

Wellenlängenverteilung thermischer Strahlung in Räumen

Nielsen, Peter V.

Published in:
Sanitaer- und Heizungstechnik

Publication date:
1971

Document Version
Tidlig version også kaldet pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Nielsen, P. V. (1971). Wellenlängenverteilung thermischer Strahlung in Räumen. *Sanitaer- und Heizungstechnik*, (23), 61-64.

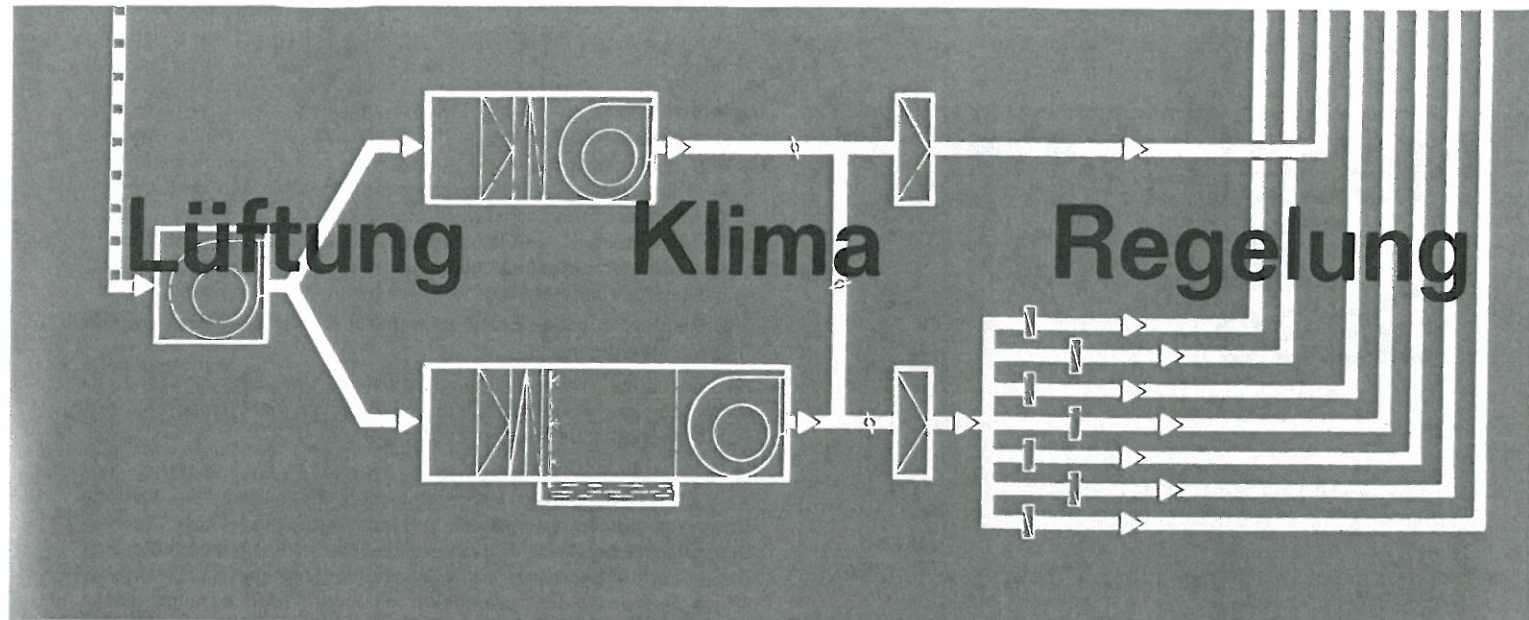
General rights

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 providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Wellenlängenverteilung thermischer Strahlung in Räumen Dipl.-Ing. P. Nielsen

In modernen Gebäuden mit großen Fensterflächen kann die mittlere Strahlungstemperatur große Bedeutung für den Wärmekomfort haben. Der folgende Beitrag zeigt, daß man bei der Beurteilung einer gemessenen Differenz zwischen einer mittleren Strahlungstemperatur und einer Lufttemperatur vorsichtig sein muß, weil sie in gewissen Situationen überwiegend auf kurzwellige Strahlung und in anderen Situationen überwiegend auf langwellige Strahlung zurückzuführen ist. Weiterhin zeigt der Beitrag, daß das gewöhnliche schwarze Globusthermometer eine Temperatur registriert, die, in mittlere Strahlungstemperatur umgerechnet, für eine Person nicht relevant ist, wenn die vorgenannte Differenz auf kurzwellige Strahlung (hoher Lichtpegel im Raum) zurückzuführen ist.

