

Infrarood detectie van lekken

K. Schurer*

Samenvatting

Er zijn twee soorten lekken te onderscheiden in ruimten voor gekoelde bewaring: warmtelekken, waarbij warmte (koude) verloren gaat door delen met een slechte isolatie, en luchtlekken, waarbij door openingen in de wand een direct contact tussen binnen en buiten bestaat.

Na een beschouwing over straling van oppervlakken en over thermografie, wordt ingegaan op de mogelijkheden om lekken van beide soorten met thermografie op te sporen. Voor een goed resultaat moet aan enkele voorwaarden worden voldaan: het oppervlak moet een hoge emissiefactor hebben, en er moet geen vals temperatuurbeeld ontstaan door plaatselijke verschillen in zonnestraling, wind of regen. Voor het detecteren van warmtelekken is thermografie dan een unieke methode, voor luchtlekken is thermografie een efficiënt hulpmiddel om de plaats te bepalen.

Summary

Infrared detection of leaks

Leaks in buildings for cold storage are distinguished in two categories. Thermal leaks are parts of the construction with poor thermal isolation, air leaks are openings in the walls through which a more or less free flow of air is possible.

The principles of thermal infrared and thermography are outlined, and the applications to the detection of both types of leaks are discussed. When some requirements are met - high emissivity of the surface to be studied, absence of local heating or cooling (sun, wind, rain) - thermography is a unique method for the detection of thermal leaks and a powerful tool for localizing air leaks.

1 Inleiding

Bij een ruimte voor gekoelde bewaring kan het woord 'lekken' in twee betekenissen gebruikt worden. Om te beginnen kan het slaan op die delen van de constructie waar door de aard van de constructie of door gebreken de warmtetransmissie door de wand veel groter is dan elders: warmtelekken. Vervolgens kan het ook slaan op plaatsen in de constructie van een dichte cel (bijvoorbeeld een CA-cel) waar een opening aanwezig is, waardoor direct contact tussen de atmosfeer binnen en buiten bestaat: luchtlekken.

In beide gevallen is er sprake van warmteverliezen waarvoor extra koelvermogen nodig is, in het tweede geval kan het ook moeite kosten in de cel de gewenste samenstelling van de atmosfeer te bereiken en te behouden.

Voor het opsporen van warmtelekken begint thermografie, het vormen van een zichtbaar beeld van de door een voorwerp uitgezonden infrarode straling, een veel gebruikte methode te worden (1). Voor het opsporen van luchtlekken zijn verschillende methoden in gebruik (2). De mogelijkheden van thermografie zijn hier nog weinig benut. Het begrip 'infrarood' moet hier nog wat gepreciseerd worden. Infrarood is een aanduiding voor het deel van het electromagnetisch spectrum, dat ligt tussen het zichtbare en het microgolfg gebied, in golflengte uitgedrukt tussen 0,76 en 1000 μm .

In dit gebied zijn drie gedeelten te onderscheiden.

- Kortgolvig infrarood met golflengten tot ca 2,5 μm , uitgezonden door stralingsbronnen met een hoge temperatuur (de zon, gloeilampen). Voorwerpen van omgevingstemperatuur zenden geen kort-

golvig infrarood uit, maar zullen het wel absorberen, doorlaten of reflecteren, juist zoals dat ook met zichtbare straling gebeurt. Infrarood fotografie is mogelijk met speciaal gesensibiliseerd materiaal tot ca 1,3 μm .

- Thermisch infrarood met golflengten tussen 3 en 50 μm , afkomstig van voorwerpen met een temperatuur in de orde van de normale omgevingstemperatuur. Voor thermografie en voor infraroodthermometrie wordt van de atmosferische vensters (3-5 μm en 8-14 μm) in het thermisch infrarood gebruik gemaakt.
- Ver infrarood met golflengten groter dan 50 μm , afkomstig van moleculen in de gasfase of van koude voorwerpen in de wereldruimte. Infrarood astronomie werkt in het ver infrarood.

2 Thermografie

Ieder voorwerp met een temperatuur boven die van het absolute nulpunt zendt electromagnetische straling uit. Voor temperaturen tussen 10 K en 600°C ligt het overgrote deel van de uitgezonden straling in het infrarode deel van het spectrum.

