

## Måling af middelstrålingstemperatur

Nielsen, Peter V.; Albeck, H.

*Published in:*  
Teramisk og Atmosfærisk indeklima

*Publication date:*  
1970

*Document Version*  
Tidlig version også kaldet pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Nielsen, P. V., & Albeck, H. (1970). Måling af middelstrålingstemperatur. I *Teramisk og Atmosfærisk indeklima* (s. 279-305). Polyteknisk Forlag.

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

H. ALBECK OG PETER NIELSEN

## MÅLING AF MIDDELSTRÅLINGSTEMPERATUR

## MÅLING AF MIDDELSTRÅLINGSTEMPERATUR

Dette afsnit har som formål dels at orientere om det fysiske grundlag for i klimateknisk øjemed at karakterisere et strålingsklima ved en enkelt temperatur, dels at anvise de muligheder, man med forholdsvis simple instrumenter har for at måle denne temperatur.

### TEORETISK BAGGRUND

#### Middelstrålingstemperatur

Den termiske vekselvirkning mellem et objekt og dets omgivelser består for "tørre" varmemstrømmes vedkommende som bekendt af en konvektions- og en strålingskomponent.

Ligesom omgivelsernes indflydelse på objektets varmebalance ved konvektion i klimateknikken karakteriseres ved luftens temperatur og hastighedsvektor, karakteriseres deres indflydelse på objektets varmebalance ved stråling ved disses middelstrålingstemperatur, ved hvilken forstås den ensartede temperatur af absolut sorte omgivelser, der vil give samme varmeudveksling ved stråling mellem objekt og omgivelser som i de aktuelle (uensartede) omgivelser, der betragtes.

Det skal understreges som noget fundamentalt, dels at definitionen af begrebet middelstrålingstemperatur i hvert enkelt tilfælde er knyttet til et referenceobjekt, dels at den udelukkende vedrører den totale varmebalance for objektet og således ikke indebærer en beskrivelse af, hvorledes denne varmebalance er fordelt over objektets overflade.

#### Måling med ikke-orienterende instrumenter (Målevinkel $4\pi$ )

Det individuelle formål med en beskrivelse af et indendørs strålingsfelt vil være afgørende for, hvilket referenceobjekt og hvilke objektpositioner det vil være mest hensigtsmæssigt at lægge til grund for beskrivelsen.

Er formålet at karakterisere et strålingsfelt fra en fysiologisk synsvinkel og således konstatere den middelstrålingstemperatur, der som klimaparameter har indflydelse på det termiske velvære, bør referenceobjektet principielt i geometrisk og optisk henseende eftergøre en tænkt person i en for det pågældende rum naturlig klædedragt og i en passende middel-kropsstilling. Det vil være naturligt i denne forbindelse specielt at interessere sig for objektpositioner i mere permanente opholdsarealer eller arbejdssteder.

Ved en vurdering af et teknisk anlægs evne til at skabe et jævnt og stabilt klima vil det sikkert ofte falde naturligt at referere til et objekt i et systemnet, til hvis punkter der kan knyttes sammenhørende værdier af de øvrige klimaparametre og en middelstrålingstemperatur m.h.t. et ikke orienteret, optisk og geometrisk veldefineret legeme. Referenceobjektet vil naturligt her være en termisk grå<sup>\*)</sup> kugle med en så lille udstrækning sammenlignet med dens afstand til de strålende omgivelser, at dels de vinkelforhold, hvorunder den "ser"

<sup>\*)</sup> at en overflade er termisk grå betyder, at dens emissionstal (absorptionstal) er bølgelængdeuafhængigt, og at dens temperaturstråling (og absorption) følger Lamberts "Cosinuslov". En absolut sort flade er således et specialtilfælde inden for denne kategori.



de omgivende strålere, er uafhængige af kuglens diameter, dels at dens (tænkte) temperaturstråling ikke vil påvirke rummets strålingsfelt ("punktformig" kugle).

Sidstnævnte reference er heldig fra et måleteknisk synspunkt, idet en strålingstemperaturmåler enten indirekte ved hjælp af en passende målemetodik eller direkte ved sin følers udformning og optiske egenskaber i det bølgelængdeområde  $0,4\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$ , i hvilket "strålevarme" i praksis overføres, nødvendigvis må eftergøre den reference, der lægges til grund for strålingsfeltets beskrivelse.

Under een meget speciel forudsætning vil middelstrålingstemperaturen være uafhængig af det valgte referenceobjekt, nemlig i det hypotetiske tilfælde, at strålingsfeltet dels er fuldstændig jævnt - dvs. at den mod referenceobjektet indfaldende stråling fra enhver retning er ens såvel i spektral- som i intensitetsmæssig henseende - dels at den spektrale intensitetsfordeling er den samme som for strålingen fra et absolut sort legeme (dvs. følger Plancks lov). I så tilfælde vil der (altid) være identitet mellem det aktuelle felt og "middelstrålingstemperaturfeltet".

Selv om denne forudsætning naturligvis aldrig er opfyldt i praksis, vil indendørs strålingsfelter under forhold, hvor lys varmestråling (her tænkes specielt på direkte solstråling) indtager en underordnet betydning m.h.t. den termiske strålingsbelastning af objekter i opholdszonen, ofte være så gode tilnærmelser til jævne felter, at middelstrålingstemperaturen m.h.t. en lille termisk grå kugle vil ligge meget nær den middelstrålingstemperatur, som feltet vil repræsentere m.h.t. en person "på kuglens plads". Dette skyldes foruden forudsætningen om et forholdsvis jævnt strålingsfelt, dels at specielt en siddende persons projektionsareal i forskellige retninger har ret lille spredning, dels at strålingsudvekslingen som forudsat overvejende sker i det ultrarøde område (intensitetsmaksimum omkring  $10\mu\text{m}$  ved stuetemperatur), i hvilket en klædedragt uanset farve samt hud med stor tilnærmelse optræder som termisk grå.

Hvad angår specielt solindfalds indflydelse på det indendørs strålingsklima, vil der i direkte beskinneede opholdsarealer være tale om stærkt

ujævne strålingsfelter, i hvilke den væsentligste strålingsstrøm overføres ved bølgelængder i det synlige spektrum. Den middelstrålingstemperatur, som sådanne og andre "lyse" strålingsfelter vil repræsentere m.h.t. en termisk grå reference, vil kunne ligge signifikant over feltets middelstrålingstemperatur m.h.t. en dermed kongruent reference med optiske egenskaber som en normal påklædning (for hvilken absorptionstallet i det synlige område er fra  $\sim 0,2$  og opefter afhængigt af farven og i det ultrarøde spektrum nær 1).

I tilfælde, hvor måling af indendørs solstråling er et led i en vurdering af et termisk klima, som det opfattes af personer, vil det derfor være rigtigst at arbejde med et instrument, hvis føler er diffust absorberende med et absorptionstal, der er noget mindre for synligt lys end for langbølget stråling (f.eks. svarende til en overfladebehandling med en grålig, mat lak).

Som eksempel på sammensætningen af en lak, der er udviklet med det formål at approksimere hvid menneskehuds optiske egenskaber, kan refereres til [4]. Instrumentfølerens (bølgelængdeafhængige) strålingsegenskaber og strålingsfeltets energifordeling over spektret er som antydnet ovenfor afgørende for den varmebalance ved stråling og dermed for den middelstrålingstemperatur, der måles med instrumentet.