Einleitung

Die thermische Strahlung in einem Aufenthaltsraum stammt teils von Gegenständen mit einer niedrigen Temperatur, z. B. Fußboden, Wände, Decke, Möbel, Radiatoren, die alle eine Temperatur im Bereich von 0 bis 100° C haben und teils von Sonnenstrahlung. Die letztere kann in drei Gruppen unterteilt werden, und zwar in direkte Strahlung, diffuse Strahlung und Strahlung, die von Gegenständen auf der Erdoberfläche und von Gegenständen und Flächen in dem Aufenthaltsraum reflektiert wird. Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt etwa 6000° K. Die Strahlung der Sonne hat im großen und ganzen die gleiche Spektralverteilung wie ein schwarzer Körper, und die untere und die obere Grenze sind 0,3 μ bzw. 2,5 μ (siehe R_s in Bild 1).

Im Vergleich mit der Strahlung von einem Gegenstand mit einer Temperatur von z. B. 30° C, die in der Praxis die Grenzen 3,5 μ und 40 μ hat (siehe R_1 in Bild 1), ist zu erkennen, daß die beiden Bereiche getrennt sind, und diese Eigenschaft kann zur Bestimmung der Verteilung der thermischen Strahlung auf zwei Wellenlängenbereiche ausgenutzt werden.

Die gesamte Wirkung von kurzwelliger und langwelliger thermischer Strahlung wird normalerweise durch eine mittlere Strahlungstemperatur ausgedrückt. — Die mittlere Strahlungstemperatur mit Bezug auf ein Objekt wird als die einheitliche Temperatur absolut schwarzer Umgebungen, die gleichen Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen dem Objekt und den Umgebungen wie in den betrachteten jeweiligen (evtl. nicht einheitlichen) Umgebungen geben, definiert.

Da diese Größe von dem Objekt, auf das sie sich bezieht, abhängig ist, ist es nicht immer möglich, einen direkten Vergleich zwischen beispielsweise der mit einem Meßinstrument bestimmten mittleren Strahlungstemperatur und für eine Person geltenden mittleren Strahlungstemperatur vorzunehmen, u. a. weil die beiden Körper unterschiedliche Strahlungseigenschaften in verschiedenen Wellenlängenbereichen haben können.

Um zu entscheiden, welche Rolle diese Verhältnisse in der Praxis spielen und um bessere Kenntnisse über den Einfluß der kurzwelligen und langwelligen Strahlung auf das Wärmegleichgewicht eines Raums zu erlangen, ist eine Meßausrüstung entwickelt worden, die imstande ist, die Verteilung der thermischen Strahlung auf zwei verschiedene Wellenlängenbereiche zu messen [1].

Die Meßausrüstung wird in diesem Artikel behandelt, und außerdem werden einige durch Messungen in einem Raum erreichte, bezeichnende Ergebnisse angegeben.

Beschreibung der Meßausrüstung

Die Meßausrüstung besteht aus zwei Globusthermometern, die aus Messingkugeln mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Wandstärke von 0,5 mm hergestellt sind. Die Temperatur wird mit Thermoelementen, die innenseitig an den Kugeln montiert werden, gemessen.

Die Strahlungseigenschaften der beiden Globusthermometer sind für das verwendete Meßverfahren von entscheidender Bedeutung. Das eine Globusthermometer ist mit matter, schwarzer Farbe angestrichen (Krylon flat black enamel Nr. 1602), die unabhängig von der Wellenlänge ein Absorptionsverhältnis von 0,95 hat [2].

Das andere Globusthermometer ist mit Zinkweiß (Zinkweiß in Sonderfertigung von Sadolin & Holmblad) angestrichen, das die besondere Eigenschaft hat, daß es sein Absorptionsverhältnis bei Wellenlängen, die zwischen dem kurz- und dem langwelligen Bereich liegen (Bild 1), kräftig ändert. Referenzen und Versuche ergaben, daß es angemessen sein wird, gegenüber kurzwelliger Strahlung — Sonnenstrahlung — mit einem Absorptionsverhältnis von 0,2 und gegenüber langwelliger Strahlung mit einem Absorptionsverhältnis von 0,9 zu rechnen [3].

