



Warmtebeeldcamera's: snelle en betrouwbare tools voor het testen van zonnepanelen.

Kwaliteitsbewaking is van essentieel belang voor zonnepanelen. Een storingsvrije werking van de panelen is een voorwaarde voor efficiënte stroomopwekking, een lange levensduur en een hoge ROI. Om deze storingsvrije werking te waarborgen, is een snelle, eenvoudige en betrouwbare methode voor het beoordelen van de prestaties van het zonnepaneel vereist. Zowel tijdens het productieproces als na de installatie van het paneel.

De toepassing van warmtebeeldcamera's voor de inspectie van zonnepanelen biedt diverse voordelen. Afwijkingen zijn duidelijk zichtbaar op een scherp warmtebeeld. Bovendien kunnen warmtebeeldcamera's in tegenstelling tot andere methodes worden ingezet voor het scannen van geïnstalleerde zonnepanelen terwijl deze in gebruik zijn. Ook kunnen warmtebeeldcamera's binnen een kort tijdsbestek grote oppervlakken scannen.

Binnen R&D zijn warmtebeeldcamera's al een beproefde tool voor de inspectie van zonnecellen en -panelen. Voor deze geavanceerde metingen worden doorgaans hoogwaardige camera's met gekoelde detectoren gebruikt onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden.

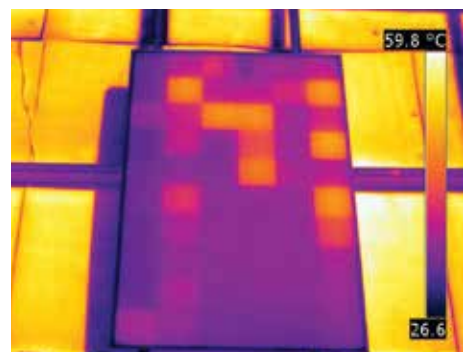
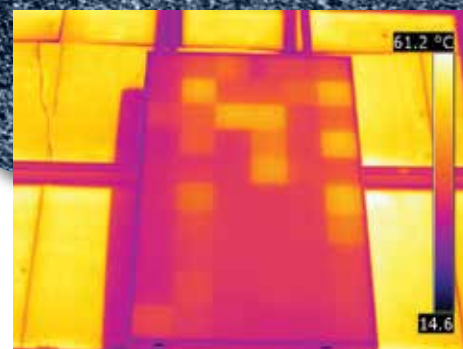
De toepassing van warmtebeeldcamera's voor de inspectie van zonnepanelen beperkt zich echter niet alleen tot het onderzoeksdomein. Momenteel worden ongekoelde warmtebeeldcamera's steeds meer ingezet voor kwaliteitscontroles van zonnepanelen vóór installatie en onderhoudsinspecties na plaatsing. Deze betaalbare hand-held camera's zijn compact en licht, waardoor ze flexibel inzetbaar zijn in de praktijk.

Met behulp van een warmtebeeldcamera kunnen potentiële problemen worden gedetecteerd en opgelost voordat er echte problemen of storingen optreden. Niet alle warmtebeeldcamera's zijn echter geschikt

voor de inspectie van zonnecellen. Bovendien moeten er voor efficiënte inspecties en het trekken van de juiste conclusies bepaalde regels en richtlijnen in acht genomen worden. De voorbeelden in dit artikel zijn gebaseerd op fotovoltaïsche modules met kristallijne zonnecellen. De regels en richtlijnen zijn echter ook van toepassing op de thermografische inspectie van thin-film modules omdat de uitgangspunten van thermografie hetzelfde zijn.

Procedures voor de inspectie van zonnepanelen met warmtebeeldcamera's

Tijdens de ontwikkeling en het productieproces worden zonnecellen elektrisch of met flitslicht getriggerd. Dit zorgt voor voldoende thermisch contrast voor nauwkeurige thermografische metingen. Omdat deze methode niet kan worden toegepast bij het testen van geïnstalleerde zonnepanelen moet de operator ervoor zorgen dat er voldoende energie wordt geleverd door de zon.



