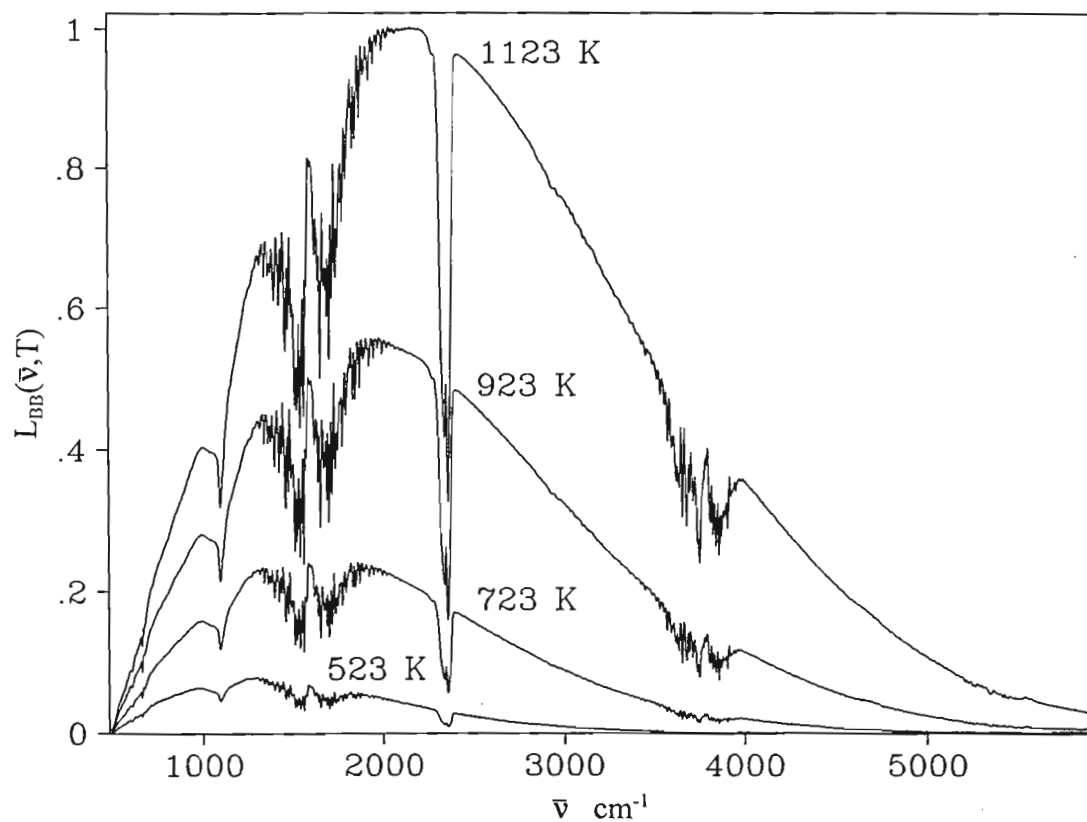


Infrarød temperaturmåling

Sønnik Clausen



Infrarød temperaturmåling

Risø-R-862(DA)

Sønnik Clausen

**Forskningscenter Risø, Roskilde
Januar 1996**

Abstrakt I forbindelse med processtyring og kontrol vil der være krav om temperaturmåling af emner, overflader, partikler og gasser. Der er et utal af målemetoder til temperaturmåling, men her vil kun de vigtigste moderne berøringsløse måleinstrumenter til temperaturmåling blive omtalt, det såkaldte pyrometer, herunder total strålingsmåleren, en-farve og to-farve pyrometeret, samt Fourier transform infrarød (FTIR) emissionsspektrometri til fuldspektrale målinger og endelig termovision. Teksten er skrevet med henblik på at give læseren en introduktion til emnet, hvor dele måske kan virke lidt teoretiske, men er medtaget ud fra mottoet: »intet er mere praktisk end en god teori». De vigtigste formler og konstanter til strålings- og usikkerhedsberegning er givet. Målenøjagtigheden af temperaturmålingen vil ofte kunne øges betydeligt og grove fejl vil normalt kunne undgås såfremt udstyret kalibreres. Til slut er der givet henvisninger til gode fagbøger, som kan anbefales for yderligere læsning.

Forside: Infrarøde spektre af blackbody ved 523, 723, 923 og 1123 K målt med Risø's FTIR-spektrometer. Pga. den gode spektrale opløsning (i dette tilfælde 8 cm^{-1}) kan absorptionsbånd fra kuldioxid og vand tilstede i luften ses i spekrene. Vejlængden mellem spektrometer og blackbodykilde er ca. 40 cm. X-aksen er angivet i bølgetal.

ISBN 87-550-2141-7
ISSN 0106-2840

Grafisk Service, Risø, 1996

Indhold

Forord 4

1 Introduktion 5

2 Teori 7

3 Pyrometriske målinger og praktiske eksempler 11

4 Kalibrering og rådgivning 16

5 Konklusion 17

6 Litteratur 18

7 Referencer 19

8 Symbolliste 20

Forord

Infrarød måleudstyr til temperaturmåling vinder større og større udbredelse i forbindelse med industrielle applikationer og overvågning. Årsager hertil kan være øgede krav til produktions- og kvalitetskontrol, samt et gunstigt kvalitets og prisforhold af infrarødt måleudstyr. Mht. løsning af en måleopgave, valg af udstyr og vurdering af nøjagtigheden af temperaturmålingen forudsættes en vis indsigt i instrumenternes virkemåde og kendskab til de optiske egenskaber af det som der ønskes målt på. Det er mit håb at rapporten kan bidrage til at skabe bedre indblik i brugen og valg af infrarød måleudstyr. Et andet vigtigt punkt er kalibrering af måleudstyret og rådgivning vedrørende løsning af en måleopgave, hvilket omtales til slut i rapporten. Ved kalibrering af udstyret kan grove målefejl ofte udgås og målenøjagtigheden øges.

Teksten var oprindeligt skrevet med henblik på konferencen "Temperaturmåling - fra -200 til +2000 °C" afholdt i Dansk Ingeniørforening den 26. oktober 1994 af Kemiingeniørgruppen. Figurer og tekst i denne udgave er blevet opdateret. Flemming Nicolaisen, Kemisk Lab. V, H.C. Ørsted Institutet takkes for kommentater.

Rapportens tekst og indhold må kun gengives med henvisning til kilde. I tilfælde, hvor uddrag af rapporten kædes sammen med anden tekst, kræves forfatterens godkendelse heraf. Ekstra eksemplarer af rapporten kan rekvireres hos undertegnede eller Risø's bibliotek.

Sønnik Clausen

1 Introduktion

Den ældste og simpleste måde at bestemme temperaturen af et varmt emne over ca. 700°C er ved bedømmelse af farven med øjet. Metoden er subjektiv (pas på farveblinde) og ikke særlig præcis, dvs. et trænet øje vil kunne estimere temperaturen indenfor 50-150°C, se evt. tabel I. Ovenstående observation leder os hurtigt frem til, at spektralfordelingen af lyset ændres afhængigt af temperaturen, jo højere temperatur jo mere lys med kortere bølgelængde.

Tabel I. Sammenhæng mellem farve og temperatur.