Die beiden Globusthermometer werden in gleicher Höhe in einem gegenseitigen Abstand von 30 cm aufgehängt, so daß sie in demselben Konvektions- und Strahlungsfeld angebracht sind, ohne einander durch gegenseitige Konvektion und Strahlung wesentlich zu beeinflussen. Ein Thermoelement zum Messen der Lufttemperatur wird zwischen den beiden Globusthermometern angebracht. Das Thermoelement ist durch das Vergolden von etwa 20 cm der Kupfer-Konstantan-Zuleitung gegen Strahlung geschützt.

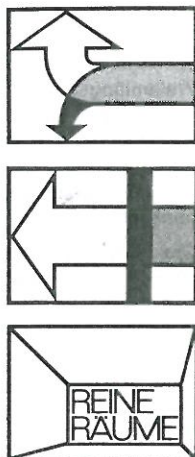
Wenn die Globusthermometer mit der Umgebung im Wärmegleichgewicht sind, sind die durch Strahlung bzw. Konvektion übertragenen Wärmeströme gleich groß und entgegengesetzt gerichtet. Es gelten dann nachstehende Gleichungen, in denen das erste Glied der durch Strahlung übertragene Wärmestrom und das zweite der durch Konvektion übertragene Wärmestrom ist:

$$\epsilon_b \cdot \sigma \cdot (T_{\text{mrt}, b}^4 - T_{g, b}^4) - h \cdot (t_{g, b} - t_a) = 0 \quad (1)$$

$$\epsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_{\text{mrt}, w}^4 - T_{g, w}^4) - h \cdot (t_{g, w} - t_a) = 0 \quad (2)$$

Nebel Dämpfe Gase

**Störfaktoren unserer
Industriegesellschaft!
Wir beseitigen sie!
Dazu treiben wir Anwendungs-
technik und Forschung. Im
Labor, aber auch draußen.
Dazu bauen wir all die
bekannten Spezial-Geräte zur
Reinigung der Luft.**



**CEAG DOMINIT AG
Geschäftsbereich
Luftreinigungstechnik
46 Dortmund, Postfach 310
Telefon (02 31) 84 81**

Darin sind:

ε	Emissionsverhältnis
σ	Stefan-Boltzmannsche Konstante
h	konvektive Wärmeübergangszahl
T_{mrt}	mittlere Strahlungstemperatur ($^{\circ}\text{K}$)
T_g	Temperatur des Globusthermometers ($^{\circ}\text{K}$)
t_g	Temperatur des Globusthermometers ($^{\circ}\text{C}$)
t_a	Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

Die Indexe b und w beziehen sich auf das schwarze bzw. weiße Globusthermometer

Die konvektive Wärmeübergangszahl h ist eine Funktion der Luftgeschwindigkeit v und der Differenz zwischen der Temperatur des Globusthermometers und der Lufttemperatur:

$$h = f(v, t_g - t_a) \quad (3)$$

Die Luftgeschwindigkeit wird mit einem besonders für niedrige Geschwindigkeiten geeigneten Anemometer (DISA Low Velocity Anemometer) bestimmt. Bei den in diesem Artikel behandelten Fällen — leichte Belastung von Räumen und Mangel an Zwangsbelüftung — war die Geschwindigkeit so niedrig, daß es angemessen erschien, folgende Wärmeübergangszahlen, die durch einen besonderen Versuch ermittelt wurden und für freie Konvektion gelten, zu benutzen:

$$h = 2,8 \cdot (t_g - t_a)^{0,25} \quad \text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

Sind die Lufttemperatur und die Temperaturen der beiden Globusthermometer bestimmt, so lassen sich die mittleren Strahlungstemperaturen aus den Gleichungen (1) und (2) berechnen. Da diese von dem Körper abhängen, auf den sie sich beziehen, sollen sie als die mittlere Strahlungstemperatur mit Bezug auf eine thermisch graue Kugel $T_{mrt, b}$ und als die mittlere Strahlungstemperatur mit Bezug auf die jeweilige weiße Kugel $T_{mrt, w}$ bezeichnet werden.

Diese beiden Größen — wie auch die beiden Temperaturen der Globusthermometer — stellen an sich einen qualitativen Ausdruck für das Vorhandensein einer kurzwelligen Strahlung dar, aber im folgenden sollen außerdem einige quantitative Ausdrücke hergeleitet werden.

