

Hyperspektral termografi: Brug lys som termometer

Mads Nibe Larsen, Newtec Engineering A/S & NanoSYD – Mads Clausen Instituttet, Syddansk Universitet

Når det skal undersøges, om isoleringen af huse er tilstrækkelig, bruges termiske kameraer ofte til at få et overblik over, hvor varmen slipper ud. En problematik her er dog, at forskellige materialer udsender forskellige mængder varmestråling – også selvom de har samme temperatur. Dette “snyder” traditionelle varmefølsomme kameraer, der typisk baserer deres temperaturbestemmelse på mængden af varmestråling, de opfanger. I denne artikel præsenteres det, hvordan et hyperspektralt termografisk kamera kan udnyttes til først at genkende forskellige materialer og dernæst bestemme deres temperatur. Denne kamerateknologi er udviklet som led i et “ErhvervsPhD”-samarbejde mellem Newtec Engineering A/S og Syddansk Universitet.

Alle legemer med en temperatur over det absolutte nulpunkt udsender termisk stråling (også kaldet varmestråling). Denne stråling (infrarødt lys) udsendes, fordi den termiske energi i legemet får dets atomer og elektroner til at vibrere. En højere temperatur fører til flere vibrationer og dermed også mere termisk stråling. Termografiske kameraer udnytter denne kobling til at fastlægge et legemes overfladetemperatur ved at måle mængden af stråling, der udsendes.

Termisk stråling

I forbindelse med varmestråling henvises der ofte til et *sort legeme*, som er et idealiseret objekt, der udsender så meget termisk stråling som teoretisk muligt. Mængden og fordelingen af denne stråling er beskrevet ved Plancks strålingslov:

$$M_{SL}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}, \quad (1)$$

hvor M_{SL} beskriver et sort legemes spektrale eksitans, hvilket er et mål for den effekt, det sorte legeme udsender pr. areal pr. bølgelængde [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$]. M_{SL} afhænger både af bølgelængden, λ , og temperaturen, T . Derudover angiver $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$ Plancks konstant, $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ lysets hastighed og $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ Boltzmanns konstant. Ved højere temperaturer øges eksitansen, og samtidig rykkes kurvens toppunkt mod kortere bølgelængder (figur 1). Sammenhængen mellem placeringen af kurvens toppunkt og det sorte legemes temperatur er beskrevet af Wiens forskydningslov:

$$\lambda_{\max} T = 2897,8 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}, \quad (2)$$

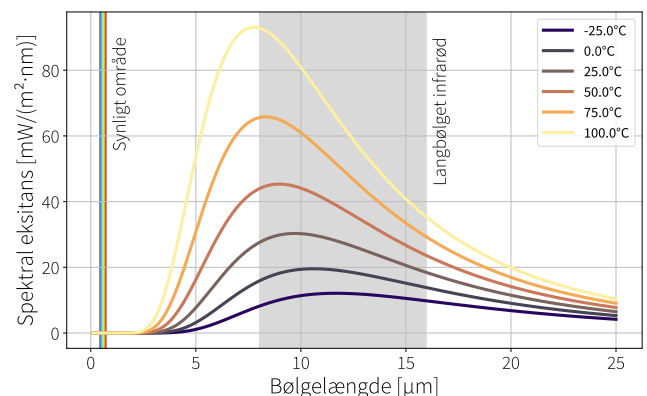
hvor $\lambda_{\max}$ er bølgelængden, hvor eksitansen er størst.

Ligning (1) angiver et sort legemes eksitans pr. bølgelængde. Et udtryk for den samlede eksitans på tværs af alle bølgelængder kan opnås ved:

$$B_{SL}(T) = \int_0^\infty M_{SL}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (3)$$

hvor $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ er Stefan-Boltzmanns konstant. Fra ligning (3) kan det ses, at den samlede eksitans er proportional med temperaturen i fjerde potens. En lille ændring i temperaturen vil således

medføre en stor ændring i den irradians, et kamera vil opfange.