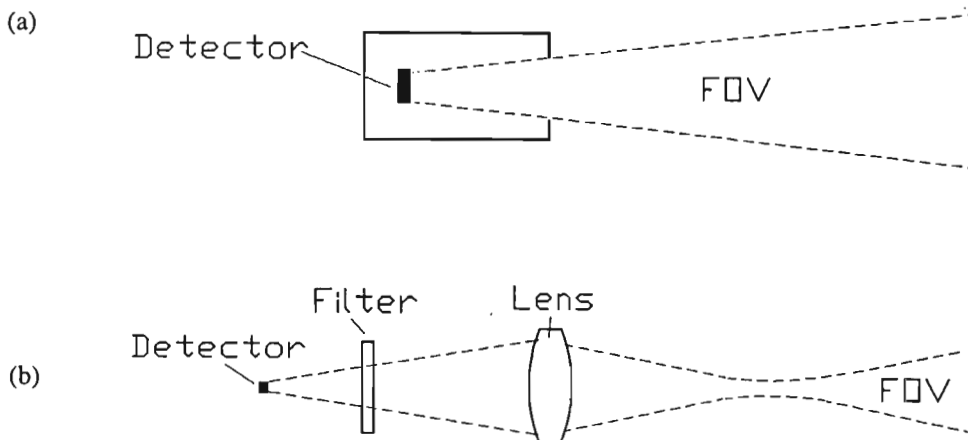
Temperatur (°C)	Farve
650 - 750	rødviolet
780 - 800	karminrød
800 - 830	orange/karminrød
830 - 880	mørk orange
880 - 1050	orange
1050 - 1150	gul/orange
1150 - 1250	gul
1250 - 1320	hvid/gul

Et instrument til måling af temperatur ud fra den udstrålede termiske energi fra en overflade kaldes et pyrometer (pyros: ild, på græsk). En temperaturmåling med et pyrometer er **berøringsløs** og målingen kan foretages på meget **kort tid**. **Strømningsforholdene betyder ikke noget for måleresultatet** i forbindelse med temperaturmåling på varme gasser, som det ville være tilfældet når temperaturmålingen foretages med et termoelement. Måleområdet er principielt ubegrænset for infrarøde sensorer.

Der findes flere typer pyrometre, som bør nævnes:

- Total-strålingspyrometre anvender strålingsdetektorer som opvarmes ved den indkomne stråling og disse reagerer derfor ofte langsomt. Pyrometeret er følsomt over for forbrændingsgasser (CO₂, H₂O m.f.), røg og partikler, hvilket kan introducere fejl op til 100°C eller mere. Total-strålingspyrometre anvendes primært til opgaver hvor emnet har høj emissivitet, såsom papir, tekstil, plastik og ovne. Instrumenter og sensorer markedsføres til indbygning eller som transportabelt udstyr. Total-strålingspyrometre har normalt divergerende synsfelt (figur 1(a)).
- Glødetrådspyrometeret er opbygget som en kikkert med en glødetråd i synsfeltet. Objektets temperatur bestemmes nu ved ændre strømmen igennem glødetråden indtil denne ikke med øjet kan skelnes fra objektet, hvorefter temperaturen aflæses på en skala på instrumentet. Typisk temperaturområde er fra 700 til 3500°C. Målenøjagtighed på 10 - 15°C kan opnås ved omhu ved justering af strømmen. Den manuelle justering tager ca. 5 - 20 sekunder. Glødetrådspyrometeret er særlig velegnet til temperaturmåling af små objekter, varmelegemer m.v. Glødetrådspyrometeret forhandles næppe mere.
- Bånd strålingspyrometre eller en-farve pyrometre opererer over et afgrænset spektralområde. Normalt omsættes den indkomne varmestråling efter et filter til et elektrisk signal via en fotodetektor (figur 1(b)), som igen omsættes til en temperaturvisning. Pyrometeret er hurtigt reagerende og kan anvendes med absorberende gasser tilstede, såfremt der måles udenfor gasbåndene. Det er vigtigt for dette type instrument, at specificere emissionstallet for overfladen rimeligt præcist for nøjagtige temperaturmålinger. Normalt anvendes bølgelængdeområdet 8-14 µm (det atmosfæriske vindue) for måling i temperaturområdet fra -30 til 1100°C, og området 2.1-2.3 µm for

400 til 3000°C. Bedste nøjagtighed opnås normalt ved at vælge et pyrometer som måler ved den korteste mulige bølgelængde, som det vil fremgå af teoriafsnittet.



Figur 1. Synsfelt (FOV) af pyrometer. (a) divergerende synsfelt, (b) fokuserende pyrometer med linse/optik.

- For to-farve pyrometre uddrages temperaturen ud fra forholdet mellem intensiteten af varmestrålingen afgivet fra emnet ved to forskellige bølgelængdebånd. To-farve pyrometeret anvendes ofte ved tilstedeværelse af absorberende gasser, støv og røg og i tilfælde af emner med varierende emissivitet. To-farve pyrometeret er derfor Velegnet til brug under industrielle forhold.

De to sidstnævnte pyrometre findes dels som løse sensorer med elektrisk udgangssignal og dels som kompakte håndinstrumenter med digital display og diverse funktioner, f.eks. variabel emissionskoefficient, peak hold, mv. Der kan henvises til Michalski (1991) for en nøjere gennemgang af pyrometernes opbygning og virkemåde.

Det er i dag muligt, at måle med mange tusinde målepunkter over et stort spektralområde. Målemetoden, FTIR emissionsspektrometri, er etableret på Risø og tillader pga. den gode spektralopløsning måling af gasbånd og detaljer i det infrarøde spektrum. Målemetoden anvendes primært i forbindelse med særligt krævende opgaver, forskning og udvikling. En generel beskrivelse af FTIR måleteknikken er givet i Griffiths (1986).

For alle de ovenstående instrumenter gælder, at temperaturen for et enkelt punkt/område måles, hvorimod der med et infrarødt kamera (termovision) kan fås et billede af temperatur- og udstrålingsfordelingen over et større område. De termografiske billeder kan normalt optages og afspilles på almindeligt videoformat. Termovision anvendes f.eks. indenfor varmeeftersyn af bygninger (kuldebroer), overvågning af ristede forbrændingsanlæg (brændselstemperatur), elektronik industrien (komponent temperatur) og medicinske formål (kropstemperatur). Termovision er udmærket til undersøgelser af temperaturforskelle, således kan temperaturvariationer på mindre end 0.1°C registreres. IR-kamera af god kvalitet leveres ofte med indbygget referencekilde. Hvor nøjagtige absolutte temperaturmålinger ønskes tilrådes kalibrering af udstyret.

2 Teori

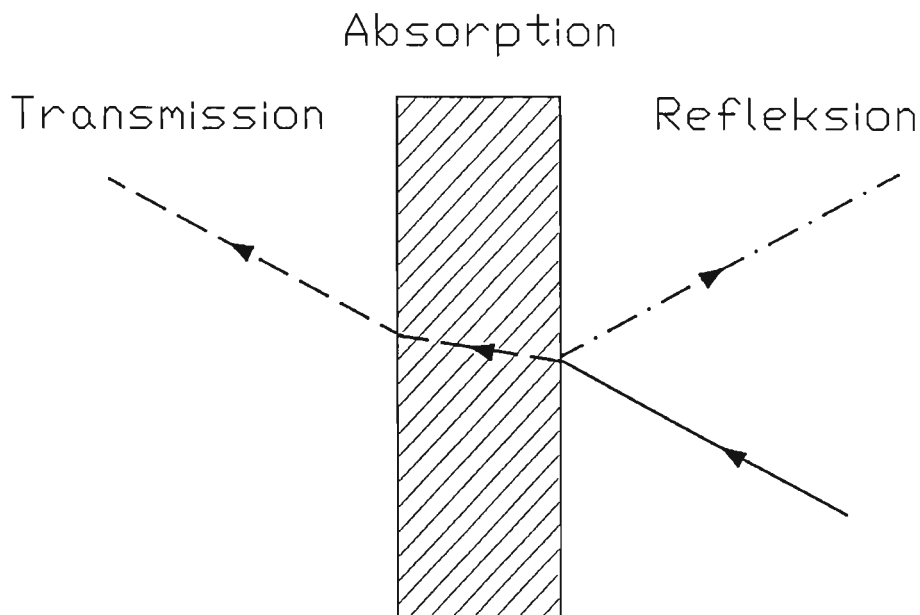
I det følgende vil vi se lidt nærmere på de vigtigste fysiske forhold og formler, som danner baggrund for virkemåden og brugen af alt infrarødt udstyr til passiv temperaturmåling. For mere komplicerede energiudvekslingsberegninger ved termisk stråling henvises til Siegel (1992).