In den Gleichungen (1) und (2) vertritt das erste Glied den gesamten Wärmestrom, der durch Strahlung übertragen wird. Dieses Glied kann auch als absorbierte Strahlung abzüglich emittierter Strahlung ausgedrückt werden.

Die von den Globusthermometern absorbierte Strahlung setzt sich aus dem absorbierten Teil der kurzwelligen Strahlung R_s (W/m^2) und dem absorbierten Teil der langwelligen Strahlung R_l (W/m^2) zusammen (siehe Bild 1), und bei Verwendung der jeweiligen Absorptionsverhältnisse in den verschiedenen Wellenlängenbereichen ergeben sich folgende Gleichungen:

$$0,95 \cdot \sigma \cdot T_{mrt, b}^4 = 0,95 \cdot R_s + 0,95 \cdot R_l \quad (5)$$

$$0,90 \cdot \sigma \cdot T_{mrt, w}^4 = 0,20 \cdot R_s + 0,90 \cdot R_l \quad (6)$$

Hieraus lassen sich folgende Gleichungen bilden, die die mittleren Strahlungstemperaturen bei der thermischen Strahlung sowie die langwellige Strahlung bei den beiden mittleren Strahlungstemperaturen ausdrücken:

$$T_{mrt, b} = \sqrt[4]{\frac{R_s + R_l}{\sigma}} \quad (7)$$

$$T_{mrt, w} = \sqrt[4]{\frac{\frac{2}{9}R_s + R_l}{\sigma}} \quad (8)$$

$$R_l = \frac{9}{7} \cdot \sigma \cdot T_{mrt, w}^4 - \frac{2}{7} \cdot \sigma \cdot T_{mrt, b}^4 \quad (9)$$

Die langwellige thermische Strahlung R_l stammt von Gegenständen im Raum mit einer niedrigen Temperatur, z. B. Fußboden, Wände, Decke, Möbel, Radiatoren. Falls sie durch die Größe

$$T_{mrt, l} = \sqrt[4]{\frac{R_l}{\sigma}} \quad (10)$$

ausgedrückt wird, ist es angemessen, $T_{mrt, l}$ ($^{\circ}\text{K}$) als eine mittlere Wand- oder Oberflächentemperatur unter Berücksichtigung der Lage der Meßausrüstung zu bezeichnen. $T_{mrt, l}$ ist auch die mittlere Strahlungstemperatur mit Bezug auf einen gedachten kugelförmigen

Körper, der im kurzwelligen Bereich absolut reflektierend und im langwelligen Bereich ein thermisch grauer Absorber ist.

Nach Durchführung von Messungen in einem Raum sind bei der Beurteilung der Ergebnisse besonders die Größen $T_{mrt,b}$ (Gleichung 7) und $T_{mrt,l}$ (Gleichung 10) von Interesse, weil die Differenz zwischen diesen Temperaturen einen quantitativen Ausdruck der kurzwelligen Strahlung darstellt. Im folgenden Abschnitt sollen einige Beispiele einer solchen Bewertung der Meßergebnisse gegeben werden.

Meßergebnisse

Die nachstehend behandelten Messungen wurden alle in einem modernen Einfamilienhaus durchgeführt. Bild 2 zeigt die Lage des Hauses zur Sonne sowie den Aufenthaltsraum, in dem die Meßausrüstung aufgestellt wurde. Zu den Strahlungsverhältnissen des Raumes ist besonders zu bemerken, daß die Fassade zur Westseite 75% Fensterfläche hat und daß an der Nordwand ein Radiator angeordnet ist. Das Bild 3 zeigt die Meßergebnisse für den 5. Mai 1970. An diesem Tage war der Himmel wolkenfrei, und nach 13.30 Uhr hatte der Raum Sonneneinfall. Etwa um 16.20 Uhr — d. h. 20 Minuten nach der zuletzt angegebenen Messung — fiel die Sonne direkt auf die Globusthermometer. Der Radiator war abgestellt.

Die Kurven im oberen Diagramm des Bildes 3 geben den Verlauf der Lufttemperatur t_a und der Temperaturen $t_{g,b}$ und $t_{g,w}$ der beiden Globusthermometer an. Der Unterschied zwischen den beiden letzteren Temperaturen läßt erkennen, daß eine kurzwellige Strahlung vorhanden war.