Thermogram met niveau en bereik in automatische modus (boven) en handmatige modus (onder).

Voor voldoende thermisch contrast bij het inspecteren van zonnepanelen in het veld, is een zonnestraling van 500 W/m² of hoger vereist. Voor een optimaal resultaat wordt een zonnestraling van 700 W/m² geadviseerd. Zonnestraling staat voor een stroompiek op een oppervlak uitgedrukt in kW/m², die gemeten kan worden met een pyranometer (voor de globale zonnestraling) of een pyrhelimeter (voor de directe zonnestraling). Deze is sterk afhankelijk van de locatie en de lokale weersomstandigheden. Ook lage buitentemperaturen kunnen bijdragen aan een hoger thermisch contrast.

Wat voor soort camera heeft u nodig?

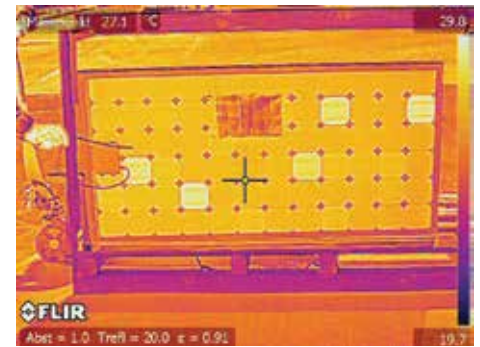
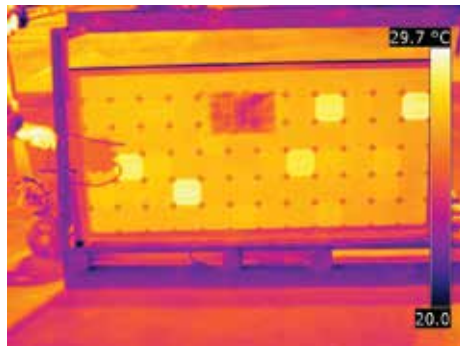
Handheld warmtebeeldcamera's voor predictieve onderhoudsinspecties hebben doorgaans



een ongekoelde microbolometerdetector met een gevoeligheid tussen de 8–14 μm . Glas is echter niet transparant in dit spectrum. Als zonnecellen aan de voorzijde worden geïnspecteerd, ziet een warmtebeeldcamera de warmteverdeling op het glazen oppervlak. De warmteverdeling in de onderliggende cellen wordt slechts indirect waargenomen. Daarom worden er slechts geringe temperatuurverschillen gemeten en waargenomen op het glazen oppervlak. Om deze verschillen zichtbaar te maken, moet de warmtebeeldcamera voor deze inspecties beschikken over een thermische gevoeligheid van $\leq 0,08\text{K}$. Om de kleine temperatuurverschillen in het warmtebeeld goed te kunnen waarnemen, moeten het niveau en het bereik van de camera handmatig ingesteld kunnen worden.

Fotovoltaïsche modules worden over het algemeen gemonteerd op een sterk reflecterend aluminium frame, dat op het warmtebeeld wordt getoond als een koud oppervlak omdat het de thermische straling reflecteert. In de praktijk betekent dit dat de warmtebeeldcamera de temperatuur van het frame registreert als ver onder de 0°C . Omdat de histogramnivellerings van de warmtebeeldcamera zich automatisch aanpast aan de gemeten max. en min. temperaturen, zijn veel kleine thermische afwijkingen niet direct zichtbaar. Voor een warmtebeeld met hoog contrast zouden het niveau en het bereik continu handmatig gecorrigeerd moeten worden.

De DDE (Digital Detail Enhancement)-functie biedt hiervoor de oplossing. DDE optimaliseert automatisch het beeldcontrast van HDR-opnames, zodat het warmtebeeld niet meer handmatig aangepast hoeft te worden. Een



Warmtebeeld zonder DDE (links) en met DDE (rechts).

warmtebeeldcamera met DDE is daarom uitermate geschikt voor snelle en nauwkeurige inspecties van zonnepanelen.