Lys eller termisk stråling er i denne sammenhæng elektromagnetisk stråling i bølgelængdeintervallet lad os sige fra ca. $0.1 \mu\text{m}$ til $300 \mu\text{m}$, se tabel II. Det menneskelige øje er kun følsomt i et lille spektralområde, fra $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$. I det gængse temperaturområde fra -20 til 1700°C vil hoveddelen af den udstrålede energi falde indenfor bølgelængdeområdet $1-30 \mu\text{m}$. I forbindelse med gasspektre ses bølgetallet ofte opgivet i stedet for bølgelængden. Bølgetallet, $\tilde{\nu}$, er defineret ved 1 over bølgelængden ($1/\lambda$) og angives i cm^{-1} (antal bølgelængder pr. cm). Bemærk, at bølgelængden er angivet i vacuum i det følgende.

Tabel II. Definition af spektrale områder af lys.

Bølgelængde	Type stråling
$0.1 - 0.4 \mu\text{m}$	ultraviolet (UV)
$0.4 - 0.7 \mu\text{m}$	synlig (VIS)
$0.7 - 2 \mu\text{m}$	nærinfrarød (NIR)
$2 - 25 \mu\text{m}$	midtinfrarød (MIR)
$25 - 300 \mu\text{m}$	fjerninfrarød (FIR)

Det er velkendt, at lys/termisk stråling kan reflekteres, absorberes og transmitteres, se figur 2.



Figur 2. Illustration af refleksion, absorption og transmission af lys/ termisk stråling som falder ind på et vindue/emne. NB: transparente materialer i VIS er ofte delvis absorberende i IR.

For ethvert legeme i ligevægt må det, ud fra energiens bevarelse, gælde, at:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad [1]$$

Absorptionskoefficienten er defineret ved brøkdelen af stråling absorberet af en overflade i forhold til hvad der totalt indstråles på overfladen. Absorptionskoefficienten varierer ofte med bølgelængden af lyset og temperaturen, dvs. $\alpha = \alpha(\lambda, T)$.

Tre specifikke situationer:

$\alpha = 1$: da er emnet et såkaldt sort legeme eller blackbody, hvor al indkommen lys absorberes som rammer dets overflade. Heraf følger af [1], at intet lys samtidig vil kunne transmitteres eller reflekteres. Eksempel: mat-sort maling er tæt på at være totalt absorberende ($\alpha \approx 0.92-0.95$). $\rho = 1$: emnet reflekterer al indkommen lys. Eksempel: Spejlet er tæt på at være totalt reflekterende. $\rho \approx 0.02$ for guld og $\rho \approx 0.05$ for aluminium. $\tau = 1$: emnet er da fuldstændig transparent og al indkommen lys transmitteres igennem emnet. Eksempel: klart glas er tæt på at være totalt transmitterende i det synlige og i det infrarøde spektralområde for bølgelængder mindre end ca. $2.7 \mu\text{m}$ (se evt. figur 6).

I praksis vil intet legeme være ideelt absorberende, reflekterende eller transmitterende, men afhænge af materialets optiske egenskaber, som normalt er varierende med bølgelængden af lyset og indfaldsvinklen. Refleksions- og brydningsegenskaberne er bestemt af materialets brydningsindeks. Jo større brydningsindeks, jo større refleksion og afbøjning af lyset. Ovenstående kan illustreres ved at kigge på en almindelig glastrude med et brydningsindeks på ca. 1.5. Glasret vil da i luft reflektere omkring 4% af det indkomne lys for den første overflade og reflektere 7.7% totalt. I det synlige område vil de resterende 92.3% transmitteres igennem glasset. Almindelig glas vil være totalt absorberende i det infrarøde område ved bølgelængder over $2.7 \mu\text{m}$, og i dette tilfælde vil derfor 4% af lyset reflekteres ved den første overflade og de resterende 96% absorberes i glasset.

Vi har netop karakteriseret en blackbody som en overflade, som absorberer al indkommen stråling. Hvis overfladen har konstant temperatur, mens den er termisk isoleret fra omgivelserne, må den afgive/emittere den samme mængde af energi som den absorberer. Derfor er en blackbody en perfekt strålekilde såvel som en perfekt absorber. Et virkeligt objekt som vi observerer med et pyrometer er ikke en blackbody, mens dets egenskaber er ofte kvalitativt ens med en blackbody. En dækkende beskrivelse af en overflades strålingsegenskaber kan fås ved at indføre emissionskoefficienten for en overflade. Emissionskoefficienten, ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), er defineret ved brøkdelen af energien udstrålet fra en overflade i forhold til energien udstrålet fra et sort legeme med samme overfladeareal og temperatur. Den udstrålede energi fra et legeme er proportional med energien som absorberes (Kirchhoff's lov), således gælder:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad [2]$$

Såfremt emissionskoefficienten er konstant gennem hele spektralområdet kaldes legemet for et gråt legeme. I virkeligheden varierer overfladens emissionskoefficient med bølgelængde, temperatur, forarbejdning, ældning og evt. tilsmudsning. Det er sjældent muligt i litteraturen, at finde præcise oplysninger om diverse overfladers emissionskoefficienter.

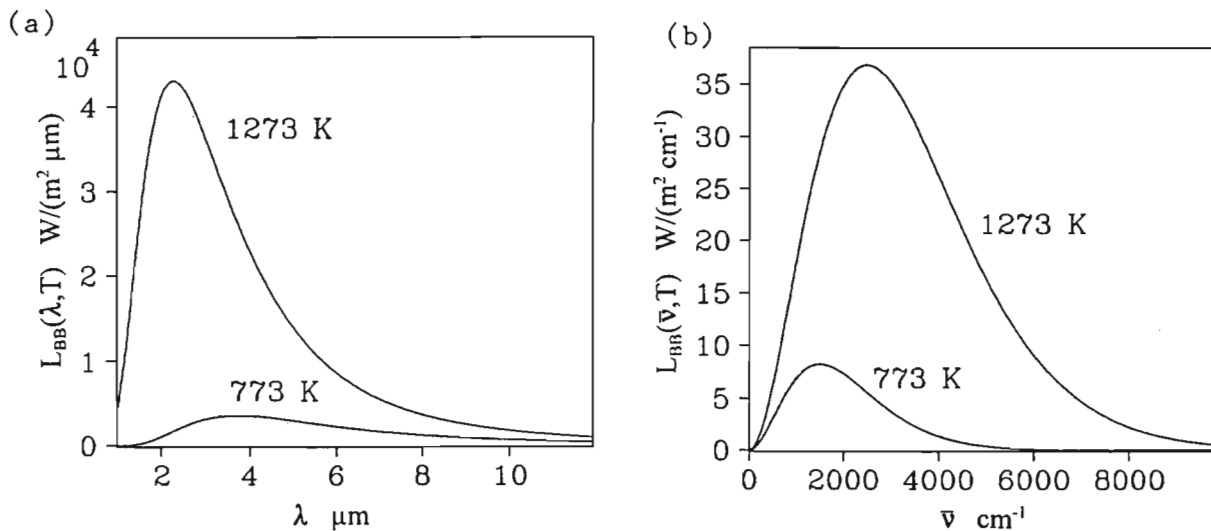
Max Karl Ernst Ludwig Planck var den første (1901) som udelukkende med teoretiske argumenter beskrev sammenhængen mellem temperatur og den spektrale energifordeling for en blackbody. I det følgende er *temperaturen angivet i kelvin*, hvor andet ikke er angivet, idet:

$$T [\text{K}] = t [^\circ\text{C}] + 273.15 \quad [3]$$

Plancks strålings lov, er givet ved:

$$L_{BB}(\lambda, T) = \frac{2\pi C_1}{C_2} \left[\frac{W}{m^2(d\lambda)} \right] \frac{1}{\lambda^5 (e^{\lambda T} - 1)} \quad [4]$$

hvor den første og anden strålingskonstant er givet ved: $C_1 = 0.5955 \cdot 10^{-16} [W m^2]$ og $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} [m K]$ og temperaturen i kelvin. Udtrykket beskriver den afgivne effekt pr. areal af objektet pr. enheds bølgelængde ud i en halvkugle (dvs. i en rumvinkel på 2π eller 2π sr). En nøjere undersøgelse af udtrykket viser, at udstrålingen fra en blackbody ved en hvilken som helst bølgelængde øges med stigende temperatur, og at den maksimalt udstrålede effekt pr. bølgelængde enhed skifter mod kortere bølgelængder ved stigende temperatur.



Figur 3. Blackbody-kurver ved 500 og 1000°C angivet som dels (a) funktion af bølgelængde jf. formel [4] og dels (b) som funktion af bølgetal. Det bemærkes, at blackbody-kurverne har forskellig maksimum og kurveform afhængig af om en beskrivelse som funktion af bølgelængde (dispersive instrumenter) eller bølgetal (interferometre) vælges. Arealet under kurverne er imidlertid ens.

Den totale udstrålede effekt per kvadratmeter fra en blackbody, E_{BB} , ved temperaturen T ind i en hemisfære, kan findes ved integration af Plancks strålings lov:

$$E_{BB}(T) = \int_0^{\infty} L_{BB}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 [W/m^2]; \quad \sigma = \frac{2C_1\pi^5}{15C_2^4} \quad [5]$$

hvor:

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [W m^{-2} K^{-4}]$ kaldet Stefan-Boltzmanns konstant. Ovenstående udtryk kaldes Stefan-Boltzmanns lov, som viser at den udstrålede energi fra en blackbody stiger med den fjerde potens af temperaturen i kelvin. En fordobling af temperaturen i kelvin modsvarer således en øgning af den udstrålede energi fra legemet med en faktor $2^4 = 16$. F.eks. Udstråles $418 W/m^2$ fra en sort overflade ved stuetemperatur (293 K) og $6686 W/m^2$ ved 586 K.

I litteraturen opgives ofte total-emissionskoefficienten istedet for at opgive emissionskoefficienten som funktion af bølgelængden. Total-emissionskoefficienten er givet ved forholdet mellem den totalt udstrålede energi i forhold til en blackbody ved samme

temperatur. Et legeme med en total-emissionskoefficient på ϵ_t udstråler en effekt proportional med ϵ_t , hvor $0 < \epsilon_t < 1$, dvs.:

$$E_t(T, \epsilon_t) = \epsilon_t \sigma T^4 \quad [6]$$

Udstrålingen fra en ikke-blackbody vil således altid være lavere end for en teoretisk blackbody og temperaturvisningen af pyrometeret (total- og en-farve pyrometeret, hvor ϵ er sat til 1) vil derfor være lavere end den faktiske temperatur. En anden vigtig pointe er at alle legemer med en temperatur over 0 K udsender termisk stråling. Alle ting i vor hverdag udstråler termisk stråling, men vi kan blot ikke se det med det menneskelige øje, da energien udstråles i det infrarøde. Hvad vi derimod ser er refleksion, absorption og transmission af synligt lys fra solen eller en lampe, som sjældent har noget at gøre med temperaturforholdene.

Wiens forskydnings lov, som angiver den bølgelængde hvor mest energi emitteres pr. bølgelængde enhed, kan ligeledes findes ud fra Plancks lov:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 \mu\text{m K} \Leftrightarrow \lambda_{\max} = \frac{2896 \mu\text{m}}{T} \quad [7]$$

Ved stuetemperatur på 293 K er der maksimal emission ved 9,9 μm , mens der ved f.eks. 1293 K er maksimum ved 2,2 μm . Omvendt kan solens overfladetemperatur beregnes til ca. 5800 K, såfremt maksimum udstråling sker ved 0,5 μm .

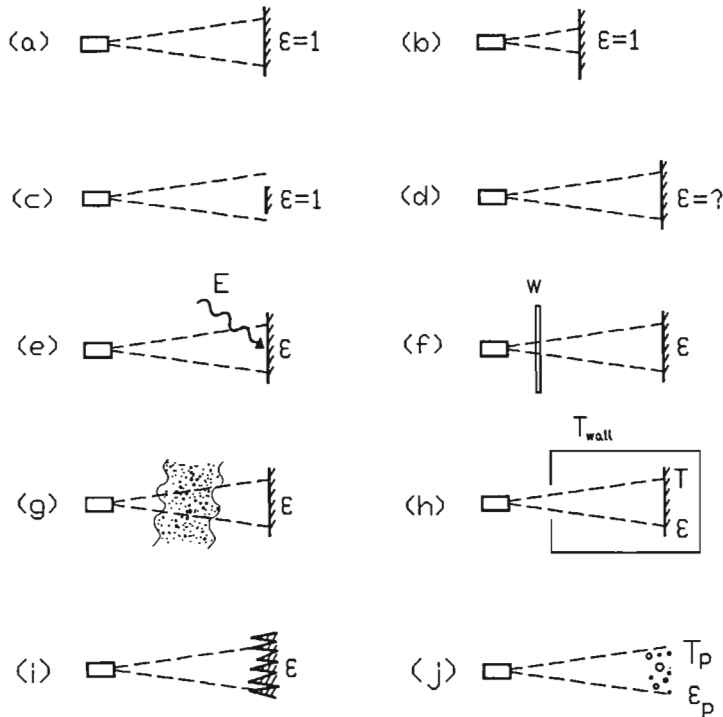
For materialer med dårlig varmeledningskoefficient og høj temperatur vil udstrålingen fra overfladen til kolde omgivelser være så stor at der kan forekomme en betydelig temperaturgradient ved overfladen. Overfladens temperatur bliver derved koldere end dybere inde i materialet. Ved ligevægt mellem den udstrålede energi og den tilførte energi ved varmeledning fås:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\epsilon_t \sigma T^4}{k} \quad [8]$$

hvor k er materialets varmeledningskoefficient ved den givne temperatur. For et typisk ikke metalisk materiale (f.eks. glas) er $k \approx 1 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ved 1000 K, og temperaturgradienten kan da beregnes vha. [8] til 57°C/mm ($\epsilon_t = 1$). For rustfri stål er $k \approx 17 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ved 1000 K, og temperaturgradienten er derfor tilsvarende lavere, ca. 3°C/mm. Da indtrængningsdybden af lys er lille for rene metaller spiller temperaturgradienter normalt en mindre rolle. Der kan imidlertid forekomme betydelige temperaturgradienter ved overflader for metaller med overfladebelægninger, oxidlag og lignende. I glas er indtrængningsdybden af lys stærkt bølgelængdeafhængigt.

3 Pyrometriske målinger og praktiske eksempler

Vi vil nu kigge nærmere på en række udvalgte målesituationer, som illustreret i figur 4.