I denne forbindelse henledes opmærksomheden på, at det emissionstal, der er bestemmende ved beregningen af middelstrålingstemperaturen ud fra følerens varmebalance ved stråling er følerens emissionstal for langbølget stråling, idet "middelstrålingstemperaturfeltet" er et "mørkt" strålingsfelt i det temperaturområde, der har interesse i denne sammenhæng. Betydningen af disse forhold illustreres af figur 1.

I direkte solskin er det naturligvis vigtigt ved målinger med henblik på menneskers termiske opfattelse af omgivelserne, at den relative størrelse af det beskinne areal af føleren ligger tæt på den relative størrelse af det beskinne areal af den person, for hvilken målingen ønskes at være repræsentativ.

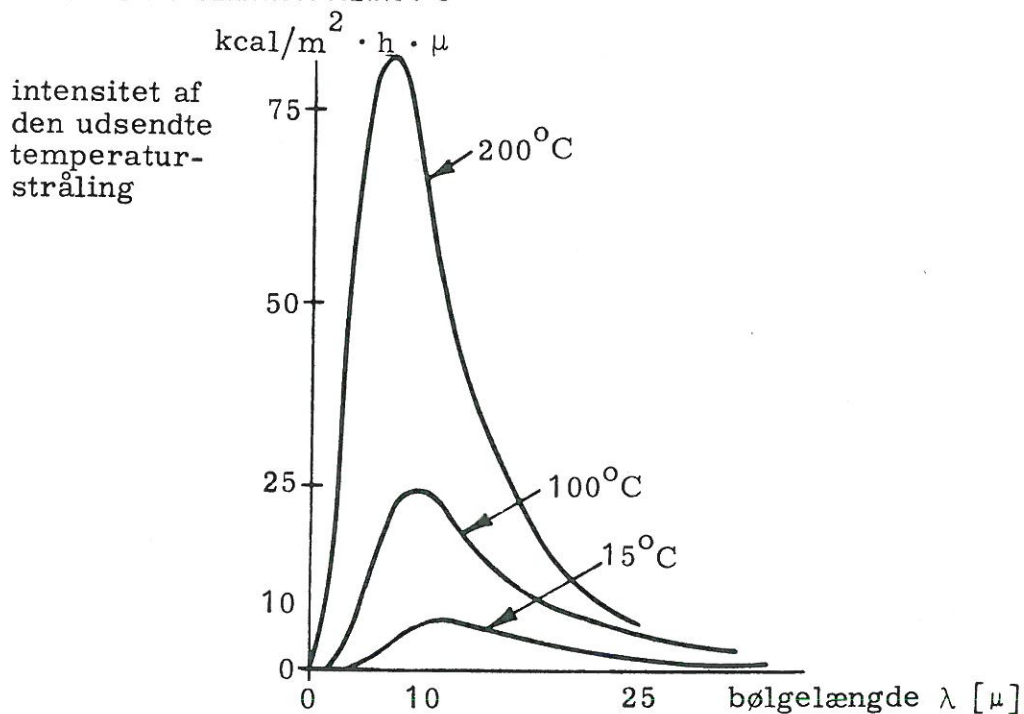


Fig. 1 a) Stråling fra absolut sort legeme. (Plancks lov).  
 Udstrålingsmaksimet forskydes ved stigende temperatur mod lavere bølgelængder (Wiens lov).

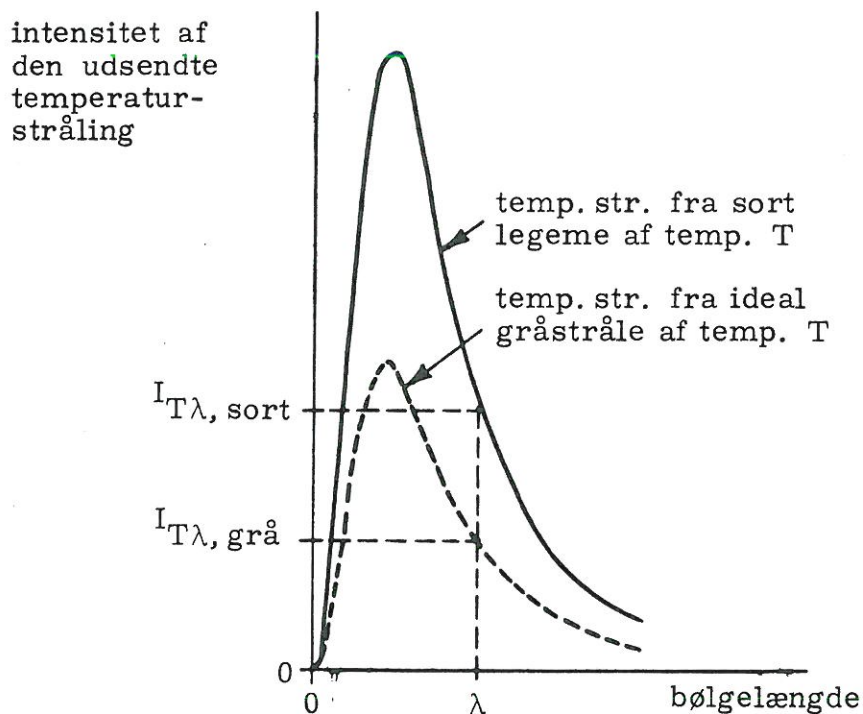


Fig. 1 b) Temperaturstråling fra ideal gråstråler  
 For en ideal gråstråler er forholdet  $\frac{I_{T\lambda, \text{grå}}}{I_{T\lambda, \text{sort}}}$   
 ens ved alle bølgelængder.  
 Forholdet er den termisk grå strålers  
 emissionstal (og absorptionstal).



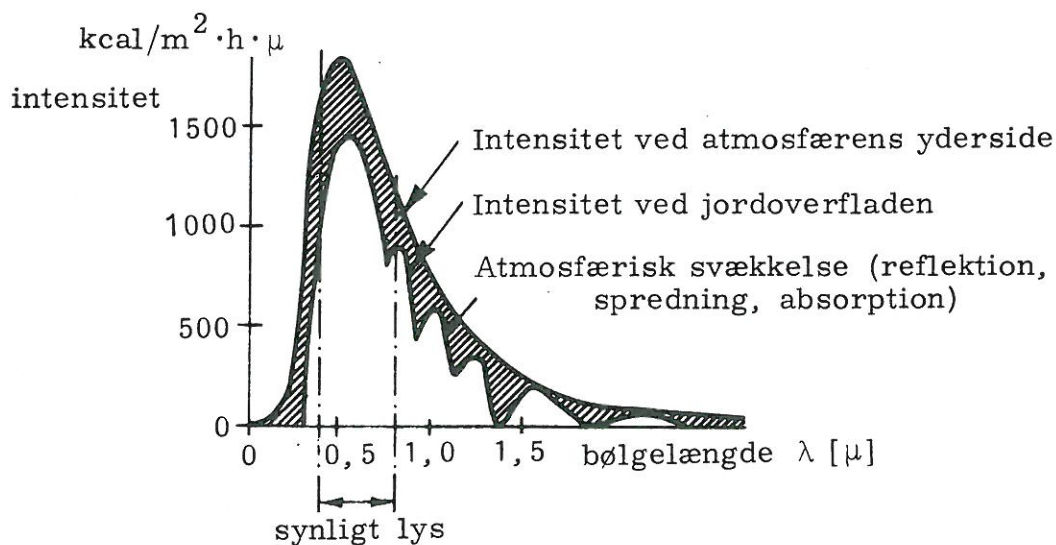


Fig. 1 c) Intensitetsfordeling for direkte solstråling

Solstrålingens energi  
ligger overvejende inden  
for det synlige spektrum.