Handige functies

Een andere nuttige functie voor een warmtebeeldcamera is het taggen van warmtebeelden met GPS-data. Dit vereenvoudigt de opsporing van defecte modules binnen grote oppervlakken, zoals zonneparken en het linken van de warmtebeelden aan de apparatuur, bijvoorbeeld in rapporten.

De warmtebeeldcamera moet zijn uitgerust met een geïntegreerde digitale camera zodat het bijbehorende visuele beeld (digitale foto) kan worden opgeslagen bij het desbetreffende warmtebeeld. Ook handig is de zgn. fusion-modus, waarmee warmtebeelden en visuele beelden over elkaar gelegd kunnen worden. Voice- en tekstcommentaren die kunnen worden opgeslagen in de camera bij het warmtebeeld zijn handig bij rapportages.

Camera positioneren: houd rekening met reflectie en emissiviteit

Hoewel glas in het 8–14 μm spectrum een emissiviteit heeft van 0,85–0,90 is het uitvoeren van thermische metingen op glazen oppervlakken niet eenvoudig. Glasreflecties zijn spiegelend, wat betekent dat omliggende objecten met verschillende temperaturen duidelijk zichtbaar zijn op het warmtebeeld. In het ongunstigste geval resulteert dit in verkeerde interpretaties (valse "hot spots") en meetfouten.

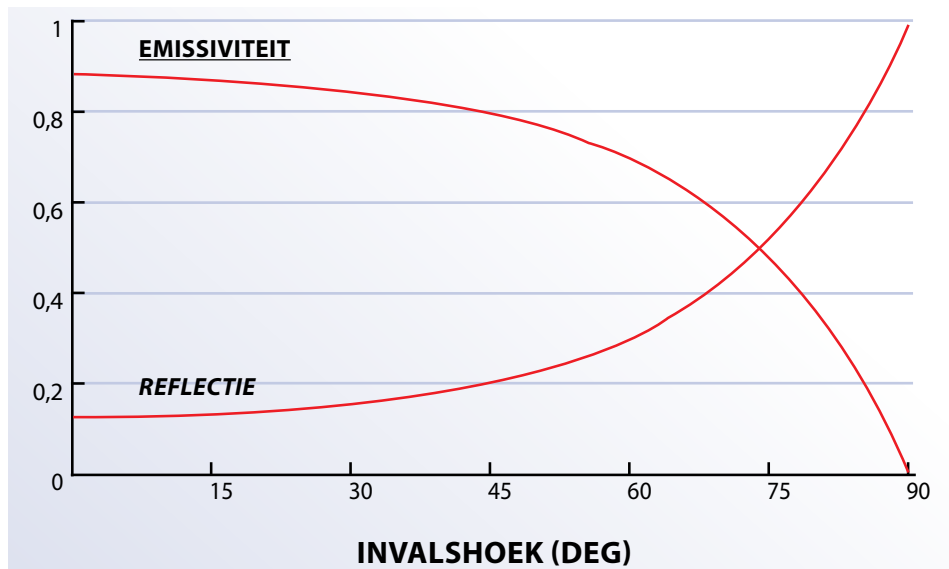
Om reflectie van de warmtebeeldcamera en de operator in het glas te voorkomen, moet de camera niet loodrecht op de geïnspecteerde module worden geplaatst. De emissiviteit is echter het hoogste als de camera loodrecht wordt geplaatst en neemt af als de hoek waaronder de camera staat groter wordt. Een kijkhoek van 5–60° is een uitstekend compromis (0° is loodrecht).

Observaties op afstand

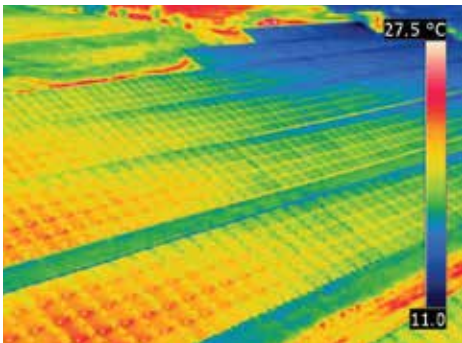
Het is niet altijd eenvoudig om een geschikte kijkhoek te realiseren tijdens de meetopstelling. Het gebruik van een statief biedt in de meeste gevallen uitkomst. Bij lastigere omstandigheden kan het nodig zijn een mobiel werkplatform te gebruiken of zelfs met een helikopter over de zonnecellen te vliegen. In deze gevallen



Aanbevolen kijkhoek (groen) en te vermijden kijkhoek (rood) bij thermografische inspecties.



