten slotte is het essentieel om een onderscheid te maken tussen het **momentane rendement van de collector**, gemeten in het laboratorium, en **het totale rendement van het systeem** over een volledig jaar. De opslag, de verliezen in de leidingen, de regelstrategie en de afstemming tussen de zonne-energieproductie en de werkelijke behoeften hebben vaak een grotere invloed op de uiteindelijke prestaties dan de keuze voor een collector die op papier iets beter presteert.

Deze interpretatie van de rendementscurves herinnert aan een realiteit die in het energiebeleid vaak wordt onderschat: **wanneer de uiteindelijke behoefte warmte is, is de directe productie van zonnewarmte thermodynamisch efficiënter dan elke indirecte omzetting via elektriciteit**. Juist bij deze toepassingen, bij gematigde temperaturen en goed geïntegreerd in een coherent systeem, komt het volledige potentieel van thermische zonne-energie voor de energietransitie tot uiting.



Typische rendementscurves van thermische zonnecollectoren (Belgisch geval).

De curven illustreren de invloed van het temperatuurregime op de prestaties van verschillende collectortechnologieën. De coëfficiënten zijn representatief voor gangbare installaties in België en zijn bedoeld voor een kwalitatieve vergelijking van de thermische prestaties.

Hoe leest u deze curve?

Aan de linkerkant van de grafiek, wanneer de term $(T_m - T_a)/G$ laag is, werkt de sensor bij een temperatuur die dicht bij de omgevingstemperatuur ligt. In dit gebied **vertonen alle sensoren een hoog rendement**, met een duidelijk voordeel voor sensoren zonder glas en vlakke sensoren met glas. Dit regime komt overeen met toepassingen bij lage temperaturen, zoals het verwarmen van zwembaden, sanitair warm water of warmtenetten met zeer lage temperaturen.

Wanneer de bedrijfstemperatuur stijgt, lopen de curven duidelijk uiteen. Het rendement van onbeglaasde collectoren daalt snel, omdat hun warmteverliezen zonder isolatie hoog

zijn. Beglaasde vlakke collectoren behouden goede prestaties bij gematigde temperaturen, maar hun rendement neemt geleidelijk af naarmate het temperatuurverschil toeneemt.

Vacuümbuiscollectoren onderscheiden zich door een veel vlakkere helling: dankzij hun versterkte isolatie **beperken ze het warmteverlies sterk** en behouden ze een hoog rendement, zelfs bij hoge bedrijfstemperaturen. Deze eigenschap verklaart hun geschiktheid voor koude klimaten, collectieve of industriële toepassingen en systemen die hogere temperaturen vereisen dan die van sanitair warm water.

Gebruikte hypothesen (België)

Deze waarden zijn **bewust representatief**, noch optimistisch, noch ongunstig:

- **Referentie-instraling:** $G = 800 \text{ W/m}^2$
(gangbare waarde voor het vergelijken van collectoren in West-Europa)
- Collectoren conform **EN ISO 9806**
- Toepassingen:
 - Collectieve/residentiële warmwatervoorziening
 - lage temperatuur verwarming
 - gematigd klimaat, matige wind

9. Synthèse : comparaison van zonne- en thermische technologieën

Samenvattende vergelijking

Technologie	Opgewekte energie	Typisch rendement	Belangrijkste toepassingen	Sterke punten	Beperkingen
Thermische zonne-energie	Warmte	50-75 %	Warm water, verwarming, industrie	Zeer efficiënt, robuust	Opslag nodig
Fotovoltaïsche energie	Elektriciteit	15-22	Elektriciteit voor alle doeleinden	Veelzijdigheid	Laag rendement per oppervlakte
PVT	Warmte + elektriciteit	Totaal > 60 %	Beperkte oppervlakken, warmtepomp	Dubbele valorisatie	Kosten, complexiteit
Warmtepomp	Warmte	COP 3 tot 5	Verwarming, warm water	Zeer efficiënt	Afhankelijk van een bron

Systemische interpretatie

Deze technologieën zijn geen concurrenten, maar vullen elkaar aan. Een coherente energiestrategie combineert:

- thermische zonne-energie voor directe warmte,
- fotovoltaïsche energie voor elektriciteit,
- warmtepompen voor temperatuurverhoging,
- opslag en mutualisatie voor collectieve optimalisatie.