Figur 1. Spektral eksitans af perfekt sort legeme ($\varepsilon = 1$) ved forskellige temperaturer. Kurverne angiver fordelingen af udsendt varmestråling som funktion af bølgelængden, som beskrevet i ligning (1). Indtegnet er også det synlige bølgelængdeområde ($\approx 400 - 750 \text{ nm}$) samt det langbølgede infrarøde område ($\approx 8 - 16 \text{ } \mu\text{m}$), der er de bølgelængder de fleste varmefølsomme kameraer virker indenfor.

Det burde derfor være nemt at fastlægge et legemes temperatur med et termografisk kamera baseret på, hvor meget stråling, der rammer billedsensoren – men den virkelige verden er ikke så ligetil. Indtil nu har alle betragtninger været under antagelse af, at der er tale om et sort legeme. “Virkelige” materialer udsender mindre varmestråling end et sort legeme, og der indføres derfor en materialespecifik parameter: emissivitet (ε). Denne beskriver forholdet mellem eksitansen for det konkrete materiale, $M(\lambda, T)$, og et teoretisk sort legeme, $M_{SL}(\lambda, T)$:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_{SL}(\lambda, T)}. \quad (4)$$

Da et sort legeme udsender den størst mulige mængde termisk stråling ved en given temperatur, vil emissiviteten for et virkeligt materiale ligge mellem 0 og 1. Emissiviteten er i langt de fleste tilfælde bølgelængdeafhængig. Det betyder, at formen af det spektrum, som materialet udsender, afviger fra formen givet ved Plancks strålingslov (figur 1 og ligning (1)).

Selvom spektrene normalt er forskellige fra Planck-kurven, kan termografiske kameraer alligevel bruges til at fastlægge materials temperatur. Dette kræver blot,

at kameraet er kalibreret til det specifikke materiale, der kigges på. Det betyder dog, at kameraet kun kan bruges til at bestemme temperaturen af ét materiale ad gangen. Er der stor forskel mellem emissiviteterne af de forskellige materialer i billedet, er det svært at vurdere deres temperaturer præcist. Figur 2 illustrerer denne problemstilling. Her ses på en aluminiumsbeholder, der er fyldt op med varmt vand. På beholderens ene side er påklisteret et "N" lavet af polyimidtape (Kaptontape). Polyimidfilm bruges ofte indenfor fx elektronikindustrien pga. dets isolerende egenskaber og høje varmeresistens. Aluminium har en meget lav emissivitet ($\varepsilon < 0,1$) mens emissiviteten af polyimid-tape er relativt høj ($\varepsilon \approx 0,95$). Generelt gælder det, at emissiviteten af reflekterende materialer (som de fleste metaller) er forholdsvis lav. Selvom både aluminium og polyimidtape her har samme temperatur, observeres en stor kontrast på det termiske billede (figur 2b). Uden tilstrækkelig information om materialerne i billedet ser N'et derfor ud til at have en betydeligt højere temperatur end resten af foliebakken.