Hoek afhankelijk van emissiviteit van glas



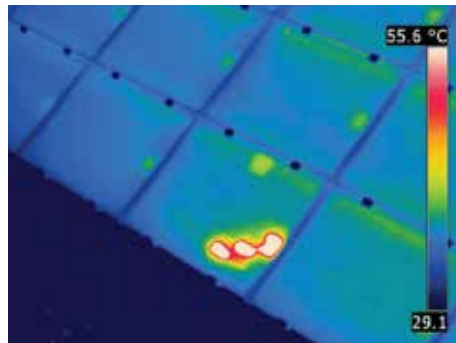
Om geen foutieve conclusies te trekken, moet de warmtebeeldcamera onder de juiste hoek worden gehouden bij de inspectie van zonnepanelen.

kan een langere afstand tot het doel voordeel opleveren omdat er in één keer een groter oppervlak waargenomen kan worden. Om de kwaliteit van het warmtebeeld te waarborgen, moet er voor deze langere afstanden een warmtebeeldcamera met een beeldresolutie van minimaal 320 x 240 pixels worden gebruikt, bij voorkeur van 640 x 480 pixels.

Daarnaast moet de camera zijn uitgerust met een verwisselbare lens, zodat de operator kan overschakelen op een telelens voor observaties op afstand, bijvoorbeeld vanuit een helikopter. We raden echter aan alleen telelensen te gebruiken in combinatie met warmtebeeldcamera's met een hoge beeldresolutie. Bij langeafstandsmetingen met behulp van een telelens kunnen warmtebeeldcamera's met een lage resolutie geen kleine thermische details waarnemen die een indicatie zijn voor zonnepaneeldefecten.

Bekijk het eens van de andere kant

In de meeste gevallen kunnen geïnstalleerde fotovoltatische modules ook vanaf de achterzijde met een warmtebeeldcamera geïnspecteerd worden. Deze methode beperkt storende reflecties van de zon en de wolken tot een minimum. Daarnaast kunnen de temperaturen



Warmtebeeld gemaakt met een FLIR P660-camera tijdens een vlucht over een zonnepark. (Thermogram van Evi Müllers, IMM)

aan de achterzijde hoger zijn, omdat de cel direct wordt gemeten in plaats van door het glazen oppervlak.

Omgevings- en meetcondities

Thermografische inspecties moeten bij onbewolkt weer worden uitgevoerd omdat wolken de straling van de zon beperken en ook zorgen voor interferentie vanwege reflectie. Informatieve beelden kunnen echter ook worden verkregen als het bewolkt is, mits er gebruik wordt gemaakt van een gevoelige warmtebeeldcamera. Weinig wind is ook gewenst omdat luchtstromen op het oppervlak van de zonnemodule resulteren in convectieve koeling en daarmee een reductie van de thermische gradiënt. Hoe kouder de luchttemperatuur, hoe hoger het potentiële thermische contrast. Een optie is het uitvoeren van thermische inspecties in de vroege ochtend.

Een andere manier om het thermische contrast te verhogen, is het ontkoppelen van de cellen, waardoor de elektrische stroom wordt onderbroken zodat er alleen warmte ontstaat door uitsluitend zonnestraling. Als het systeem vervolgens wordt belast, worden de cellen bekeken in de opwarmingsfase.

Onder normale omstandigheden zou het systeem echter geïnspecteerd moeten worden onder standaard bedrijfsomstandigheden, namelijk belast. Afhankelijk van het type cel en het soort fout of defect, kunnen onbelaste metingen of kortsluiting extra informatie opleveren.