Figur 4. (a) simpel pyromettermåling på emne med emissionskoefficient på 1, (b) afstanden til emnet har normalt ingen betydning såfremt emnet er indenfor synsfeltet, (c) udfylder emnet ikke synsfeltet vil der kunne begås store målefejl, (d) normalt er emissionskoefficienten ikke kendt for overfladen, (e) refleksion af stråling fra andre varmere flader kan give betydelige målefejl, (f) et målevindue kan påvirke målingen kraftigt, (g) atmosfæren/mediet som der måles igennem kan absorbere eller emitte stråling og give anledning til målefejl, (h) det kan være vanskeligt at måle temperatur på emner i en varm ovn, (i) en overflades effektive emissionskoefficient øges med øget overfladeruhed (f.eks. gevind eller slibning) og (j) måling af overfladetemperatur af gasbårne partikler eller gastemperatur (f.eks. kulstøv forbrænding).

- a) Ved temperaturmåling af en overflade med emissionskoefficient på 1 vil det kun være måleinstrumentets nøjagtighed og måleområde, som vil være afgørende for måleresultatet. En blackbodykilde (ϵ tæt på 1) med velkendt temperatur og jævn temperaturfordeling anvendes primært til kalibreringsformål.
- b) Afstanden mellem pyrometeret og overfladen som ønskes temperaturbestemt har ingen betydning forudsat atmosfæren er transparent og synsfeltet udgør måleområdet. Afstanden har betydning ved gasabsorption og partikelabsorption eller ved lysspredning fra partikler. Er temperaturen af måleområdet ikke jævn vil en middeltemperatur måles, som er vægtet mod den højeste temperatur i måleområdet.
- c) Er måleområdet mindre end synsfeltet vil en for lav temperatur måles (kolde omgivelser, total- eller en-farve pyrometer forudsat). Fejlen vil påvirke måleresultatet på samme måde, som fejl på angivelse af emissionskoefficienten, dvs. er arealet af måleområdet $x\%$ mindre end synsfeltet vil fejlen på temperaturmålingen være ca. $x/4\%$ for total-strålingspyrometeret.

d) I de færreste tilfælde måles på en overflade med et emissionstal tæt på 1 for alle bølgelængder, og emissionstallet må derfor findes for det bølgelængdeområde som pyrometeret måler ved. Oplysninger om bølgelængdeområdet som pyrometeret anvender findes ofte i betjeningsvejledningen eller kan oplyses af fabrikanten. Forskellen mellem den målte tilsyneladende temperatur T_m med emissionskoefficienten valgt til 1 og den sande temperatur T_s af en overflade med en given emissionskoefficient er givet ved ligning [9] gælder for et total-strålingspyrometer og ligning [10] for et smalbåndet en-farve pyrometer ved bølgelængden λ (ligningerne kan udledes ud fra ligning [4] til [6] og i [10] antages $\lambda T \ll C_2$):

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{I}{\epsilon}} T_m \quad [9]$$

$$\frac{I}{T_s} = \frac{I}{T_m} + \frac{\lambda}{C_2} \ln(\epsilon_\lambda) \quad [10]$$

For total-strålingspyrometeret er den sande temperatur i kelvin proportional med 4. roden af 1 over emissionskoefficienten, jf. ligning [9]. F.eks. måles der en temperatur på 1000 K af en ståloverflade med en emissionskoefficient på 1 fremfor en faktisk værdi på 0.85 vil den sande overflade temperatur af stålpladen være 1041 K. Stålpladens temperatur blev således målt 41°C for lavt.

For en-farve pyrometeret afhænger størrelse af fejlen på temperaturmålingen af fejlen på emissionskoefficienten og ved hvilken bølgelængde der måles ved, ϵ_λ , fremgår det af ligning [10]. Eksempel: Temperaturen af ovennævnte stålplade måles til 1000 K med et en-farve pyrometer (ϵ sat til 1) ved hhv. 2 og 10 μm , da vil den sande overflade temperatur være hhv. 23 og 127°C højere end målt.

Formel [11] og [12] kan benyttes til at vurdere usikkerheden på målingen for hhv. total-strålingspyrometeret og en-farve pyrometeret. For total-strålingspyrometeret gælder:

$$\Delta T \approx 1/4 \cdot \Delta \epsilon_t / \epsilon_t \cdot T \quad [11]$$

hvor $\Delta \epsilon_t / \epsilon_t$ er den relative fejl på total-emissionskoefficienten. Det mest almindelige moderne pyrometer er formodentlig en-farve pyrometeret. For dette gælder, at den absolute fejl på temperaturmålingen kan tilnærmelsesvis beskrives ved:

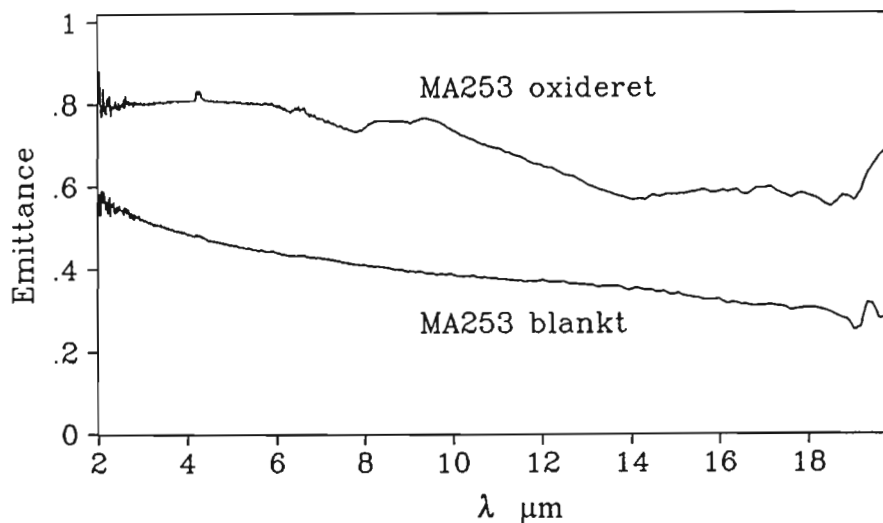
$$\Delta T \approx (\Delta \epsilon_\lambda / \epsilon_\lambda \cdot T^2 \cdot \lambda) / C_2 \quad [12]$$

Eksempel: En overflade skønnes at have en temperatur på 500°C og en emissionskoefficient på 0.8 ± 0.1 . To typer en-farve pyrometre haves som i manualen opgives at måle ved hhv. 2.0 μm og 14-18 μm . Heraf findes vha. [12]: $\Delta T(2 \mu\text{m}) = 0.1/0.8 \cdot (773 \text{ K})^2 \cdot 2.0 \cdot 10^{-6} \text{ m} / 0.014388 \text{ mK} = 10.4 \text{ K}$ og $\Delta T(16 \mu\text{m}) = 83 \text{ K}$. Pyrometeret som måler ved 2 μm er derfor det bedste valg. Jo kortere bølgelængde der måles ved, jo mindre er betydningen af kendskabet til emissionskoefficientens præcise værdi, såfremt der kan ses bort fra refleksion.

Et problem er at finde værdier for den aktuelle overflades emissionskoefficient ved pyrometerets bølgelængdeområde. Dette vil i mange tilfælde være vanskeligt omend ikke umuligt. Da emissionskoefficienten kan variere betydeligt med temperaturen kan det være nødvendigt at skønne overfladens temperatur. I litteraturoversigten er der givet nogle enkelte henvisninger til referencer, hvor oplysninger om diverse overfladers emissionskoefficienter mv. kan findes. Nogle typiske værdier af emissionskoefficienten er givet i tabel III. Emissionskoefficienten kan evt. bestemmes ved måling af overfladens temperatur med f.eks. et termoelement. Emissionstallet findes ved at justere emissionstallet for pyrometeret indtil visningen mellem de to instrumenter er ens. For de fleste materialer øges emissionstallet ved stigende temperatur. Desuden har metaller ofte stigende emissionstal med faldende bølgelængde, se figur 5.