10. Conclusie: thermische zonne-energie, pijler van onafhankelijke en koolstofvrije warmte

Thermische zonne-energie lijkt een onderbenutte pijler van de energietransitie te zijn. Dankzij de hoge efficiëntie, de technologische maturiteit en de complementariteit met warmtepompen en fotovoltaïsche energie is het een centrale oplossing voor het koolstofarm maken van warmte, met name in coöperatieve en collectieve contexten.

Zonne-energie is geen technologie uit het verleden of een eenvoudige aanvulling op fotovoltaïsche energie, maar een geavanceerde technologische oplossing die een antwoord biedt op de enorme uitdaging van de thermische transitie. De kracht ervan ligt in de fysieke eenvoud: zonne-energie wordt rechtstreeks omgezet in warmte met een rendement van meer dan 70 %, terwijl andere technologieën aanzienlijke conversieverliezen lijden.

Deze technologische verandering wordt gedreven door drie belangrijke factoren:

- **De volwassenheid van de apparatuur:** of het nu gaat om de robuustheid van vlakke collectoren of de prestaties van vacuümbuizen onder extreme omstandigheden, de huidige oplossingen bieden een levensduur van meer dan 25 jaar.
- **Systeemintelligentie:** dankzij een fijne differentiële regeling en innovatieve koppelingen met warmtepompen (PAC) of hybride PVT-panelen, verwarmt thermische zonne-energie niet langer alleen water, maar wordt het het 'brein' van de energievoorziening dat het hele verwarmingssysteem stabiliseert en optimaliseert.
- **De overgang naar collectief gebruik:** De toekomst van de technologie tekent zich af op wijkniveau. Door middel van nieuwe generatie warmtenetten en seizoenoverschrijdende opslag maakt thermische zonne-energie het mogelijk om middelen te delen en zo te zorgen voor goedkope energie, beschermd tegen schommelingen op de elektriciteitsmarkt.

Kortom, zonnewarmte is een lokale, onuitputtelijke en direct bruikbare bron. Zonne-energie weer de plaats geven die het verdient in de energiemix is niet alleen een technische keuze, maar ook een onmisbare stap op weg naar duurzame en solidaire Europese energieonafhankelijkheid.

Bibliografie

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4e ed.). Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9781118671603.fmatter>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (n.d.). *Publications on solar thermal and PVT technologies*. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications.html>
- IEA Solar Heating and Cooling Programme. (2020). *Solar heat worldwide: Global market development and trends*. International Energy Agency. <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>
- IEA Solar Heating and Cooling Programme. (2018-2022). *Task 60: PVT Systems - Application of photovoltaic-thermal solar energy in buildings*. International Energy Agency. <https://task60.iea-shc.org>
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2e ed.). Academic Press. https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Solar/Solar_Energy_Engineering-Processes_and_Systems.pdf
- Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2018). *Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2739-2763. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.067>
- Nouvenergie. (s.d.). *Rendement des capteurs thermiques*. M2E - Marc Seguin. <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-1/rendement-capteurs/>
- Solar Keymark Network. (n.d.). *Solar Keymark database*. <https://www.solarkeymark.org>
- Van Espen, R. (2025, 2 april). *Fotovoltaïsche-thermische panelen (PVT): is dit onbekende alternatief voor zonnepanelen geschikt voor particulieren?* Trends-Tendances. <https://trends.levif.be/immo/panneaux-photovoltaïques-thermiques-pvt-cette-alternative-meconnue-aux-panneaux-solaires-est-elle-adaptee-aux-particuliers/>
- Verein Deutscher Ingenieure. (2014). *VDI 6002 - Solar heating: Fundamentals, system technology and applications*. VDI Verlag. <https://www.vdi.de/en/home> (toegang tot catalogus)
- Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2021). *Solar heat worldwide - Global market development and trends*. IEA SHC Task.
- Wu, H., Lv, X., Zhang, X., Ji, Z., & Zhu, J. (2023). *Onderzoeksvoortgang van seizoensgebonden thermische energieopslagstechnologie op basis van onderkoelde faseveranderingsmaterialen*. Journal of Energy Storage, 68, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107378>
- Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 891-959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.012>