Bild 1: Verteilung kurz- und langwelliger thermischer Strahlung in einem Raum bei Tageslicht

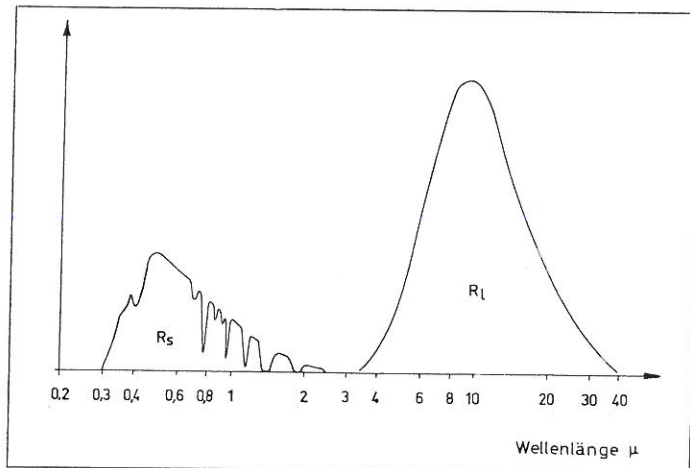
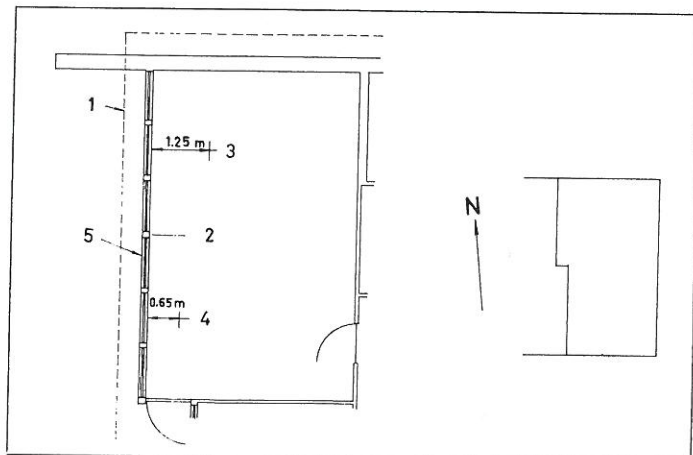


Bild 2: Geographische Ausrichtung des Versuchshauses sowie Angabe der Anbringung der Meßpunkte in den beiden Meßperioden — Meßausrüstung 1,05 m über dem Fußboden angebracht

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 Dachvorsprung | 4 Meßpunkt am 1. 12. 1970 |
| 2 Vorhang | 5 75% Fensterfläche |
| 3 Meßpunkt am 5. 5. 1970 | |



KGA[®] ALLGAS-HEISS- WASSERSPEICHER

Der Komfortspeicher, den Sie Ihren Kunden mit echter Überzeugung anbieten können.

KGA hat in Deutschland mehr innenemaillierte Gas-Heißwasserspeicher verkauft als irgend jemand zuvor. Daraus ergaben sich jahrelange Erfahrungen und ständig wachsendes know-how. — Vorteile, die es uns ermöglichten, diesen Komfortspeicher zu bauen:

den KGA Allgas-Heißwasserspeicher. Den Speicher, der jederzeit in der Lage ist, große Wassermengen ohne Druck- und Temperaturschwankungen abzugeben. An mehreren Zapfstellen zugleich.

Dessen Brenner nicht bei jedem Händewaschen zündet und der praktisch keine Wartung braucht.

Der KGA ist leicht umstellbar auf jede Gasart, völlig sicher im Betrieb und von solch stabiler Bauart, daß wir ihn mit einer 5-Jahres-Vollgarantie versehen konnten.



Der KGA schafft heißes Wasser für das ganze Haus + Kunden, die zufrieden sind.

**KGA[®]
ALLGAS-
HEISSWASSERSPEICHER**

**... gebaut,
um Vollkom-
fort zu bieten.**

KGA Bühring Apparatebau,
1 Berlin 19, Postfach 160

Bitte ausschneiden und an
KGA Bühring Apparatebau senden:

3 Ich hab nichts gegen Küsse. Schicken Sie mir deshalb unbesorgt ausführliches Informationsmaterial über Ihren KGA. Absender nicht vergessen.

Die Kurven im unteren Diagramm des Bildes 3 geben die mittleren Strahlungstemperaturen $t_{mrt,b}$, $t_{mrt,w}$ und $t_{mrt,l}$ an — nach den Gleichungen (1), (2) und (10) bestimmt und in Grad Celsius umgerechnet — sowie die Lufttemperatur t_a .