a) RGB farvebillede



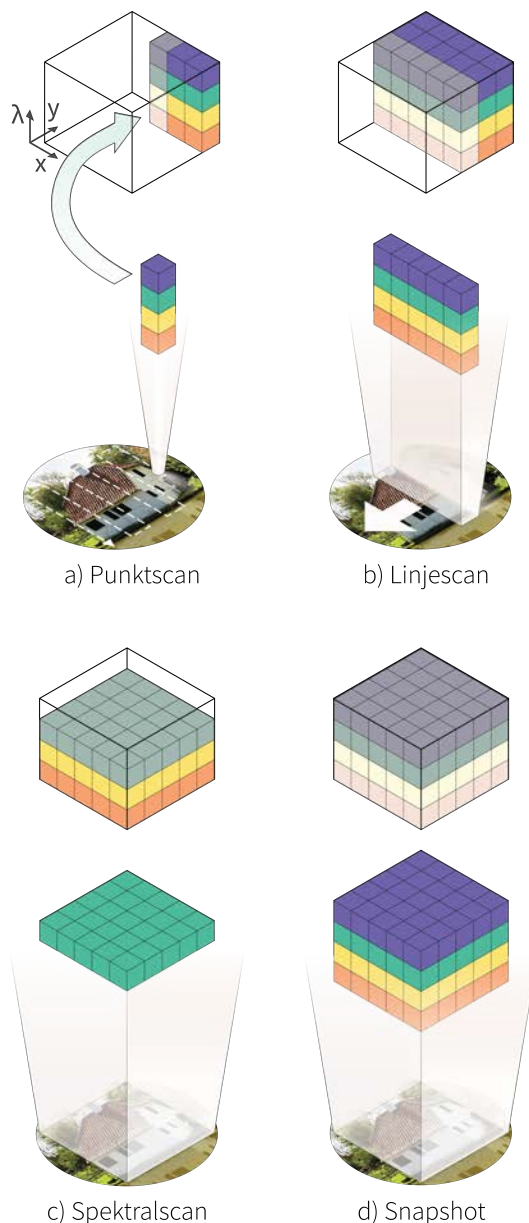
b) Termisk billede

Figur 2. Sammenligning mellem traditionelt farvebillede taget med en smartphone (a), og et termografisk billede taget med et varmefølsomt kamera (b) – lysere farve indikerer højere intensitet. Motivet er en foliebakke fyldt med varmt vand med et "N" af polyimidtape påklisteret foliebakkens forside. Den store kontrast mellem materialerne i det termografiske billede skyldes forskellen mellem aluminiums og polyimidfilmens emissivitet.

Introduktion til hyperspektrale billeder

Billeder er ofte blevet brugt til både kvalitative og kvantitative analyser indenfor mange forskellige videnskabelige felter. I årenes løb har hyperspektrale billedteknikker også vundet indpas, da de åbner døren for en lang række analysemetoder, som ikke understøttes af konventionelle farve- og gråtonebilleder. Det er fx bestemmelse af kemiske sammensætninger – eksempelvis ifm. detektion og identifikation af mikroplast [1],

screening af forskellige former for kræft [2] eller kortlægning af iltmætningen på nethinden for at undersøge øjets tilstand [3].



Figur 3. De mest gængse hyperspektrale billedteknikker. a) *Punktscan*: Spektret i hver pixel optages individuelt. b) *Linjescan*: Spektret af en hel række pixels optages samtidig. c) *Spektalscan*: Alle pixels måles på samme tid, men kun for én spektral kanal ad gangen. d) *Snapshot*: Spektret i alle pixels optages på én gang.

Et hyperspektralt billede kan ses som en videreudvikling af de almindelige farvebilleder, vi kender fra eksempelvis mobiltelefoner. Her optages det synlige lys i tre diskrete bånd: ét rødt, ét grønt og ét blåt (RGB). Den eneste forskel på almindelige RGB-billeder og hyperspektrale billeder er blot antallet af bånd (eller farver), der optages. Her er det ikke ualmindeligt, at hyperspektrale billeder kan bestå af mere end 100 spektrale bånd. Man refererer derfor til hyperspektrale billeder som *datakuber*, da de har to rummelige akser (som et almindeligt billede) samt en spektral akse. Denne datastruktur kan sammenlignes med et spil kort, hvor hvert enkelt kort i bunken gengiver motivet i et snævert udsnit af det elektromagnetiske spektrum.