Thermografie is een meetmethode, waarbij van een voorwerp punt voor punt wordt gemeten hoeveel infrarode straling wordt uitgezonden. Door aan de gemeten intensiteit een grijs- of een kleurtoon toe te kennen kunnen de ontvangen gegevens elektronisch worden omgezet in een zwart/wit of een kleurenbeeld op een beeldscherm. Op deze wijze wordt dus het warmtebeeld omgezet in een zichtbaar beeld (3).

In principe kan infrarode straling op dezelfde manier in elektrische signalen worden omgezet als zichtbare straling. Er zijn echter wel enkele complicaties. De gevoeligste detectoren, zowel in het zichtbaar als in het infrarood zijn quantumdetecto-

ren, dat wil zeggen componenten waarin een geabsorbeerd stralingsquantum een ladingsdrager (electron of gat) vrijmaakt. In het thermisch infrarood is nu de energie-inhoud van een quantum maar weinig groter dan de gemiddelde kinetische energie van een elementair deeltje bij kamertemperatuur. Daarom worden ook bij afwezigheid van straling grote aantallen vrije ladingsdragers geproduceerd met als resultaat een zeer slechte signaal/ruisverhouding voor de detector. Voor een wezenlijke verbetering moet de detector gekoeld worden. Gebruikelijk is te koelen tot 77 K (kookpunt van stikstof).

De meest gebruikte detectormaterialen zijn indium-antimonide (InSb) voor golflengten rond 5 μm en kwik-cadmium telluride ($\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$) voor golflengten rond 10 μm . Het is met deze materialen al wel gelukt om een aantal detectoren op een rij te vervaardigen (tot 64 elementen op een lengte van ca 10 mm). Het vervaardigen van opnemers met een groot aantal onderling gelijke elementen in een tweedimensionaal patroon is nog lang niet binnen bereik. Afgezien dus van de koeling kan ook om deze technologische reden een infraroodcamera nog niet de eenvoudige opbouw hebben, die we van de TV-camera kennen. Een infraroodcamera zal dan ook met behulp van draaiende spiegels of prisma's het beeld over de detector heen en weer en op en neer bewegen.

De beelddefinitie is in de regel minder mooi dan we gewend zijn van een TV-beeld: zo'n 15 000 tot 30 000 onafhankelijke beeldpunten bij de infraroodcamera tegenover het 8 à 10-voudige aantal bij de TV-camera. Wel is bij moderne systemen gebruikelijk, dat de gegevens volgens de standaard TV-norm beschikbaar komen. In de laatste jaren is een alternatief voor de quantumdetector verschenen in de vorm van de pyro-electrische detector. Het gaat hierbij om een thermische detector waarbij de dielectrische constante van het gevoelige materiaal zeer sterk van de temperatuur afhangt. Dit type detector heeft een gevoeligheid, die niet meer dan een factor 10 onder die van een goede quantumdetector ligt, met als voordeel, dat het materiaal niet gekoeld hoeft te worden. Het is mogelijk gebleken een vidicon (TV-opneembuis) te maken op basis van pyro-electrisch materiaal. Een camera met een dergelijke opneembuis heeft de gedaante van een normale TV-camera, zij het dan ook dat de lens vervangen is door een speciale infrarood lens.

Het grootste bezwaar voor thermografie toepassingen van een pyro-electrische camera is dat de camera alleen een signaal levert voor die plaatsen in het beeld waar de hoeveelheid ontvangen straling verandert. Voor militaire toepassingen en

* Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw, ITDL, Wageningen

voor bewakingsdoeleinden is deze eigenschap gunstig, maar voor thermografie zijn kunstgrepen nodig om toch een volledig beeld te krijgen. Bij de commercieel verkrijgbare pyro-electrische camera's is tot dusver de aandacht gericht op de toepassing voor beveiliging van gebouwen en terreinen.

3 Infrarode straling en lekken

1 Warmtelekken

Voor de grootte van warmteverliezen kan een groot oppervlak met een iets verslechterde isolatie belangrijker zijn dan een paar dm² waar koude en warme lucht alleen maar door een stukje staalplaat van elkaar gescheiden worden. Het is dan ook van belang kleine verschillen in oppervlaktetemperatuur te kunnen waarnemen. Wat in dit verband 'klein' is kan met een rekenvoorbeeld aan de hand van figuur 1 worden afgeleid. Stel dat de warmtegeleidings-coëfficiënt λ de waarde 0,035 W/m.K heeft, dan wordt de warmtestroom ca 7 W/m² en de oppervlaktetemperatuur aan de warme kant 19,3°C.