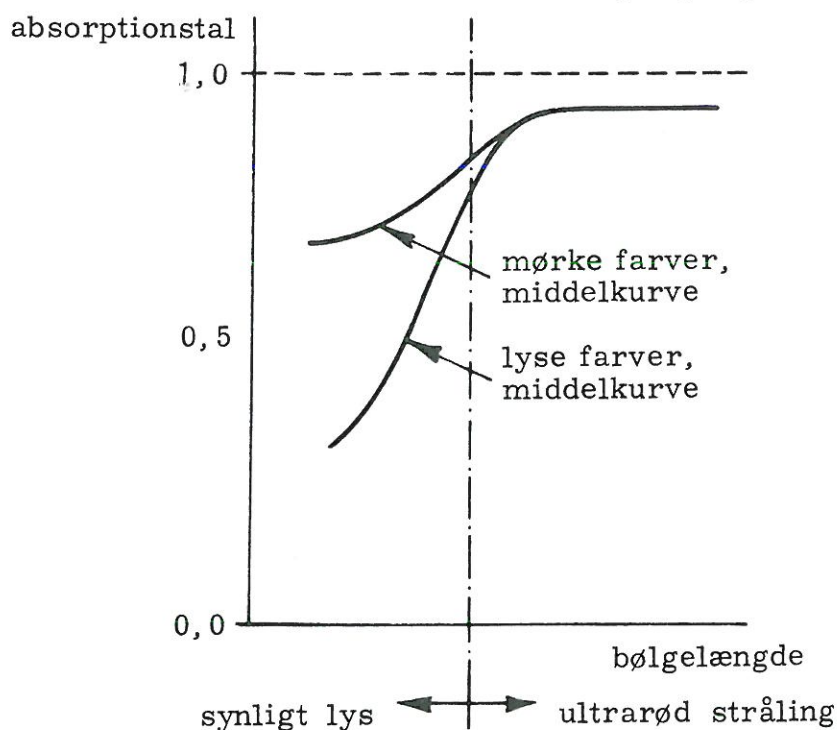


Fig. 1 d) Absorptionsforhold for beklædningsgenstande

En ideal grå stråler vil tillægge en indfaldende strålingsstrøm en vægt i sin termiske balance, der er uafhængig af strålingens bølgelængdefordeling - svarende til en vandret linie på diagrammet. Bl. a. menneskets strålingsoverflade vil derimod tilføres en desto større varmemængde, i jo højere grad den indfaldende strålingsenergistrøm bæres af bølgelængder, der ligger i spektrets langbølgede, ultrarøde del.

Hvorledes en (f. eks. kugleformet) føler bør placeres for under givne forudsætninger at være mest repræsentativ må vurderes i det enkelte tilfælde, bl. a. under hensyn til et muligt møblement, hvis eventuelle skyggende virkning vil kunne have stor indflydelse på måleresultatet.

Hvis f. eks. en person, m. h. t. hvilken middelstrålingstemperaturen ønskes vurderet, tænkes at sidde bag et bord, der afskærmer  $\sim$  halvdelen af hans krop for direkte solstråling, vil en strålingsmåler med en ellers korrekt overfladebehandlet føler ved en måling i solskinnet over bordet registrere en højere middelstrålingstemperatur end den, feltet repræsenterer m. h. t. personen, medens en måleposition under bordet vil resultere i måling af en for lav temperatur. I dette tilfælde vil en middelværdi af de to måleresultater give et resultat, der sikkert er bedre end hver af de to enkeltmålinger (jvf. betragtninger herom i [10]).

#### Måling med halvrumsorienterede instrumenter (Målevinkel $2\pi$ )

Den hidtidige beskrivelse af strålingstemperaturmålinger har taget sigte på forhold, hvor der rådes over instrumenter som et globetermometer, katatermometre eller et frigorimeter, hvilke alle måler i hele rumvinklen  $4\pi$  m. h. t. en reference (føleren), der har eller næsten har kugleform.

Med retningsbestemte instrumenter, specielt sådanne, der måler i et halvrum ( $2\pi$ ), er det til forskel fra de før nævnte strålingsmålere muligt at bestemme middelstrålingstemperaturer m. h. t. vilkårligt formede referencer og endvidere at få et udtryk for et strålingsfelts termiske ujævnhed<sup>\*)</sup>.

Antages en tænkt målereference at være termisk grå med et emissionstal, der er ens over hele overfladen - hvilken forudsætning er den almindelige approksimation ved beregning af strålevarmestrømme i klimateknikken - og forudsættes for simpelhedsskyld, at overfladen

---

<sup>\*)</sup> herom senere i afsnittet.



er overalt konveks (dvs. at intet fladepunkt kan se et andet), er sammenhængen mellem middelstrålingstemperaturen  $\theta_{rt,i}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) m.h.t. de enkelte overfladeelementer  $dA_i$  ( $\text{m}^2$ ) og middelstrålingstemperaturen  $\theta_{mrt}$  ( $^{\circ}\text{K}$ )\* m.h.t. den samlede overflade  $A_n$  ( $\text{m}^2$ ) udtrykt ved

$$\theta_{mrt}^4 = \int_{A_n} \frac{dA_i}{A_n} \cdot \theta_{rt,i}^4 \quad (^{\circ}\text{K}^4) \quad (1)$$

eller

$$\theta_{mrt}^4 = \sum_N \frac{\Delta A_i}{A_n} \cdot \theta_{rt,i}^4 \quad (^{\circ}\text{K}^4) \quad (2)$$

svarende til, at målereferencen approksimeres med - eller er - en af  $N$  plane flader ( $\Delta A_i$ ) opbygget figur.

En indirekte bestemmelse af  $\theta_{mrt}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) kræver  $N$  målinger af de partielle middelstrålingstemperaturer  $\theta_{rt,i}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) m.h.t. de enkelte tænkte delflader  $\Delta A_i$ . Disse målinger udføres med et instrument, der i så høj grad som muligt opfylder det krav at kalkulere omgivelsernes partielle strålingstemperaturer inden for et halvrum efter vægte i overensstemmelse med Lamberts "Cosinuslov".

Ved den enkelte delmåling orienteres instrumentet efter den - fiktive - delflades orienterede normal, og instrumentet placeres principielt således, at dets føler udgør et (plant) element beliggende i midten af den tænkte delflade. Det mest hensigtsmæssige antal målinger  $N$  svarende til opdelings finhed bør overvejes under hensyn til strålingsfeltets ujævnhed, idet det for en korrekt bestemmelse af  $\theta_{rt,i}$  er en forudsætning, at den - målte - middelstrålingstemperatur m. h.t. et midterelement af den respektive delflade  $\Delta A_i$  ligger meget nær  $\theta_{rt,i}$ .

\*) i engelsksproget litteratur betegnes middelstrålingstemperatur ofte med MRT for "Mean Radiant Temperature".

Den omtalte målemetode kræver som beskrevet en række orienterede målinger i forskellige i forvejen beregnede punkter, hvorefter middelstrålingstemperaturen m.h.t. den totale - fiktive - overflade beregnes efter formel (2).

Under forhold, hvor vandrette eller lodrette forskydninger af instrumentet for en given orientering af dette ikke vil have signifikant betydning for måleresultatet, vil målearbejdet kunne simplificeres ved blot med instrumentet i "midtpunktet" af den tænkte reference at foretage de N orienterede målinger. Ved ikke for stor spredning af de partielle middelstrålingstemperaturer  $\theta_{rt,i}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) vil man med tilstrækkelig tilnærmelse ved beregning af middelstrålingstemperaturen  $\theta_{mrt}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) kunne bruge den lineære tilnærmelse

$$\theta_{mrt} = \sum_N \frac{\Delta A_i}{A_n} \cdot \theta_{rt,i} \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

Den maksimalt mulige fejl ved en linearisering i temperaturområdet  $\theta_o$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) er bestemt ved

$$|R| = \frac{3x^2}{8T_o} \quad (\text{grd}) \quad (4)$$

hvor x (grd) er forskellen mellem største- og mindsteværdi for  $\theta_{rt,i}$ .