Der er mange måder, hvorpå man kan optage et hyperspektralt billede, og typisk skelnes der mellem fire generelle teknikker: Punktscan, linjescan, spektralscan og snapshot (figur 3). Punktscanning refererer til en teknik, hvor kun ét spektrum – i én pixel måles ad gangen. Det vil sige, at for at kunne danne en komplet datakubest skal kameraet eller motivet flyttes ift. hinanden langs begge akser i rummet, hvorved datakuben fyldes ét spektrum ad gangen. Ofte kombineres denne teknik med mikroskoper, hvor prøvens placering kan styres præcist imens spektrene måles.

Linjescanning ligner til forveksling punktscanning, men her optages spektrene i en hel linje af pixels på én gang. Dette betyder dog stadig, at kamerasystemet og motivet skal bevæges relativt til hinanden for at optage den sidste rum-dimension. Denne teknik er også kendt som *push broom scanning*, og ses typisk installeret over transportbånd, hvor emnerne kan passere forbi kameraet med en kendt hastighed.

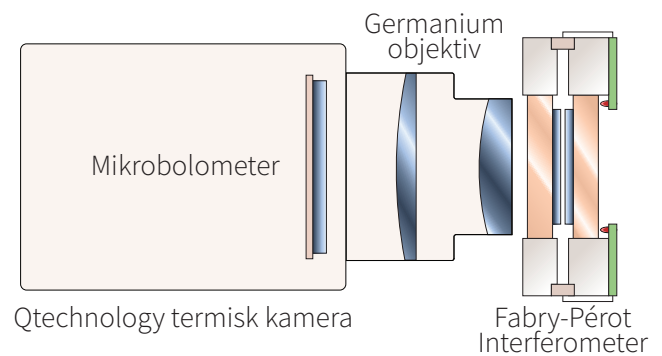
Ved spektralscanning optages alle pixels på én gang, men kun ét spektralt bånd ad gangen. Denne teknik kræver således *ikke*, at kamera og motiv bevæges ift. hinanden og er derfor særdeles anvendelig til afbildning af ting, som ikke kan være på et transportbånd eller under et mikroskop – dette kunne fx være bygninger.

Den sidste af de mest gængse teknikker er snapshot billeddannelse, som er unik idet al spektral og rummelig information optages på samme tid. Dette betyder at teknikken er utroligt hurtig, da den hverken skal scanne de rumlige eller spektrale dimensioner. Dette sker dog på bekostning af relativt komplicerede optiske systemer eller rekonstruktionsalgoritmer.

Det hyperspektrale termografiske kamera

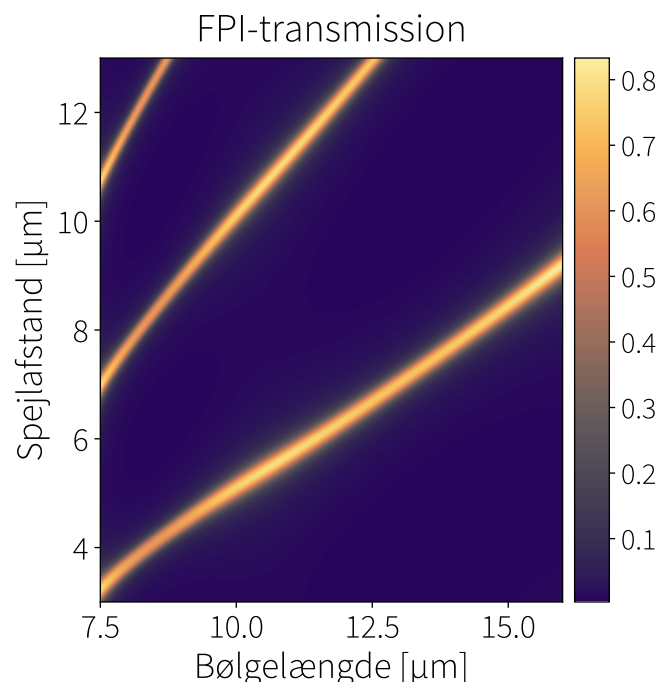
Termografiske kameraer, der er følsomme overfor varmestråling og kan bruges til at vurdere legemers overfladetemperatur, er ikke nogen ny eller eksotisk teknologi. Til gengæld er udbuddet af *hyperspektrale* termografiske kameraer (HTK'er) ikke stort. De eksisterende løsninger er typisk både tunge, svære at flytte på og utroligt dyre. Det HTK, som resten af artiklen omhandler, er udviklet og bygget gennem et samarbejde mellem Newtec Engineering A/S fra Odense og Syddansk Universitet. Dette kamerasystem benytter et scannende Fabry-Pérot interferometer (FPI) til at filtrere lyset. Et FPI består af to delvist reflekterende spejle, som er placeret med en afstand på $\approx 5 \mu\text{m}$ fra hinanden. Afstanden mellem spejlene er afgørende for, hvilke bølglængder der transmitteres gennem FPI'et, og ved at kontrollere spejlafstanden kan FPI'et derved fungere som et variabelt båndpasfilter. Placeres FPI'et foran et "almindeligt" termografisk kamera (figur 4), konverteres det til en spektralscanner, idet spejlafstanden kan kontrolleres imens billederne optages.