Is de λ van het isolatiemateriaal door bijvoorbeeld opname van vocht gestegen tot 0,07 W/m.K, dan wordt de warmtestroom ca 13 W/m² en de oppervlaktetemperatuur 18,7°C. Is de isolatie onderbroken door een hardhouten balk met een λ van 0,14 W/m.K, dan wordt daar de warmtestroom ca 25 W/m² en de oppervlaktetemperatuur 17,5°C.

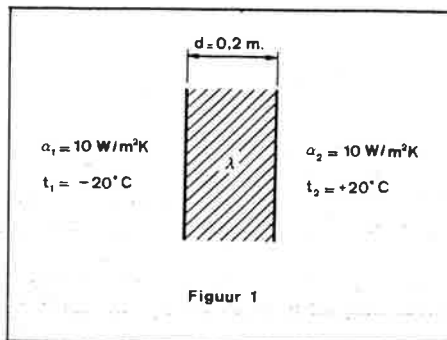
Dergelijke temperatuurverschillen zijn met thermografie zeker aantoonbaar. De kleinste nog te detecteren verschillen liggen echter wel dicht tegen de gevoeligheids-grens van thermografische systemen.

2 Luchtlekken

Bij luchtlekken is door kleinere of grotere openingen in de wanden transport van lucht door de wand mogelijk. Met het transport van lucht gaat ook een warmte-transport gepaard. Daarom kan ook hier thermografie een hulpmiddel zijn voor de detectie van lekken. Bij luchtlekken is alleen een temperatureffect te verwachten aan de kant van de wand, waar de lucht de wand verlaat, dus aan de kant van de laagste druk.

Bij dit soort lekken is thermografie alleen een hulpmiddel voor het opsporen van de plaats, niet voor het bepalen van de grootte. Voor openingen van uiteenlopende vorm en afmetingen bestaat geen vast verband tussen de grootte van de luchtstroom en de waarneembare opwarming of afkoeling.

Verdachte plaatsen zijn in de regel deuren, doorvoeren, reparaties, aansluitingen van panelen, van wanden onderling of van wanden en dak. Een bijzonder geval van lekken vormen deuren. Goed uitgevoerde deuren, die vanwege transport naar en van de koude ruimte enkele uren per dag open staan, kunnen de beste isolatie tot



een illusie maken. In een praktijk-geval hebben we een situatie gezien bij een vrieshuis, waarin het gemiddelde warmteverlies als gevolg van vaak openstaande deuren gelijk was aan het totale warmteverlies door de wanden op een warme dag.

3 Straling van oppervlakken

De spectrale stralingsemittantie $M_{e,\lambda}(\lambda, T)$ van een zwarte straler wordt als functie van de golflengte λ en de temperatuur T beschreven door de wet van Planck:

$$M_{e,\lambda} = c_1 \lambda^{-5} (\exp c_2 / \lambda T - 1)^{-1} d\lambda \quad (1)$$

met $c_1 = 0,374 183 2 \cdot 10^{-15} \text{ W.m}^2$ en $c_2 = 14,387 86 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}$.

Een zwarte straler is een theoretisch voorwerp, dat alle eropvallende straling absorbeert, en - bij iedere temperatuur - een maximale hoeveelheid straling emitteert. Een reëel oppervlak absorbeert slechts een fractie $\alpha(\lambda)$ (α = absorptiefactor) van de erop vallende straling, en emitteert slechts één fractie $\epsilon(\lambda)$ (ϵ = emissiefactor) van wat een zwarte straler bij dezelfde temperatuur en golflengte uitzendt. Volgens de wet van Kirchhoff geldt $\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$. Verder geldt voor een niet doorschijnend voorwerp, dat de som van reflectiefactor $\rho(\lambda)$ en absorptiefactor één is $\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$

en dus ook $\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$. Een infraroodcamera ontvangt van een stralend oppervlak in totaal een stralingsflux Φ_e : $\Phi_e \sim \lambda_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) M_p d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) E_e(\text{omg}) d\lambda$ (2)

Daarin stelt $E_e(\text{omg})$ de bestralingssterkte van het oppervlak voor als gevolg van straling uit de omgeving. De integratiegrenzen λ_1 en λ_2 geven de grenzen van de golflengteband, waarin de camera gevoelig is. Informatie over de temperatuur van het object zit alleen in de eerste integraal, dus een hoge ϵ en bijgevolg een lage ρ zijn essentieel voor een goede temperatuurmeting.