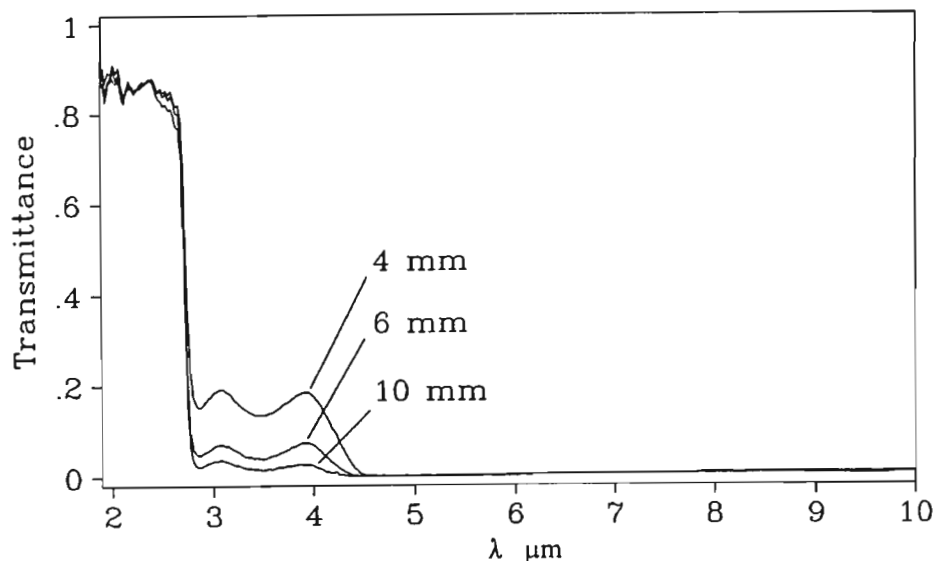
Tabel III. Typiske total-emissionskoefficienter for en række udvalgte materialer ved stuetemperatur med mindre andet er angivet.

Overflade & temperatur	Emissionskoefficient
Jern, rå overflade	0.6 - 0.85
Rustfri stål oxideret v. 260 °C	0.3
Rustfri stål m. sort oxidlag	0.7
Stål poleret	0.1 - 0.25
Papir & plast	0.9 - 0.95
Malet overflade	0.9 - 0.95
Hud	0.9 - 0.99
Sten	0.9
Guld	0.02 - 0.15



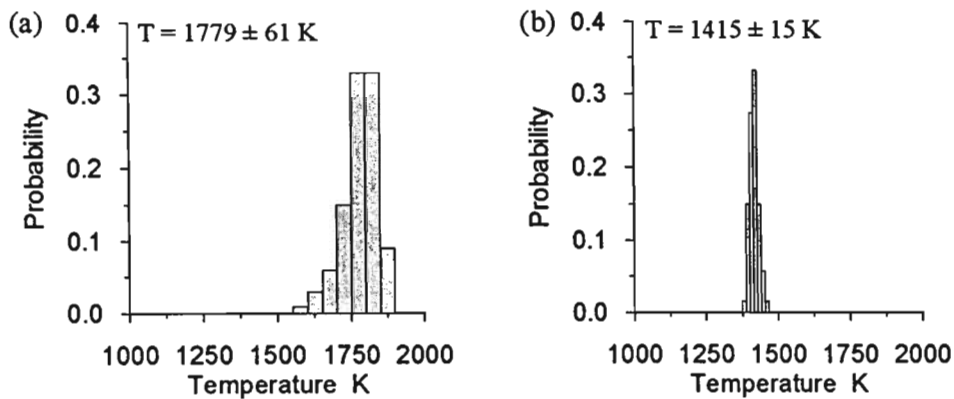
Figur 5. Emissionstal, ϵ_λ , af højtemperaturstål MA253 ved 500°C for en blank overflade (ny) og for en oxideret overflade (ca. 4 uger ved 700°C). FTIR- måling.

- e) Det kan være vanskeligt at måle temperaturen af en reflekterende overflade omgivet af en eller flere varme kilder. Temperaturmålingen kan korrigeres såfremt geometri, emissionskoefficienter og de ydre kilders temperatur er kendt.
- f) Det kan være nødvendigt, at måle via en måleport for visse temperaturmålinger. Da må det sikres, at målevinduet ikke påvirker målingen. Stråling som reflekteres af glasset vil kunne give fejl på temperaturen på størrelsesorden 2%, hvis der ikke korrigeres herfor. Skønt almindeligt glas er transparent i det synlige er det fuldstændig opal i det infrarøde spektralområde over ca. 3 μm og et pyrometer som f.eks. måler i området 3-5 μm eller 8-14 μm vil derfor primært vise glassets temperatur, se evt. figur 6. Vinduer som er transparente i det infrarøde er betydeligt dyrere i indkøb end alm. glas og er ofte sårbare mht. fugt, temperatur og mekaniske påvirkninger. Til krævende anvendelser vil kvarts eller safir vinduer ofte være et godt valg, såfremt det ikke giver konflikt med bølgelængdeområdet som pyrometeret benytter. Kvarts og safirglas er transparent indtil hhv. ca. 2,7 μm og 6 μm ved stue temperatur. Det vil være en betryggende kontrol, at aflæse pyrometervisningen på f.eks. en kalibreringskilde eller en stationær varm overflade med og uden vindue indskudt i synslinien for se en evt. påvirkning af måleresultatet. Vinkel mellem synslinien og glasset har betydning. Der skal desuden gøres opmærksom på, at varme vinduer vil generelt have et mindre spektralområde som er transparent end kolde.



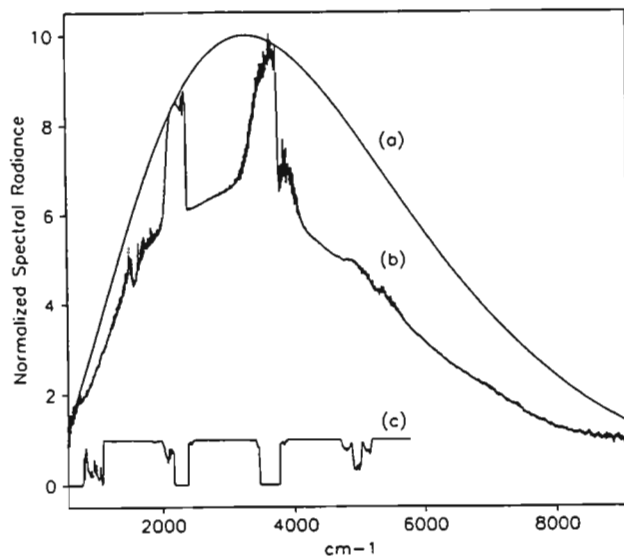
Figur 6. Transmission gennem alm. glas ved forskellige glastykkelser. Glasset absorberer al stråling i overfladen ved bølgelængder over ca. $4.5 \mu\text{m}$, og delvis i området $2.7-4.5 \mu\text{m}$ afhængig af glastykkelsen. Målingen er udført med et FTIR spektrometer.