Ved måling med mere primitive typer retningsbestemte instrumenter, hvor måleresultatet som f.eks. ved termosøjlemålere er en elektrisk spænding som udtryk for strålingsudvekslingen mellem føleren med instrumentets temperatur og dens omgivelser, kan middelstrålingstemperaturen m.h.t. den sammensatte flade med fordel bestemmes af et af ligning (2) afledt udtryk

$$\theta_{mrt}^4 - \theta_I^4 = \sum_N \frac{\Delta A_i}{A_n} (\theta_{rt,i}^4 - \theta_I^4) \quad (^{\circ}\text{K}^4) \quad (5)$$

hvor  $\theta_I$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) betegner instrumenttemperaturen.

Fordelen ved bestemmelsen af  $\theta_{\text{mrt}}$  efter denne formel er, at leddet  $(\theta_{\text{rt},i}^4 - \theta_I^4)$  er proportionalt med strålingsudvekslingen mellem føler og omgivelser og derfor med den målte termospænding.

Forudsætningen for dette udtryks anvendelighed er dog, at instrumenttemperaturen vil kunne betragtes som uforanderlig under alle delmålinger.

Ved summering af de enkelte måleresultater findes  $\theta_{\text{mrt}}^4 - \theta_I^4$  ( $^{\circ}\text{K}^4$ ), hvor  $\theta_I$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) er kendt.

Til bestemmelse af  $\vartheta_{\text{mrt}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) kan f.eks. bruges omskrivningen

$$(\theta_{\text{mrt}}^4 - \theta_I^4) = (\vartheta_{\text{mrt}} - \vartheta_I) \cdot 10^8 \cdot \beta \quad (6)$$

hvor temperaturfaktoren

$$\beta = \frac{\left(\frac{\theta_{\text{mrt}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_I}{100}\right)^4}{\vartheta_{\text{mrt}} - \vartheta_I} \quad (7)$$

foreligger tabelleret som almindeligt håndbogsstof, (se f.eks. [7]).

Idet det retningsbestemte instruments føler måleteknisk repræsenterer et element af referencefladen, gør der sig for følerens overfladeegenskaber naturligvis de samme forhold gældende, hvad angår bestemmelsen af middelstrålingstemperaturen m.h.t. personer, som tidligere beskrevet.

Den nøjagtigste bestemmelse af middelstrålingstemperaturen m.h.t. en lille kugleflade med et retningsbestemt instrument opnås ved i et punkt at foretage et antal målinger i retninger som fladenormaler i et rektangulært polyeder og bestemme middelstrålingstemperaturen efter den med (2) analoge

$$\theta_{\text{mrt}}^4 = \frac{1}{N} \sum_N \theta_{\text{rt},i}^4 \quad (^{\circ}\text{K}^4) \quad (8)$$



evt. efter den med (3) analoge

$$\vartheta_{\text{mrt}} = \frac{1}{N} \sum_N \vartheta_{\text{rt},i} \quad (^\circ\text{C}) \quad (9)$$

Jo mere retningsbestemt det måleinstrument der arbejdes med er, jo større antal delmålinger er påkrævet.

I meget ujævne felter ( $\sim$  ved stor spredning af  $\vartheta_{\text{rt},i}$ ) vil nøjagtigheden ligeledes forøges med stigende antal delmålinger. Delmålingernes antal  $N$  kan her principielt vælges blandt tallene 4, 6, 8, 12 og 20 svarende til de regulære polyedre.

Som det indledningsvis er nævnt, vil de partielle strålingsstrømme mellem en overflade og dens omgivelser for samme middelstrålingstemperatur af disse kunne fordele sig på vilkårlig måde over fladen.

Som en til middelstrålingstemperaturen supplerende karakteristisk størrelse for et strålingsfelt vil man derfor kunne indføre et mål for de partielle strålevarmestømmes variation over referencefladen i forhold til strålingsstrømmene i "middelstrålingstemperaturfeltet":

Idet det i forhold til indflydelsen på strålingsstrømmen fra referencefladen  $A_n$  til omgivelserne vægtede middel af  $|\vartheta_{\text{rt},i}^4 - \vartheta_{\text{mrt}}^4|$  over  $A_n$  vil være et udtryk for strålingsfeltets termiske ujævnhed m.h.t. fladen  $A_n$ , vil ujævnheden under forudsætninger om referencefladen som for lign. (1) kunne udtrykkes ved

$$U = \int_{A_n} \frac{dA_i}{A_n} \cdot |\vartheta_{\text{rt},i}^4 - \vartheta_{\text{mrt}}^4| \quad (^\circ\text{K}^4) \quad (10)$$

eller

$$U = \sum_N \frac{\Delta A_i}{A_n} \cdot |\vartheta_{\text{rt},i}^4 - \vartheta_{\text{mrt}}^4| \quad (^\circ\text{K}^4) \quad (11)$$

Jo mindre ujævnhed et strålingsfelt repræsenterer m.h.t. en given reference, jo mindre "følsom" er middelstrålingstemperaturen over for mindre variationer i referencefladens form. Måling af et strålingsfelts ujævnhed - f.eks. m.h.t. en lille kugle efter den med (11) analoge

$$U = \frac{1}{N} \cdot \sum_N |\theta_{rt,i}^4 - \theta_{mrt}^4| \quad (^\circ K^4) \quad (12)$$

vil derfor kunne være eet af midlerne til vurdering af, i hvor høj grad det ved en måling under givne forudsætninger vil være formålstjenligt at lægge vægt på en korrekt målreference.

Til slut skal nævnes, at ingen af formlerne (1), (2), (3), (5), (10) og (11) har som forudsætning, at målreferencen er en lukket flade.

#### Beregning af middelstrålingstemperatur ud fra rummets overfladetemperaturer

Overfladetemperaturerne på et rums begrænsningsflader - forstået som strålingstemperaturer målt med en optisk overfladetemperaturmåler - kan under forudsætning af termisk grå overflader lægges til grund for en beregning af rummets middelstrålingstemperatur m.h.t. et legeme med en termisk grå overflade.

M.h.t. en overalt konveks (ikke nødvendigvis lukket) flade bestemmes middelstrålingstemperaturen af

$$\theta_{mrt}^4 = \sum \Delta F \cdot \theta_{rt}^4 \quad (\sum \Delta F = 1) \quad (^\circ K^4) \quad (13)$$

hvor  $\theta_{rt}$  er strålingstemperaturen af den begrænsningsflade, til hvilken vinkelforholdet fra referencefladen er  $\Delta F$ . Summationen udstrækkes over samtlige omgivelser (til hvilke vinkelforholdet er 1).

Specielt m.h.t. en kugleflade kan (13) omformes til



$$\theta_{\text{mrt}}^4 = \sum \frac{\Delta\omega}{4\pi} \cdot \theta_{\text{rt}}^4 \quad (\sum \Delta\omega = 4\pi) \quad (^\circ\text{K}^4) \quad (14)$$

hvor  $\theta_{\text{rt}}$  er strålingstemperaturen af den begrænsningsflade, der fra kuglens centrum ses under rumvinklen  $\Delta\omega$  rad.