Voor gepolijste metalen ligt ϵ in het thermisch infrarood tussen 0,015 en 0,10; voor de meeste niet-metalen ligt ϵ rond 0,90 of hoger. Een oxide-huid met een

dikte van één à tweemaal de golflengte is in de regel voldoende om van metaal naar niet-metaal te komen. Ruwe metaaloppervlakken hebben een ϵ , die overal tussen die voor gepolijst en geoxideerd metaal in kan liggen.

De volgende tabel geeft enkele waarden voor golflengten rond 10 μm (ten dele ontleend aan (4) en (5), ten dele aan recente eigen metingen):

goud, hoogglans	0,02 (4)
staal, hoogglans	0,05 (4)
aluminium, hoogglans	0,02 (4)
aluminium, gepolijst	0,08 (4)
ruw aluminium	0,09 - 0,97
geanodiseerd aluminium:	
blank, laagdikte 10 μm	0,93
idem, laagdikte 20 μm	0,97
zwart	0,98
gelakte plaat	0,95
eikenhout	0,95 (5)
PVC	0,895 (5)
menselijke huid	0,96 (5)
plantenblad	0,94 - 0,99 (5)

De tweede integraal in uitdrukking (2) bevat de bestralingssterkte E_e van het oppervlak. Aan de grootte van E_e wordt bijgedragen door straling uit alle richtingen. Het zal vaak erg moeilijk zijn om deze straling met één temperatuur volgens vergelijking (1) te beschrijven. In een isotherme situatie (werken in een gesloten ruimte) lukt dat nog wel. Daar geldt namelijk, dat $E_e \approx M_e$, zodat rekenen met de simpele benadering $\epsilon = 1$ goede resultaten geeft (mits de correcte waarde van ϵ minstens rond 0,9 ligt). Buiten kunnen stralingstemperaturen voorkomen van +40°C (door de zon beschenen oppervlakken in de zomer) tot -50°C (blauwe lucht rond het zenit). Hier is dus nauwelijks een grootte voor de reflexieterm te geven. Bij thermografie gaat het in de regel niet om een erg nauwkeurige bepaling van de temperatuur, maar om het vaststellen van eventuele kleine temperatuurverschillen.

De kracht van de methode zit juist in de mogelijkheid een beeld te vormen en in dat beeld overgangen en contrasten te zien. De meeste camera's hebben een voorziening om al die punten, waarvan eenzelfde, in te stellen stralingsflux is ontvangen, extra helder op het beeldscherm weer te geven: isothermen. Met behulp van deze isothermen zijn vaak contouren en afwijkingen van het uniforme patroon duidelijk naar voren te halen. Het temperatuurniveau kan vastgelegd worden door een ijkplaatje in het beeld op te nemen, waarvan de temperatuur bijvoorbeeld met een thermokoppel gemeten wordt. Bij het zoeken van lekken gaat het echter om het opsporen van contrasterende delen van de wanden, zodat daar in de regel de ijkking achterwege kan blijven. Bij warmtelekken gaat het dan meestal om vrij grote

delen van een wand, bij luchtlekken om kleine openingen: de grote zijn met het blote oog wel te vinden.

4 Omstandigheden bij de meting

Uit het voorgaande blijkt al, dat meten aan een blank metalen wand zinloos is. In de meeste gevallen zal echter een beschermende laag zijn aangebracht (verf, oxidehuid bij aluminium) waardoor de emissiefactor toch hoog genoeg wordt. Vanzelfsprekend wordt de meting gemakkelijker naarmate het temperatuurverschil over de wand groter is. Aan verwarmde ruimten kan dus het beste in de winter gemeten worden, aan gekoelde ruimten in de zomer.

Bij metingen buiten moet het te meten oppervlak niet gestoord worden door uitwendige invloeden. Een — voor kortgolvlige straling — sterk reflecterend oppervlak, dat door de zon beschenen wordt zal toch nog gauw 40 tot 80 W/m² absorberen. Van de mogelijkheid om transmissies van 7 en 13 W/m² nog te onderscheiden blijft dan niet veel over. Tussen natte en droge delen van het oppervlak komen door de verdamping ook al gauw temperatuurver-

schillen voor van 0,5 K of meer. Bij wind zal de warmte-overdrachtscoëfficiënt voor uitstekende delen van een constructie wezenlijk hoger zijn dan voor iets terugwijkende, zodat ook weer temperatuurverschillen zichtbaar zijn, die niets met transmissieverschillen te maken hebben.