Platformen for det termiske kamera er udviklet af Qtechnology, og er udstyret med en mikrobolometersensor. Her består hver eneste pixel af et lille varmefølsomt element, hvis elektriske modstand er afhængig af dets temperatur. Til at fokusere lyset ned på sensoren bruges et objektiv af germanium, da almindeligt glas er ugenomsigtigt for termisk stråling.



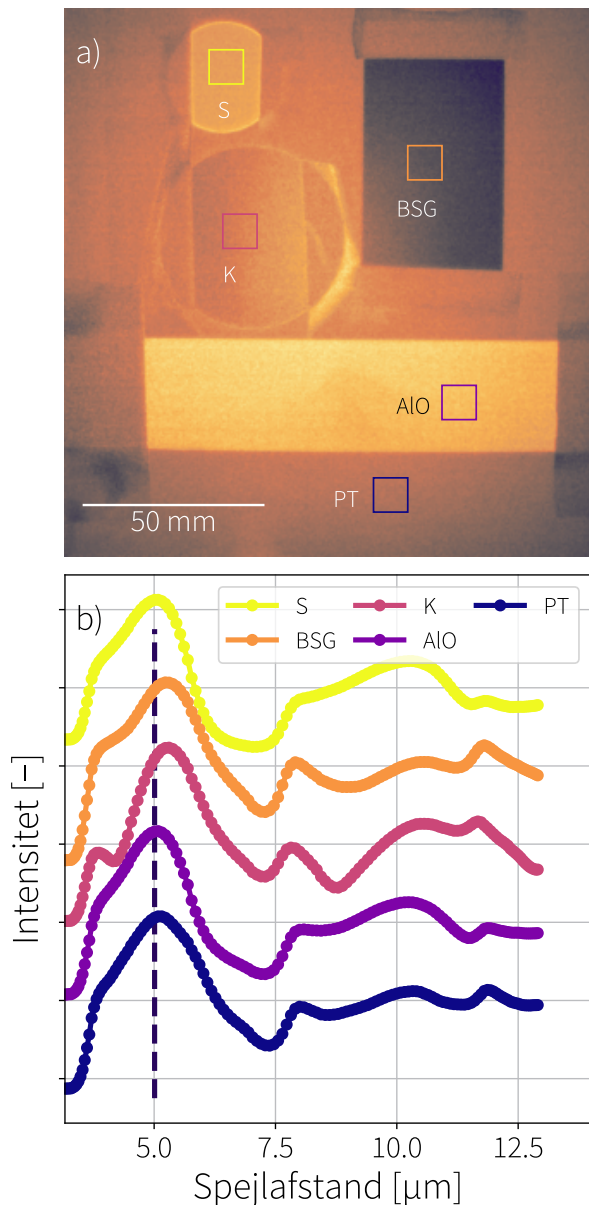
Figur 4. Illustration af hyperspektralt termografisk kamera (ikke i skala).