Vedrørende fejlen ved linearisering af formlerne (13) og (14), henholdsvis til

$$\vartheta_{\text{mrt}} = \sum \Delta F \cdot \vartheta_{\text{rt}} \quad (^\circ\text{C}) \quad (15)$$

og

$$\vartheta_{\text{mrt}} = \sum \frac{\Delta\omega}{4\pi} \cdot \vartheta_{\text{rt}} \quad (^\circ\text{C}) \quad (16)$$

se forrige afsnit, lign. (4).

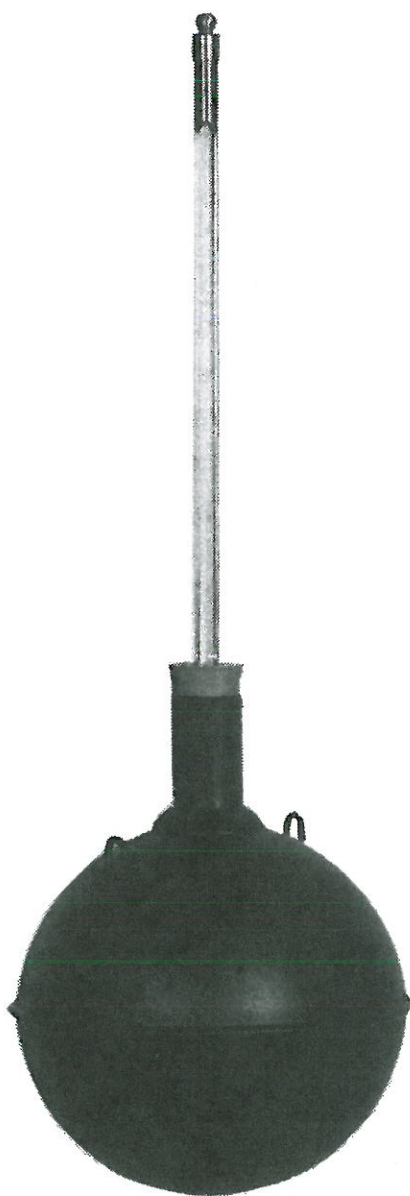
Almindelige vægflader optræder med god tilnærmelse som termisk grå strålere, og den ovenfor beskrevne metode til beregning af middelstrålingstemperaturer vil være anvendelig under forhold, hvor der ikke optræder stærkt retningsbestemte strålingsstrømme som f. eks. ved solindfald gennem uafskærmede vinduer.

## INSTRUMENTER

Globetermometer

Beskrivelse af globetermometer:

Globetermometret bestemmer temperaturen af et kugleformet legeme, der er i varmebalance med omgivelserne ved stråling og konvektion. Det består almindeligvis af en sort-farvet hul kobberkugle og et termometer, der placeres med termometerbeholderen i kuglens midte, se fig. 2.



Når globetermometret er placeret i måleområdet, og det er i varmebalance med omgivelserne, er de varmestrømme, der overføres ved henholdsvis stråling og konvektion, lige store og modsat rettede. Der gælder da følgende ligning, hvor første led er varmestrømmen overført ved stråling og andet led varmestrømmen overført ved konvektion:

$$\varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta_{\text{mrt}}^4 - \theta_g^4) - \alpha \cdot (\vartheta_g - \vartheta_a) = 0 \quad (17)$$

$\varepsilon$  : Emissionsforhold

$\sigma$  : Stefan-Boltzmanns konstant

$\alpha$  : Konvektiv varmeovergangstal

$\theta_{\text{mrt}}$  : Middelstrålingstemperatur ( $^{\circ}\text{K}$ )

$\theta_g$  : Globetemperatur ( $^{\circ}\text{K}$ )

$\vartheta_g$  : Globetemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\vartheta_a$  : Lufttemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

Det konvektive varmeovergangstal  $\alpha$  er en funktion af globediametren, lufthastigheden og principielt også af den numeriske differens mellem globe- og lufttemperatur.

$$\alpha = f(d, v, |\vartheta_g - \vartheta_a|) \quad (18)$$

Af traditionelle årsager fremstilles globetermometret med en diameter på 15,2 cm, 6 in, men det er i øvrigt underordnet hvilken diameter globetermometret har, blot sammenhængen angivet i ligning (18) kendes for den globediameter, der anvendes.

#### Målemetode

Globetemperaturen samt middelværdierne af lufttemperatur og lufthastighed bestemmes i måleområdet. For et globetermometer med en diameter på 15,2 cm og et emissionsforhold på 0,95 angiver

Bedford og Warner følgende nomogrammer til bestemmelse af middelstrålingstemperaturen, se fig. 3a og 3b [1], [2].

Nomogrammerne anvendes på følgende måde. En ret linie lægges gennem punkterne for de aktuelle værdier på skalaen A og skalaen B til skæring med skalaen C.

Det sidste skæringspunkt forbindes med en ny ret linie til punktet for den aktuelle værdi på skalaen D og denne linies skæringspunkt med skalaen E giver middelstrålingstemperaturen.

For globetermometre med diametre fra 5 til 30 cm giver [5] et nomogram til bestemmelse af middelstrålingstemperaturen gældende for lufthastigheder ned til 5 cm/s.

Globetermometret er hensigtsmæssigt at anvende i situationer, hvor der foretages registrerende målinger i et større tidsrum.

Der kan anvendes samme føler som ved lufttemperaturmåling, f. eks. termoelement, og derfor også samme registrerende instrument.

Det er muligt at iagttage tidsforløbet af de størrelser, der indgår i bestemmelsen af middelstrålingstemperaturen og dermed sikre, at globetermometret virkelig er i varmebalance med omgivelserne.

Af hensyn til sidstnævnte forhold er det også en nødvendig betingelse, at der foretages en eller anden form for registrerende måling, hvis det kan formodes, at der er væsentlige ændringer i lufthastighed og lufttemperatur i indstillingstiden. I denne forbindelse skal det nævnes, at globetermometret har en lang indstillingstid, den er f. eks. 20 minutter for et 15,2 cm globetermometer med en kugleskal af kobber.

### Middelstrålingstemperatur

Et mat sort globetermometer bestemmer middelstrålingstemperaturen med hensyn til en termisk grå kugle, fordi dens overflade har et absorptionsforhold, der er konstant og uafhængig af bølgelængden af den indstrålede energi.