Voor een succesvolle meting moet dus gemeten worden aan een oppervlak met een hoge emissiefactor. Bij metingen buiten (in de regel te verkiezen in verband met vrij zicht op het object) moet het stil, droog weer zijn, terwijl het onderzochte deel van het gebouw tijdens de metingen niet direct door de zon beschenen mag worden.

5 Conclusie

Thermografie is een betrekkelijk nieuwe techniek, die zeker nog een belangrijke verdere ontwikkeling zal doormaken. Voor het opsporen van warmte- (koude-) lekken uit gebouwen en constructies is thermografie een buitengewoon waardevolle techniek gebleken, waar nauwelijks een alternatief voor bestaat.

Voor het opsporen van luchtlekken is thermografie een complementaire tech-

niek: als uit andere bepalingen (drukverlies, concentratieverloop van een tracer-gas) blijkt, dat er lekken zijn, is thermografie een nuttig en efficiënt hulpmiddel om er achter te komen waar de lekken zich bevinden.

Toekomstige warmtebeeld-camera's zullen ongetwijfeld goedkoper worden dan de huidige systemen en veel gemakkelijker te hanteren, de mogelijkheden van thermografisch onderzoek zijn nu al volledig beschikbaar.

Literatuur

- 1 Anon., Veel fouten geconstateerd bij isolatie spouwmuren, Remote-sensing nieuwsbrief nr 11, september 1981.
- 2 T. van Hiele e.a., Ondichtheden in de wanden van koude ruimten, Koeltechniek, **73** (1980) 24-31.
- 3 P.F.T.C. Stillwell, Thermal imaging, J. Phys. E: Sci. Instr., **14** (1981) 1113-1118.
- 4 R. C. Weast (ed.), Handbook of Chemistry and Physics 55th ed., 1974, CRC Press, Cleveland, Ohio.
- 5 K. Schurer, A method for measuring infrared emissivities of near-black surfaces at ambient temperatures, Infrared Physics **16** (1976) 157-163.

Ontvangen publicaties

Behandeling bederfelijke ladingen tijdens vervoer. Door de contactcommissie Koeltransport van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek is een brochure uitgebracht die in 16 korte hoofdstukken de behandeling van bederfelijke ladingen tijdens vervoer per produktgroep beschrijft.

Overzichten over mogelijke samenlading en over de gewenste transportomstandigheden completeren de informatie, die als een eerste poging in deze vorm moet worden gezien. Verschijningsvorm, vervoersklimaat en maatregelen voor de juiste behandeling zijn per groep producten samengesteld en sluiten aan op de vakopleiding chauffeurs bederfelijke goederen, maar richten zich op alle functionarissen in de transportketen die met bederfelijke goederen te maken hebben.

De brochure is te verkrijgen door bestelling per overschrijving van f 5,— als kostenbijdrage voor verpakking en verzen-

ding, op gironummer 875467 of bankkonto 53.94.42.488 t.n.v. Sprenger Instituut Wageningen, met de vermelding: Bederfelijke ladingen.

'Thermavent Domestic': een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem met warmterugwinning. In een drietal nieuwe brochures geeft J. E. Stork Ventilatoren bv een duidelijke omschrijving van een warmterugwinapparaat met haar toepassing.

De verschillende apparaten zijn:

- Ventilatie warmterugwinapparaat WTW-6. Bestemd voor ééngezinwoningen, ventilatiecapaciteit tot 225 m³/h, temperatuur-rendement 80%, opgenomen vermogen op continu stand 44 W, op hoge stand 100 W.
- Ventilatie warmterugwinapparaat WTW-7. Bestemd voor ééngezinwoningen,

ventilatiecapaciteit tot 225 m³/h, temperatuur-rendement 70%, opgenomen vermogen op continu stand 44 W, op hoge stand 100 W.

- Ventilatie warmterugwinapparaat WTW H1.1.. Bestemd voor meergezinwoningen, kleine kantoren e.d., ventilatiecapaciteit 650 tot 1250 m³/h, temperatuur-rendement 75%, opgenomen vermogen afhankelijk van gekozen ventilator type.

Bovengenoemde brochures worden door J. E. Stork Ventilatoren bv, Postbus 621, 8000 AP Zwolle, telefoon 038-296911 op aanvraag toegezonden.

Nieuwe Econ-prijslijst, bevat alle prijzen van Econosto appendages die vanaf 5 april 1983 van kracht zijn. Nadere inf.: Econosto, Postbus 4060, 3006 AB Rotterdam; tel. 010-141500.