- g) Atmosfæren eller mediet hvorigennem der måles vil ofte være absorberende, idet f.eks. vand og kuldioxid findes i større mængder i luften. Jf. forside billedet af rapporten har vand og kuldioxid (ca. 0.033%) i luft kraftige absorptionsbånd selv over korte afstande. Total-strålingspyrometeret er i den forbindelse særlig følsom, hvorimod en- og to-farve pyrometeret normalt vælges til at måle ved bølgelængder udenfor de kraftige gas absorptionsbånd og derfor ikke påvirker målingen. Varme gasser vil desuden emitte i de spektralområder hvor de absorberer, hvilket kan udnyttes til gastemperaturmåling. F.eks. har CO_2 et kraftigt bånd ved $4-4,8 \mu\text{m}$ som i forbrændingsanlæg kan udnyttes til måling af gastemperaturen. Partikler i luften vil kunne give anledning til absorption og udsendelse af stråling, dog ikke i bånd som for gasserne og det er derfor ikke på samme måde muligt at eliminere partiklernes indflydelse. Der er dog forskel på hvorledes meget små (f.eks. sod) og store partiklers (større end bølgelængden hvormed der måles) influerer på måleresultatet. Det er således muligt ved store bølgelængder at se igennem sod og tåger, hvilket bla. blev udnyttet af militæret under Golfkrigen hvor kampflyene trods tætte skyer af røg & sod kunne se hvad der foregik på landjorden vha. infrarøde kameraer ($3-5$ og $8-14 \mu\text{m}$).
- h) Temperaturen af emner i en varm ovn kan normalt ikke måles direkte med et pyrometer pga. reflekteret stråling fra ovnvæggene. Såfremt ovnens temperatur og emnets emissionskoefficient er kendt vil en korrektion til den målte temperatur kunne beregnes.
- i) Overfladeruheden har stor betydning for størrelsen af den effektive emissionskoefficient. Emissionskoefficienten af en blank overflade kan f.eks. øges ved slibning med groft sandpapir, ved maling, ved oxidering (varme- eller syrebehandling) og/eller ved drejning af gevind eller lignende.
- j) Gastemperatur og partikeltemperatur (se desuden pkt. (g)) kan måles med infrarødt udstyr i varme gasser, processtrømme og flammer. Det kan være vanskeligt, at vurdere kvaliteten af målingen såfremt der ikke haves et nøjere kendskab til processen og pyrometerets virkemåde. Eksempel på infrarød lokal gas temperaturmåling er vist i figur 7.



Figur 7. Histogram af den lokale temperaturfordeling i kulstøvsflamme målt med en fiberoptisk måleprobe udviklet på Risø. (a) gastemperatur i den intense forbrændingszone (flammen) og (b) i røggas. Gastemperaturen bestemmes ud fra CO_2 kraftige absorptionsbånd ved $4.3 \mu\text{m}$. Pga. den gode tidsopløsning og spektralopløsning af de infrarøde målinger kan øjeblikmålinger foretages på udvalgte gaslinier/bånd. Lignende målinger kunne hidtil kun måles vha. kostbart laserudstyr. Metoden er beskrevet af Clausen (1996).

Eksempel på et infrarødt spektrum af en intens brændende kulstøvsflamme er vist i figur 8.



Figur 8. Strålningsspektrum fra en 1.3 MW kulstøvsflamme målt vha. et FTIR spektrometer med Planck kurve ved 1676 K. (a) Planck kurve, (b) emissionsspektrum fra kulstøvsflamme og (c) beregnet transmittance spektrum af CO_2 med HITRAN ved 1700 K ($p_1 = 1 \text{ atm}$, $P_{\text{CO}_2} = 0.19$, $l = 1.2 \text{ m}$ of 4 cm^{-1} opløsning). Enheden på x-aksen er opgivet i bølgetal. Kontinuumstrålingen skyldes primært partikelstråling, dog er strålingsbånd fra CO_2 og vand tydelige i (b). Den retningsbestemte strålingseffekt kan findes til $98000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$ baseret på arealet under kurven (b). En nøjere beskrivelse af FTIR-målinger i fyrrum, se Clausen (1995).

4 Kalibrering og rådgivning

Der findes flere akkrediterede laboratorier i Danmark, hvor kontaktsensorer/termoelementer kan sendes til kalibrering. For strålingsmålere er den tilsvarende service ikke hidtil tilbudt i Danmark. Termometri laboratoriet på Risø har udvidet sit program ved at kunne tilbyde sporbar kalibrering af pyrometre og andet infrarødt udstyr i temperaturområdet fra -20 - 1100 °C. Desuden vil fabrikanter af pyrometre ofte kunne tilbyde en sporbar kalibrering af instrumentet ved indkøb. Kalibrering af infrarødt udstyr forventes at kunne tilbydes interesserede akkrediteret under DANAK fra medio 1996. En kalibrering under DANAK er internationalt anerkendt.

Pyrometeret bør kalibreres ved en eller flere udvalgte temperaturer tæt på de temperaturer som forventes målt med instrumentet. Ved kalibrering måles på en blackbodykilde ved kendt temperatur som instrumentets temperaturvisning sammenholdes med. Et kalibreringscertifikat udstedets med oplysninger om udstyr og resultatet af kalibreringen, f.eks. for et en-farve pyrometer:

Blackbody visning	IR-termometer	Afvigelse	Bemærkning
850°C	853°C	+ 3°C	ø 25 mm apertur
950°C	899°C	- 51°C	ø 0.5 mm apertur

Instrumentet bør i forbindelse med en kalibrering forsendes forsvarligt emballeret og beskyttet i en tilhørende instrumentkuffert, særligt følsomt udstyr kan evt. håndbæres til kalibreringslaboratoriet. Instrumentets brugsanvisning eller manual skal vedlægges (gerne kopi) sammen med oplysninger om kontaktperson, postadresse, telefonnummer, evt. fax/E-mail, kort note om applikation og ønskede kalibreringstemperaturer. Et kalibreringsinterval på 1 til 2 år vil i de fleste tilfælde være passende.

Termometri laboratoriet på Risø stiller iøvrigt vor måletekniske ekspertise og nyeste udstyr indenfor temperatur- og strålingsmåling til rådighed for interesserede. Konsulentarbejde udføres efter aftale.

5 Konklusion

Der er blevet givet en introduktion til teori og brug af pyrometre til temperaturmåling. Pålidelige og præcise målinger af overfladetemperaturer vil kunne måles med et hensigtsmæssigt valgt pyrometer, som anvendes korrekt. De billigste pyrometre har sjældent en målenøjagtighed bedre end $\pm 3^\circ\text{C}$, hertil skal tillægges usikkerheder mht. emissionskoefficientens værdi. De relevante formler, illustreret med eksempler, er blevet givet til beregning af korrektioner og vurdering af usikkerheder. Infrarøde temperaturmålinger med afvigelser på $0.1\text{-}0.5^\circ\text{C}$ kan opnås med det rette udstyr og omhu.

Det er mit indtryk, at kvaliteten af de fleste pyrometre er gode, men at instrumenternes visning sjældent kontrolleres ved en sporbar kalibrering. Ved kalibrering af udstyret vil grove målefejl pga. instrumentfejl kunne undgås, målenøjagtigheden vil ofte kunne øges betydeligt og temperaturmålingen vil være sporbar til den internationale temperaturskala (ITS-90).

Usikkerhed omkring brugen af pyrometre og subjektive vurderinger af emnets emissionskoefficient og betydning af andre kilders bidrag (stråling og absorption) kan være årsag til store målefejl. Kravene til nøjagtigheden af emissionskoefficienten er normalt væsentlig mindre ved beregninger end ved måling af overfladetemperaturen. Det er oftest umuligt, at finde oplysninger om emissionskoefficienten for udvalgte bølgelængder og temperaturer. Usikkerhederne kan ofte reduceres betydeligt ved simple forsøg eller tests.

På Risø anvendes foruden de almindelige pyrometre et spektrometre til fuldspektrale infrarøde målinger i bølgelængdeområdet $0.8 - 25 \mu\text{m}$. Der arbejdes med nye målemetoder til bestemmelse af overfladetemperatur, fuldspektrale emissionskoefficienter og transmissionskurver, lokale gastemperatur mv. Med spektrometeret kan mere komplekse måleopgaver løses, f.eks. temperaturmåling i flammer og røggasser til bestemmelse af gas-, partikel-, sod- og brændselstemperatur. Desuden kan gassammensætning (f.eks. CO , CO_2 , H_2O , C_xH_y , HCl , NO , SO_2) analyseres ud fra de enkelte gassers absorptionslinier og -bånd.