Meetfouten

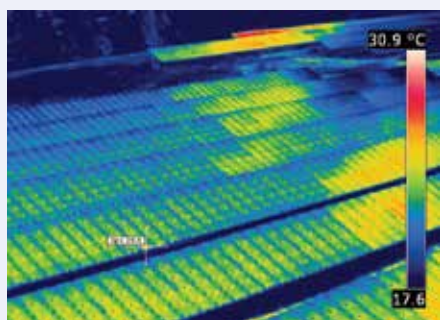
Meetfouten treden voornamelijk op door een slechte positionering van de camera of suboptimale omgevings- of meetcondities. Vaak worden meetfouten veroorzaakt door:

- te lage kijkhoek
- verandering in zonnestraling na verloop van tijd (bijv. door veranderingen in het wolkendeck)
- reflecties (bijv. zon, wolken, naastgelegen hogere gebouwen, meetopstellingen)
- gedeeltelijke schaduwvorming (bijv. door naastgelegen gebouwen of andere constructies).

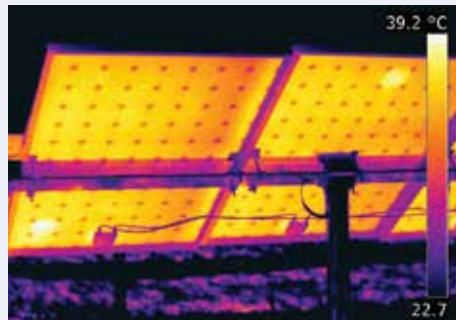
Wat is er zichtbaar op het warmtebeeld?

Als sommige delen van het zonnepaneel warmer zijn dan andere, zijn de warme delen duidelijk zichtbaar op het warmtebeeld. Afhankelijk van de vorm en de locatie kunnen deze hot spots en warme delen op verschillende problemen duiden. Als een volledige module warmer is dan normaal, kan dit wijzen op aansluitingsproblemen. Als individuele cellen of reeksen van cellen opkomen als een hot spot of een warmer 'patchwork-patroon', is de oorzaak meestal een defecte bypassdiode, kortsluiting of een slechte celcombinatie.

Schaduwvorming en scheuren in cellen verschijnen als hot spots of veelhoekige patronen in het warmtebeeld. De temperatuurstijging van een cel of deel van een cel duidt op een defecte cel of schaduwvorming. De warmtebeelden die belast, onbelast of bij kortsluiting zijn gemaakt, moeten met elkaar worden vergeleken. Een vergelijking van de warmtebeelden aan de voorzijde en achterzijde van de module kan ook

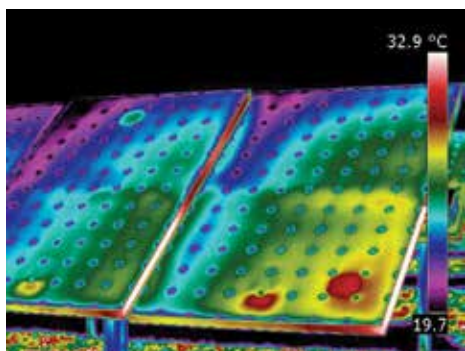


Dit warmtebeeld toont grotere oppervlakken met hogere temperaturen. Zonder aanvullende informatie is het niet duidelijk of deze thermische afwijkingen betreffen of schaduwen/reflecties.

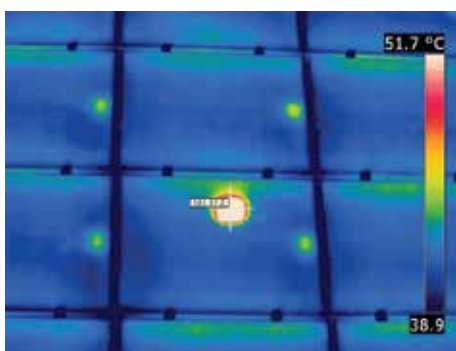


Warmtebeeld van de achterzijde van een zonnemodule gemaakt met een FLIR P660-camera. Het bijbehorende visuele beeld wordt rechts getoond.