Fortolkningen af den datakubest, der kommer ud af dette HTK, er dog ikke så ligetil. For det første er enheden af den spektrale akse ikke bølglængde, men derimod spejlafstand. Ydermere repræsenterer hvert lag i kubest ikke kun én bølglængde, men flere. Som det kan ses i figur 5, kan den samme bølglængde gå igen flere gange i samme spektrum. Eksempelvis vil lys med en bølglængde på $8 \mu\text{m}$ kunne observeres ved $3,68 \mu\text{m}$, $7,66 \mu\text{m}$ og $11,7 \mu\text{m}$ spejlafstand – disse refereres til som hhv. 1., 2. og 3. transmissionsorden. At den samme information optræder flere gange i samme spektrum, er ikke et problem. Problemet opstår dog, når flere bølglængder lukkes igennem ved samme spejlafstand, som det er tilfældet ved fx $8 \mu\text{m}$ spejlafstand. Her lukkes lys med bølglængderne $8,27 \mu\text{m}$ og $14,4 \mu\text{m}$ igennem FPI'et, og man kan derfor ikke være sikker på, hvilke bølglængder, der er skyld i det signal, der optages med kameraet. Dette er imidlertid kun et problem, hvis man ønsker at sammenholde de spejlafstandsafhængige spektre med de bølglængdefafhængige spektre, som vi er vant til fra mere konventionelle spektrale teknikker.



Figur 5. Sammenhæng mellem spejlafstand, bølglængde og transmission for et scannende Fabry-Pérot interferometer med termiske spejle. Transmissionen gennem FPI'et er beregnet ved brug af transfermatrix-metoden, der tager højde for, hvordan lys opfører sig i hvert lag af den tyndfilmsstabel, der udgør spejlene.

I det næste afsnit gives kort præsentation af resultater fra [4], og det vises, hvordan dette HTK kan bruges til at skelne mellem forskellige dielektriske materialer på baggrund af spektrale forskelle, og her er denne sammenblanding af bølgelængder ikke et problem.