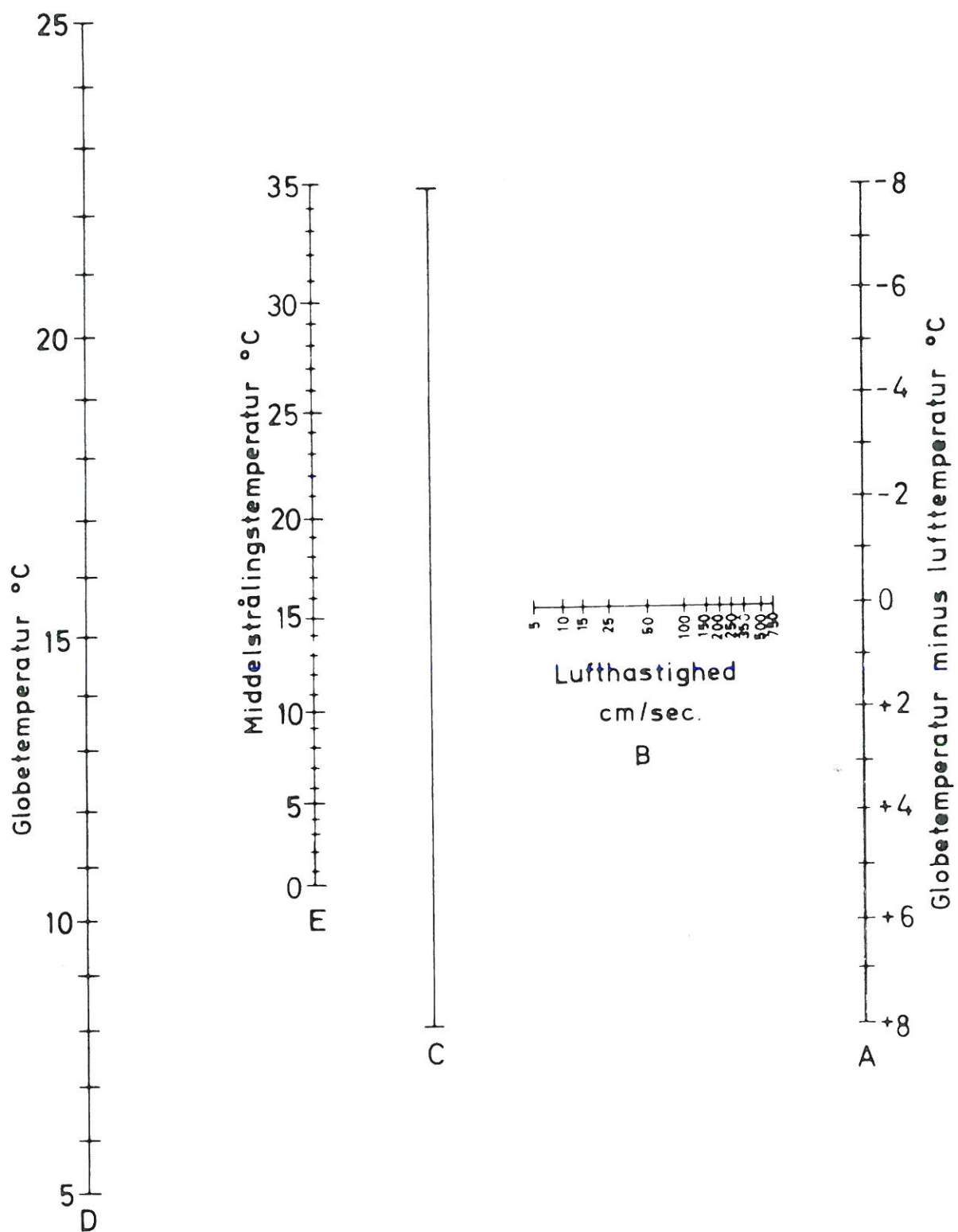


Fig. 3 a



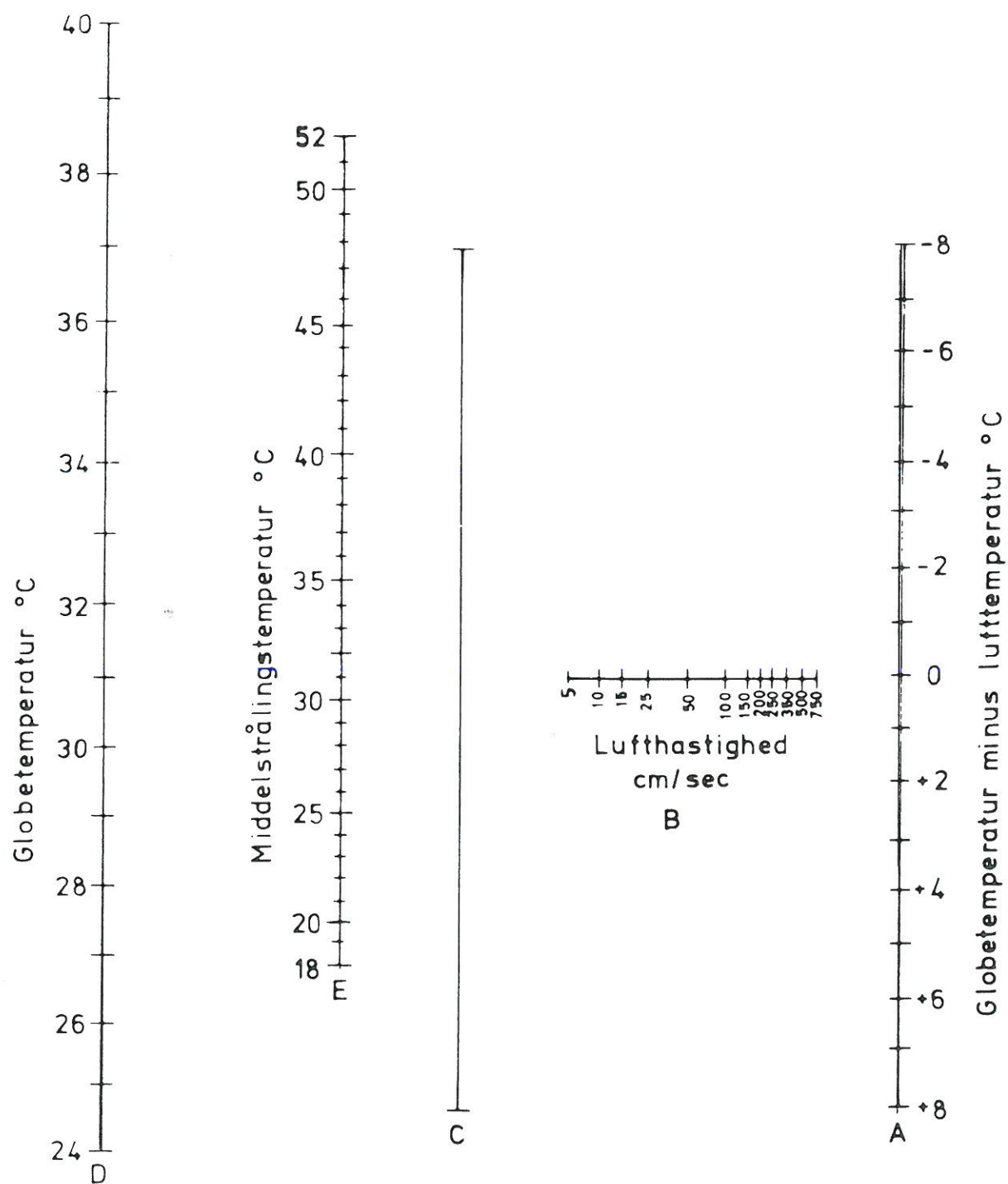


Fig. 3 b

Ønskes middelstrålingstemperaturen bestemt med hensyn til en person, kan globetermometret også anvendes, såfremt der kun indgår små energimængder af kortbølget stråling, og der kun er små variationer i strålingsfeltets størrelse i de forskellige retninger.

Indgår der væsentlige mængder af kortbølget stråling i globetermometrets varmebalance, som f.eks. ved direkte bestråling af sollys, vil det registrere en middelstrålingstemperatur, der er for høj, hvis den skal sættes i relation til en person. Dette forhold er søgt afhjulpet i enkelte situationer ved at anvende et globetermometer med en farve med samme absorptionsforhold som funktion af bølgelængden som et menneskes hudoverflade, men der findes ingen fast norm for anvendelse af denne metode [4].

Der skal i øvrigt henvises til kapitlet Teoretisk Baggrund, hvor der er gjort nærmere rede for de forhold, der skal tages i betragtning ved måling og vurdering af middelstrålingstemperaturen.