6 Litteratur

I det følgende er givet henvisninger til et udvalg af gode fagbøger, som kan anbefales for yderligere læsning.

Infrared Window and Dome Materials

Daniel C. Harris

Spie Optical Engineering Press, Volume TT10, 1992

Indhold: Udmærket bog mht. egenskaber og valg af optiske vinduer.

Temperature Measurement

L. Michalski, K. Eckersdorf and J. McGhee

John Wiley, 1991

Indhold: Bredt dækkende bog om temperaturmåling generelt, herunder ikke elektriske termometre, termoelektriske termometre, modstandstermometre, halvleder termometre, pyrometre mv. og forhold vedrørende den praktiske brug.

Radiation Exchange

Jack H. Taylor

Academic Press Inc., 1990

Indhold: Letforståelig introduktion til strålingslovene (Wien, Planck) og forståelse af de mest væsentlige og basale geometriske forhold og strålingsligninger.

Thermal Radiation Heat Transfer

Robert Siegel and John R. Howell

Hemisphere Publishing Corp., 3rd rd., 1992

Indhold: Bredt dækkende grundbog om strålingsudveksling og -beregning.

Spectroscopic Gas Temperature Measurement

Richard H. Tourin

Elsevier Publishing Company, 1966

Indhold: Gas temperaturmåling med spektroskopiske målemetoder.

7 Referencer

Clausen S. (1995) *Infrared combustion diagnostics in fluctuating flames*, SPIE 2506, Air Pollution and Visibility Measurements, 20-23 June, Munich, pp. 30-44.

Clausen S., *Local measurement of gas temperature with an infrared fibre-optic probe* (1996) submitted for publication in Measurement Science and Technology

Griffiths P.R. and Haseth J.A. de (1986) *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, John Wiley & Sons, New York, 1. ed.

Michalski L., Eckersdorf K. and McGhee J. (1991) *Temperature Measurement*, John Wiley publ.

Siegel Robert and Howell John R. (1992) *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Corp. Publ., 3rd ed.

8 Symbolliste

Absolut temperatur (absolute temperature) T
Absorption (absorption) α
Anden strålingskonstant (second radiation constant) C_2
Blackbody (blackbody)
Blackbody kurver (blackbody curves) $L_{BB}(\lambda, T)$, $L_{BB}(\tilde{\nu}, T)$
Bølgelængde (wavelength) λ
Bølgelængde med maks. blackbody udstråling (wavelength max. Radiation) λ_{\max}
Bølgetallet (wavenumber) $\tilde{\nu}$
Emissionskoefficient (emission coefficient) ϵ
En-farve pyrometer (one-colour pyrometer)
Flammer (flames)
FTIR emissionsspektrometer (FTIR emission spectrometer)
Første strålingskonstant (first radiation constant) C_1
Gas stråling (gas radiation)
Glødetråds pyrometer (disappearing filament pyrometer)
Infrarød, IR (infrared)
Kalibrering (calibration)
Kelvin (kelvin) [K]
Kirchhoff's lov (Kirchhoff's law)
Målte temperatur (measured temperature) T_m
Partikelstråling (radiation from particles)
Planck's strålingslov (Planck's radiation law)
Refleksion (reflection) ρ
Sande temperatur (true temperature) T_s
Sort legeme (blackbody)
Spektrale emissionskoefficient (spectral emission coefficient) ϵ_λ
Stefan-Boltmanns konstant (Stefan-Boltmanns constant) σ
Temperatur gradient (temperature gradient)
Termo-vision (thermal vision)
To-farve pyrometer (two-colour pyrometer)
Total-emissionskoefficient (total emissioncoefficient) ϵ_t
Total-strålingspyrometer (total radiation pyrometer)
Transmission (transmission) τ
Udstrålet energi fra blackbody (radiated energy from blackbody) E_{BB}
Udstrålet energi fra overflade (energi emitted from surface) E_t
Usikkerhed (uncertainty)
Varmeledningskoefficient (thermal conductivity) k
Wiens forskydningslov (Wiens displacement law)

Title and author

Measurement of Temperature by means of Infrared Instruments

(In Danish: Infrarød temperaturmåling)

Sønnik Clausen

ISBN	ISSN
87-550-2141-7	0106-2840

Department	Date
Optics and Fluid Dynamics Department	January 1996

Pages	Tables	Illustrations	References
21	3	8	5

Abstract (max. 2000 characters)

Methods for contactless measurement of temperature of objects, surfaces, particles and gas are described. Applications of the total, one- and two-color pyrometer, and results that can be obtained by Fourier transform infrared (FTIR) emission spectroscopy and thermal-vision are briefly discussed. The report is meant as an introduction and guidance to infrared temperature measurement. Selected references are given for further reading.

(in Danish)

Descriptors INIS/EDB

ACCURACY; EMISSION SPECTROSCOPY; FOURIER TRANSFORM SPECTROMETERS; INFRARED RADIATION; PYROMETERS; SENSITIVITY; TEMPERATURE MEASUREMENT

Available on request from Information Service Department, Risø National Laboratory, (Afdelingen for Informationservice, Forskningscenter Risø), P.O.Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark.
Telephone +45 46 77 46 77, ext. 4004/4005
Telex 43 116, Telefax +45 42 36 06 09

Målsætning

Risø skal tilføre samfund og industri nye udviklingsmuligheder inden for de tre hovedområder:

- *Energiteknologi og -planlægning*
- *Miljøaspekter af energi-, industri- og planteproduktion*
- *Materialer og måleteknikker til industrielle formål*

Risø skal desuden rådgive myndighederne i nukleare spørgsmål.

Forskningsprofil

Risø's forskning er strategisk, dvs. at den er langsigtet og skaber viden på områder, hvor der er et samfundsmæssigt behov. Forskningen sker inden for 11 programområder:

- *Vindenergi*
- *Energimaterialer og ny energiteknologi*
- *Energiplanlægning*
- *Atmosfæriske processers betydning for miljøet*
- *Processer og stofkredsløb i økosystemer*
- *Industriel sikkerhed*
- *Miljøaspekter ved planteavl*
- *Nuklear sikkerhed og strålingsbeskyttelse*
- *Materialer med særlige fysiske og kemiske egenskaber*
- *Strukturelle materialer*
- *Optisk måleteknik og informationsbehandling*

Overførsel af viden

Risø's forskningsresultater overføres til industri og myndigheder gennem:

- *Samarbejde om forskning*
- *Samarbejde i F&U konsortier*
- *F&U-klubber og forskerudveksling*
- *Center for Avanceret Teknologi*
- *Patent- og licensvirksomhed*

Til den videnskabelige verden gennem:

- *Publikationsvirksomhed*
- *Netværksamarbejde*
- *Ph.d.- og post doc.-uddannelse*

Risø-R-862(DA)
ISBN 87-550-2141-7
ISSN 0106-2840

Rekvireres fra
Afdelingen for Informationsservice
Forskningscenter Risø
Postboks 49, 4000 Roskilde
Telefon 46 77 46 77, lokal 4004/4005
Telex 43116, Telefax 46 75 56 27
<http://www.risoe.dk>
e-mail: risoe@risoe.dk

Nøgletal

Risø har over 900 ansatte, heraf mere end 300 forskere og 100 ph.d.-studende og post docs. Risø's budget for 1996 er på 471 millioner kroner, hvoraf 45 procent er indtægter fra programforskning og kontraktvirksomhed, mens resten dækkes af finanslovsbevillingen.