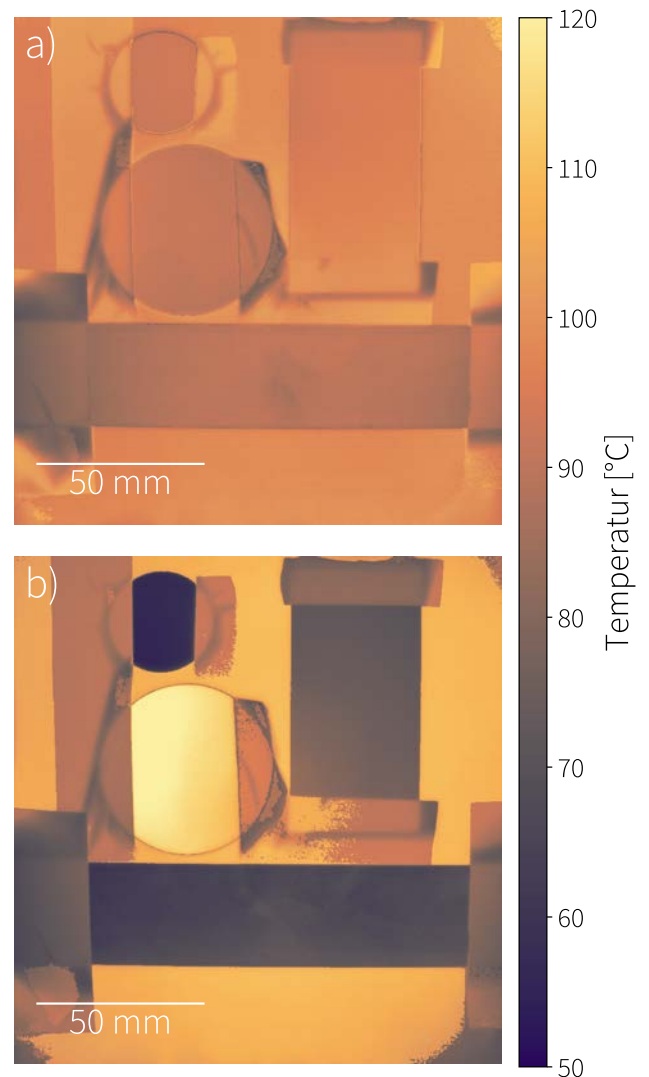


Figur 6. a) Termisk billede af fem forskellige dielektriske materialer ved 97°C. Billedet er en del af en hyperspektral datacube og er taget ved en spejlfstand på 5 µm. De fem materialer er: Safirglas (S), borosilikatglas (BSG), kvartsglas (K), keramik af aluminiumoxid (AlO) og polyimid/kapton-tape (PT). b) Spektre for hvert af de fem materialer. Hvert spektrum er midlet på tværs af de farvede firkanter i a). Den sorte stiplede linje ved 5 µm angiver den spejlfstand, hvorved billedet i a) er optaget. Spektrene er forskudt langs y-aksen for lettere at kunne skelne dem fra hinanden.

Materialegenkendelse og efterfølgende temperaturbestemmelse

Der er i [4] set på fem forskellige materialer: Safirglas (S), borosilikatglas (BSG), kvartsglas (K), keramik baseret på aluminiumoxid (AlO) og polyimidtape (PT) (figur 6a). Alle prøverne er monteret på en aluminiumsklods, som er beklædt med polyimidtape. Prøverne

er fastgjort med yderligere polyimidtape således, at der flere steder vil være dobbeltlag. Der tages 20 hyperspektrale billeder ved varierende prøvetemperaturer fra 34°C til 100°C. Halvdelen af billederne bruges til at træne to forskellige maskinlæringsmodeller (træningssæt), mens den anden halvdel bruges til at validere modellerne (testsæt).



Figur 7. a) Materialeafhængig temperaturbestemmelse. Her er materialet først blevet genkendt med en MLR-model, hvorefter en passende PLS-model er brugt til at bestemme temperaturen. Overfladetemperaturen varierer en smule på grund af materialernes forskellige tykkelser, men ligger generelt mellem 90°C og 100°C. b) Her anvendes samme materialegenkendelsesmodel som i a), men PLS-modellerne er byttet rundt på tværs af materialerne. Således bruges safirmodellen til at forudsige temperaturen af borosilikatglasset ($PLS_S \rightarrow MLR_{BSG}$). Resten af modelombytningerne kan beskrives ved: $PLS_{BSG} \rightarrow MLR_S$, $PLS_{AlO} \rightarrow MLR_K$, $PLS_{PT} \rightarrow MLR_{AlO}$ og $PLS_K \rightarrow MLR_{PT}$. Her spænder temperaturbestemmelserne fra ca. 50°C til over 120°C.

De målte spektre i træningssættet (figur 6b) bruges til at træne en *multinomial logistisk regressions*- (MLR) model. Træningen sker ved, at modellen præsenteres for en lang række spektre med dertilhørende materialeangivelser. Når modellen efterfølgende præsenteres for et nyt, ukendt spektrum, sammenholder den det med de spektre, den allerede er trænet på. Det nye spektrum tildes derpå en label, som svarer til det materiale, som

modellen vurderer spektret med størst sandsynlighed stammer fra.