### Katatermometer

Beskrivelse af katatermometer:

Katatermometret er et termometer med en stor tyndvægget termometerbeholder og to målestreger for henholdsvis 38 og 35 °C, se fig. 4. En måling med et katatermometer udføres ved først at ophænge det i måleområdet, derefter opvarme det i et vandbad, aftørre det og bestemme dets afkølingstid fra 38 °C til 35 °C.

Den varmemængde der afgives pr. arealenhed ved denne afkøling kaldes katatermometrets konstant  $K$  og den er bestemt og angivet individuelt for hvert termometer i enheden  $\text{mcal/cm}^2$

Kvotienten  $K/t$ , hvor  $t$  er afkølingstiden, kaldes kataværdien  $A$ .

Den afgivne varmemængde pr. areal- og tidsenhed, kataværdien  $A$ , overføres til omgivelserne ved henholdsvis konvektion og stråling efter følgende ligning:



$$A = \alpha \cdot (36,5 - \vartheta_a) + \epsilon \cdot \sigma \cdot ((273 + 36,5)^4 - \vartheta_{mrt}^4) \quad (19)$$

K : Katatermometrets konstant ( $\text{mcal}/\text{cm}^2$ )

t : Afkølingstid (s)

A : Kataværdi ( $\text{mcal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )

$\alpha$  : Konvektiv varmeovergangstal ( $\text{mcal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$\epsilon$  : Emissionsforhold

$\sigma$  : Stefan-Boltzmanns konstant ( $0,138 \cdot 10^{-8} \text{ mcal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}^4$ )

$\vartheta_a$  : Lufttemperatur ( $^\circ\text{C}$ )

$\vartheta_{mrt}$  : Middelstrålingstemperatur ( $^\circ\text{K}$ )

## Målemetode

Som tidligere nævnt kan lufthastigheden bestemmes ud fra en måling med et katatermometer - samt en lufttemperaturmåling - under forudsætning af at middelstrålingstemperaturen ligger tæt ved lufttemperaturen. Dette beror på, at det konvektive varmeovergangstal  $\alpha$  i ligning (19) er en kendt funktion af lufthastigheden og i denne situation den eneste ubekendte.

Når middelstrålingstemperaturen skal bestemmes, måles afkølingstiden for to katatermometre samtidig. De to termometre skal have forskellig emissionsforhold, f.eks. kan det ene (1) være forsølvet på termometerbeholderen, medens det andet (2) har den naturlige glasoverflade. Dannes differensen mellem de to termometres kata-værdier, elimineres lufthastighedens samt lufttemperaturens indflydelse og af ligning (19) fås følgende ligning til bestemmelse af middelstrålingstemperaturen:

$$A_2 - A_1 = \sigma \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot ((273 + 36,5)^4 - \theta_{mrt}^4) \quad (20)$$

$A_1$  : Kataværdi for (1)

$A_2$  : Kataværdi for (2)

$\varepsilon_1$  : Emissionsforhold for (1)

$\varepsilon_2$  : Emissionsforhold for (2)

Ligning (19) og (20) gælder under forudsætning af at differensen mellem kata- og lufttemperatur samt kata- og middelstrålingstemperatur er meget større end 1,5 °C. I praksis er dette opfyldt hvis lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen er mindre end 30 °C. Er temperaturerne højere, skal der anvendes et katatermometer med et højere måleområde f.eks. et med afmærkninger for 130 og 125 °F.

F. Bradtke [3] har bestemt en kurve, fig. 5, hvor middelstrålingstemperaturen er givet som funktion af differensen mellem kataværdierne  $A_2 - A_1$ . De to katatermometre har et emissionsforhold på henholdsvis 0,88 og 0,10.



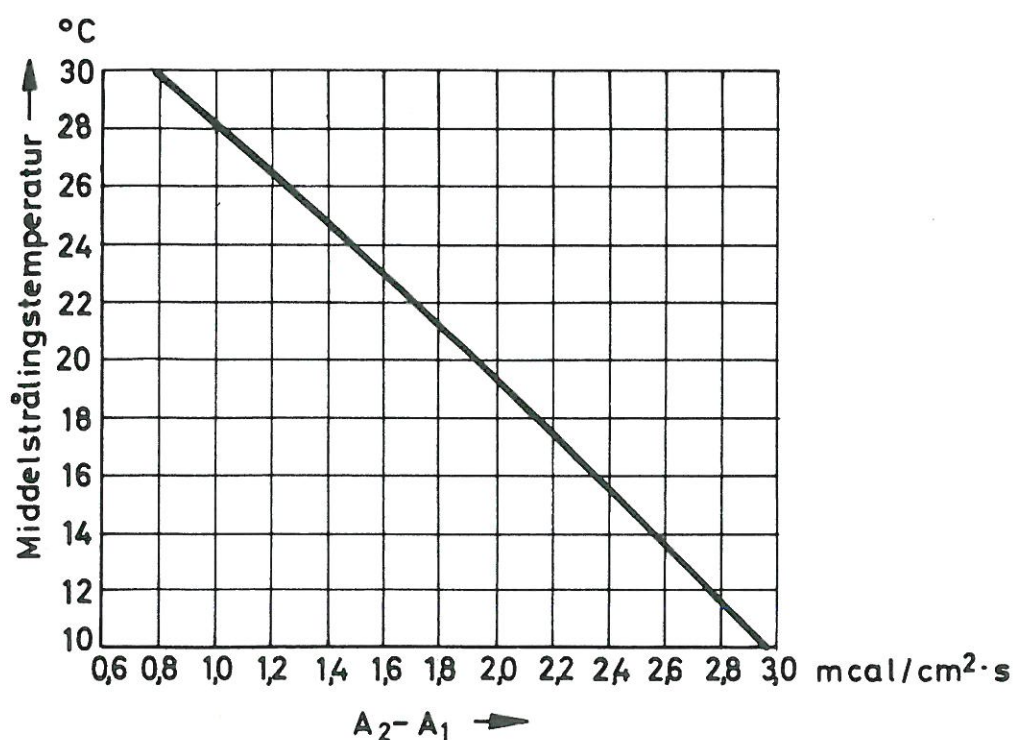


Fig. 5.

Det viser sig, at katatermometrets konstant  $K$  kan bestemmes til værdier, der afviger meget fra hinanden alt efter hvilken kalibreringsmetode, der anvendes [3], [8].

Bestemmes  $K$  kalorimetrisk, fås en værdi der er 20 % større end den værdi, der måles ved den traditionelle justering, hvor katatermometret afkøler i stillestående luft i en kasse, der har samme væg- og lufttemperatur. Beregnes middelstrålingstemperaturen efter ligning (20) eller efter kurven fig. 5 forudsættes det, at konstanten  $K$  er bestemt kalorimetrisk, fordi dette giver den fysisk rigtige værdi. Det er ofte den traditionelle konstant  $K$ , der er angivet på termometret, derfor skal denne multipliceres med faktoren 1,2 før den anvendes [3].

Årsagen til at man også fortsat anvender den traditionelle konstant  $K$ , er at denne er grundlag for mange empiriske ligninger og tabeller bl.a. den ligning hvorfra lufthastigheden bestemmes.



De to katatermometre skal placeres så tæt ved hinanden, at de udsættes for samme luftbevægelse og er påvirket af samme strålingsfelt. En afstand på 20 cm vil være passende fordi de heller ikke må påvirke hinanden væsentligt ved gensidig stråling eller konvektion.

Katatermometret skal holdes lodret under opvarmningen for at få en sammenhængende væskesøjle. Det forsølvede katatermometer bør første gang opvarmes ekstra meget for at sikre, at enhver dampfyldning, som kan skjule sig under det forsølvede område, er drevet op i det øverste kammer på termometret.