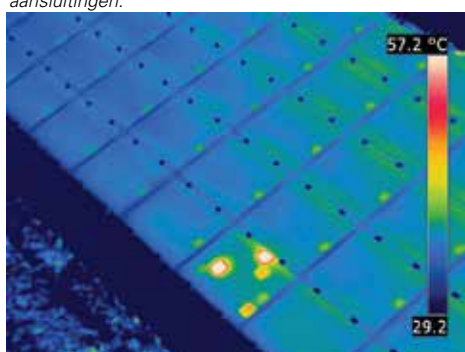




Deze rode punten duiden op modules die aanhoudend warmer zijn dan de overige, wat wijst op foutieve aansluitingen.



Deze hot spot in één zonnecel wijst op schade aan de cel.



Dit warmtebeeld laat een voorbeeld zien van het zgn. 'patchwork-patroon', dat aangeeft dat dit paneel een defecte bypassdiode heeft.

waardevolle informatie verschaffen. Voor een correcte identificatie van het probleem moeten de modules die afwijkingen laten zien uiteraard ook elektrisch en visueel geïnspecteerd worden.

Conclusies

De thermografische inspectie van fotovoltaïsche modules spoort potentiële defecten op cel- en moduleniveau snel op en detecteert mogelijke elektrische aansluitproblemen. De inspecties worden onder normale bedrijfsomstandigheden uitgevoerd en vereisen geen onderbreking van het systeem.

Voor goede en informatieve warmtebeelden moet er rekening worden gehouden met bepaalde omstandigheden en meetprocedures:

- er moet gebruik worden gemaakt van een geschikte warmtebeeldcamera met de juiste accessoires;
- er is voldoende zonnestraling vereist (minstens 500 W/m² – bij voorkeur meer dan 700 W/m²);
- de kijkhoek moet zich tussen de veilige marges bevinden (tussen 5° en 60°);
- schaduwvorming en reflecties moeten voorkomen worden.

Warmtebeeldcamera's worden voornamelijk gebruikt voor het opsporen van defecten. De kwalificatie en beoordeling van de gedetecteerde afwijkingen vereisen gedegen kennis van zonne-energietechnologie, kennis van het geïnspecteerde systeem en aanvullende elektrische metingen. Juiste documentatie is uiteraard een must en moet alle inspectieomstandigheden, aanvullende metingen en andere relevante informatie bevatten.

Inspecties met een warmtebeeldcamera - die beginnen met kwaliteitscontrole in de installatiefase, gevolgd door regelmatige controles - faciliteren een complete en eenvoudige systeembewaking. Dit waarborgt het functioneren van de zonnepanelen en verlengt hun levensduur. De inzet van warmtebeeldcamera's zal daarom een aanzienlijke verbetering opleveren voor de ROI van de exploitant.

Soort fout	Voorbeeld	Verschijnt op warmtebeeld als
Fabricagefout	Verontreiniging en gasbellen	Een 'hot spot' of 'cold spot'
	Scheuren in cellen	Warme cellen, voornamelijk langwerpig van vorm
Schade	Scheuren	Warme cellen, voornamelijk langwerpig van vorm
	Scheuren in cellen	Een deel van een cel ziet er warmer uit
Tijdelijke schaduwvorming	Vervuiling	Hot spots
	Vogelpoep	
	Vocht	
Defecte bypassdiode (veroorzaakt kortsluiting en doet afbreuk aan kortsluitingsbeveiliging)	N.v.t.	Een 'patchwork-patroon'
Foutieve aansluitingen	Module of reeks modules niet aangesloten	Module of reeks modules is aanhoudend warmer

Tabel 1: Lijst van veelvoorkomende modulefouten (Bron: ZAE Bayern e.V., "Überprüfung der Qualität von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Aufnahmen" ["Kwaliteitscontrole van fotovoltaïsche modules met warmtebeelden"], 2007)

Ga voor meer informatie naar www.flir.com of neem contact op met:

FLIR Commercial Systems B.V.
 Charles Petitweg 21
 4847 NW Breda - Nederland
 Telefoon : +31 (0) 765 79 41 94
 Fax : +31 (0) 765 79 41 99
 e-mail : flir@flir.com
www.flir.com