Efter at materialerne er blevet genkendt, skal temperaturen fastlægges. Dette gøres med en partiel mindste kvadraters metode (*partial least squares*) (PLS). Denne model bruger kovariansen mellem spektrene og den temperatur, de er optaget ved, til at lave præcise temperaturestimer. Her viser det sig, at PLS-modellen er materialeafhængig. I figur 7a er de korrekte PLS-modeller, som bestemt af MLR-modellen, blevet brugt til at vurdere temperaturen af de forskellige materialer. Alle materialerne har i virkeligheden omtrent samme temperatur med nogle mindre variationer som skyldes forskelle i prøvernes tykkelse. Derudover viser det sig, at MLR-modellen har svært ved at genkende dobbeltlag af polyimidtape korrekt. Temperaturforudsigelserne ligger dog stadig indenfor ca. 10°C af hinanden på tværs af billedet. Figur 7b viser derimod temperaturestimer, hvor der er blevet byttet rundt på PLS-modellerne. Her observeres det, at der er et stort spænd i de forudsagte temperaturer. Her anslås det, at nogle af prøverne ligger omkring 50°C, mens andre ligger over 120°C. Den faktiske overfladetemperatur burde ligge omkring 97°C.

Eksemplet her viser, at det er muligt at skelne mellem forskellige dielektriske materialer på baggrund af deres spektre, og vigtigheden af at anvende den korrekte temperaturmodel til bestemmelse af overfladetemperatur. Der kan bygges videre på forsøgsresultaterne ved tilføjelse af mere relevante byggematerialer såsom mursten, træværk, beton, vinduesglas mv. Ved forbedring af kameraets evne til at kende forskel på materialer ved lavere temperaturer end stuetemperatur, vil det være muligt at bruge systemet til korrekt temperaturbestemmelse af eksempelvis huse uafhængigt af byggematerialet.

I denne korte artikel er der kun plads til en meget kort opsummering af, hvordan det hyperspektrale termografiske kamera fungerer samt forsøgsresultater. Hvis man ønsker et mere detaljeret indblik i kameraets virkemåde og resultaterne fra forsøget, henvises der til artiklen [4].

En særlig tak til

En lang række mennesker spiller til daglig en stor rolle for, at dette projekt kan realiseres. Først og fremmest mine vejledere: Jakob-Kjelstrup Hansen fra NanoSYD, Mads Clausen Instituttet ved Syddansk Universitet og Bjarke Jørgensen fra Newtec Engineering A/S. Derudover en masse skønne kollegaer hos Newtec Engineering A/S, og i særdeleshed Anders Løchte Jørgensen og Victor Petrunin. Til sidst skal det også nævnes, at Danmarks Innovationsfond yder økonomisk støtte til ErhvervsPhD-projektet.

Litteratur

- [1] A. Faltynkova, G. Johnsen og M. Wagner (2021) "Hyperspectral imaging as an emerging tool to analyze microplastics: A systematic review and recommenda-

tions for future development", *Micropl. & Nanopl.*, bind 1, artikel 13.

- [2] G. Lu og B. Fei (2014) "Medical hyperspectral imaging: a review", *J. Biomed. Opt.*, bind 19, artikel 10901.
- [3] W. R. Johnson, D. W. Wilson, W. Fink, M. S. Humayun M.D. og G. H. Bearman (2007) "Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology", *J. Biomed. Opt.*, bind 12, artikel 014036.
- [4] A. L. Jørgensen, M. N. Larsen, V. Petrunin, J. Kjelstrup-Hansen og B. Jørgensen (2022) "Surface temperature determination using long range thermal emission spectroscopy based on a first order scanning Fabry-Pérot interferometer", *Opt. Express*, bind 30, side 2186–2196.



Mads Nibe Larsen er ErhvervsPhD-studerende hos Newtec Engineering A/S samt hos NanoSYD, Mads Clausen Instituttet ved Syddansk Universitet i Sønderborg. Her arbejder han med både udvikling og anvendelse af hyperspektrale termografiske systemer.

PFEIFFER VACUUM

Nyhed
Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m³/t)
Ekstrem lyd- og vibrationssvag pumpe med kompakt design

Tlf. 3166 8708
Lars.Scholtel@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com