Målingerne bør gentages nogle gange for at forebygge fejl hidrørende fra ændringer af lufthastighed og lufttemperatur i måleperioderne. En måleperiode er af størrelsesordenen 50 - 150 s for et uforsølvet katatermometer og 100 - 250 s for et forsølvet.

### Middelstrålingstemperatur

Katatermometret bestemmer middelstrålingstemperaturen med hensyn til den specielle facon og overfladeegenskab det har og dette bør principielt tages i betragtning, hvis der sammenlignes med middelstrålingstemperaturen målt med f.eks. et globetermometer.

Hvis der ikke er store variationer i strålingsfeltets størrelse i forskellige retninger, og der kun indgår små energimængder af kortbølget stråling, kan der dog umiddelbart foretages sammenligning med middelstrålingstemperaturen med hensyn til en termisk grå kugle og i øvrigt alle andre geometrier f.eks. en person.

Der skal igen henvises til kapitlet Teoretisk Baggrund, hvor der er gjort nærmere rede for de forhold, der skal tages i betragtning ved måling og vurdering af middelstrålingstemperaturen.

### Frigorimeter

Et frigorimeter er et instrument til registrering af den varmemængde, der kræves til over en periode at fastholde et følelegeme på en bestemt temperatur højere end omgivelsernes temperaturniveau.

Davoser-frigorimetrets føler er en 7,5 cm $\phi$  kugle med modstands-opvarmning. I instrumentets moderne udførelse [9] sker temperatur-reguleringen kontinuert, og den tilførte varmemængde aflæses på en watttimemåler.

Frigorimetret anvendes til bestemmelse af middelstrålingstemperatur m.h.t. en kugle, ved at der foretages en sammenlignende måling med en sværtet og en poleret kugle.

Ved subtraktion af de to måleresultater findes differensen mellem kuglernes strålingsudveksling med omgivelserne. Udtrykkes denne størrelse efter teorien for termisk grå stråling, kan der opstilles en ligning til bestemmelse af middelstrålingstemperaturen m.h.t. kuglerne:

$$\sigma (\epsilon_b - \epsilon_p) \cdot [\theta_f^4 - \theta_{mrt}^4] = \frac{Q_w}{\Delta\tau} \Big|_b - \frac{Q_w}{\Delta\tau} \Big|_p \quad (21)$$

$\theta_{mrt}$  : middelstrålingstemperaturen m.h.t.  
frigorimeterkuglerne

$\theta_f$  : frigorimetertemperaturen

$\sigma$  : Stefan-Boltzmanns konstant

$\epsilon_b, \epsilon_p$  : emissionstal henholdsvis for sværtet og  
for poleret målekugle

$Q_w$  : varmemængde tilført over perioden

$\Delta\tau$  : måleperiode

$b, p$  : indices for måling med sværtet, henholdsvis  
poleret frigorimeterkugle.

#### Termosøjlemålere, bolometre

I denne gruppe instrumenter er den termiske føler almindeligvis indbygget i - og med varmeledende kontakt til - et instrumenthus af høj varmekapacitet og -fordelingsevne. Temperaturforskellen mellem

føler og instrument er her så ringe, at den er et udtryk for følerens strålingsudveksling med instrumentets omgivelser. Udformningen og overfladen af følerens afskærmning fastlægger de vægte, hvormed instrumentet kalkulerer middelværdien af de omgivende genstandes (partielle) strålingstemperaturer.

En termosøjle, hvis ene sæt loddesteder er udvalset til en tynd skive, og hvis andet sæt er i varmeledende forbindelse med instrumenthus (Moll-termosøjle), er en almindelig anvendt detektor i instrumenter til brug i stuetemperaturområdet. Visse instrumenter er forsynet med en sekundær termosøjle til kompensering for svingninger af instrumenttemperaturen.

I bolometre måles temperaturforskellen mellem den strålingseksponerede føler og instrumentet ved hjælp af modstandsfølere. En forøgelse af følsomheden for de her nævnte instrumenter er opnået ved en udførelse, hvor den strålingseksponerede føler er indesluttet i et udpumpet, transparent hylster.

Instrumentgruppen dækker over et vidt spænd af teknisk udstyr omfattende både høj- og lavtemperaturmålere.

Instrumenter til lavtemperaturmåling tager i overvejende grad sigte på registrering af overfladetemperaturer og måler derfor normalt inden for en så snæver rumvinkel, at instrumenterne ikke vil være hensigtsmæssige til bestemmelse af middelstrålingstemperaturer som beskrevet under afsnittet om måling med halvrumsorienterede instrumenter.

Ref. [6] henviser til en termosøjlemåler specielt til bestemmelse af middelstrålingstemperaturer af et halvrum m.h.t. et termisk gråt fladeelement.



## RESUME

Middelstrålingstemperaturen m.h.t. et objekt er en termisk parameter, der karakteriserer de strålende omgivers samlede indflydelse på objektets varmebalance.

Denne temperatur er analytisk betragtet et vægtet middel af de temperaturer, som de fra objektet synlige strålere hver for sig skal antage som absolut sorte, for at de partielle strålevarmestrømme mellem objekt og omgivelser vil være uforandrede. Jo større ensartethed, omgivelsernes sortstrålingstemperaturer udviser, jo mindre vil middelstrålingstemperaturen variere med objektets form og placering i rummet.

Under forhold med store dårligt isolerede ydre begrænsningsflader eller ved specielt direkte solindfald, vil middelstrålingstemperaturen kunne afvige betydeligt fra lufttemperaturen i rummet og endvidere kunne udvise betydelig afhængighed af objektets form og position.

Hvor væsentlige strålingsstrømme overføres ved bølgelængder i det synlige spektrum som under direkte solindfald, vil strålingsfeltet kunne udvise en betragtelig højere middelstrålingstemperatur m.h.t. et termisk gråt legeme end m.h.t. en normalt klædt person.

Globetermometret samt almindeligt og forsølvet katatermometer er de simpleste instrumenter til måling af middelstrålingstemperaturer.



## LITTERATURLISTE

1. Bedford, T., Basic Principles of Ventilation and Heating.  
London, Lewis, 1964.
2. Bedford, T. and C.G. Warner, The globe thermometer in studies  
of heating and ventilation, J. Hyg. (Camb.), 458, 1934.
3. Bradtke, F. und W. Liese, Hilfsbuch für raum- und aussenklimate-  
tische Messungen, Berlin, Springer, 1952.
4. Gagge, A.P., G.M. Rapp and J.D. Hardy, The Effective Radiant  
Field and Operative Temperature Necessary for Com-  
fort with Radiant Heating, ASHRAE Trans, 73 I, 1967.
5. Hey, E.N., Small globe thermometers, Journ. of Scientific In-  
struments (Journal of Physics E) series 2, vol. 1, 1968.
6. Korsgaard, V., Undersøgelse over det termiske strålingsfelt i  
rum med reflekterende vægge, Meddelelser fra DtH's  
Lab. for Opv. og Vent., bind 1, kapitel XII, 1945.
7. Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung, Lüftung und Kli-  
matechnik, München/Wien, R. Oldenbourg, 1966.
8. Schlüter, G., Katathermometrie auf neuer Grundlage, Ges. Ing.,  
11, 321, 1963.
9. Schüle, W. und H. Lutz, Messgeräte für raumklimatische Mes-  
sungen, Ges. Ing., 9, 266-270, 1964.
10. Tredre, B.E., Assessment of mean radiant temperature in in-  
door environments, Brit. Journ. Industr. Med., 22, 58-66,  
1965.