Zu bemerken ist, daß die mittlere Strahlungstemperatur $t_{mrt,l}$ und die Lufttemperatur t_a praktisch gleich groß sind. Daraus folgt, daß die Differenz zwischen den mittleren Strahlungstemperaturen $t_{mrt,b}$ und $t_{mrt,l}$, die ein Ausdruck für die kurzwellige Strahlung ist, von gleicher Größe wie die Differenz zwischen der mittleren Strahlungstemperatur $t_{mrt,b}$ und der Lufttemperatur t_a ist.

Bild 3: Verlauf der Temperaturen bei der Messung am 5. Mai 1970

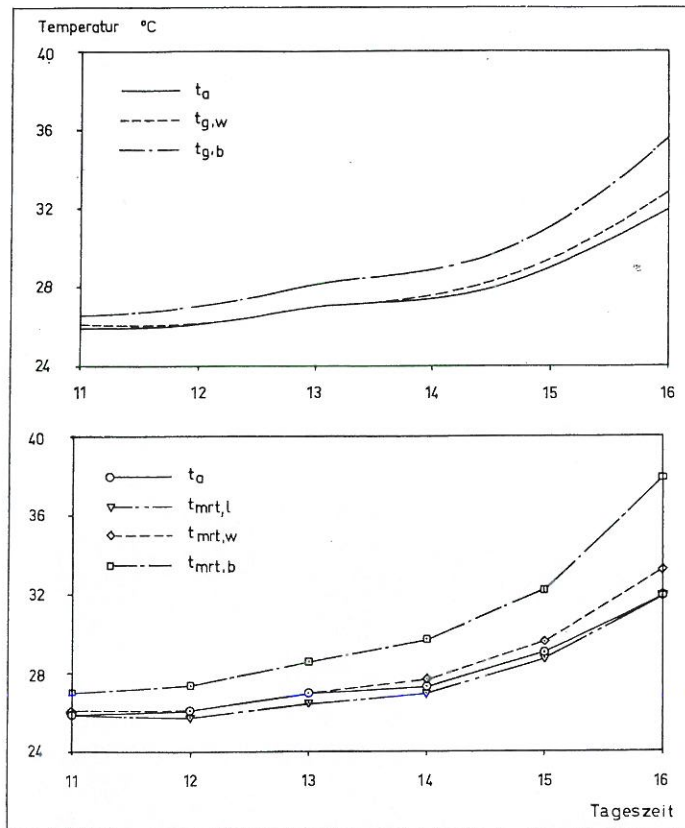
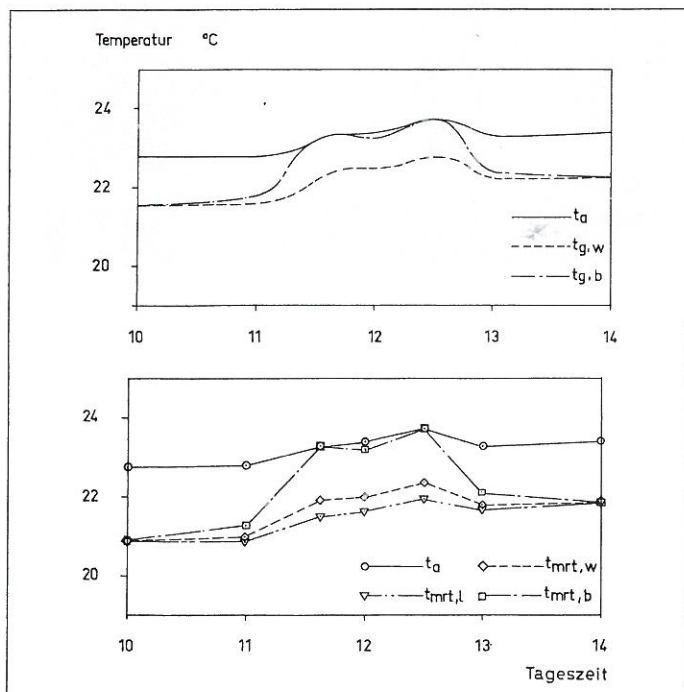


Bild 4: Verlauf der Temperaturen bei der Messung am 1. Dez. 1970



Diese Lage ist für sämtliche Messungen im Raum während des Sommerhalbjahrs bezeichnend. Der Lichtpegel, d. h. die kurzwellige Strahlung, leistet den wesentlichsten Beitrag zu einer etwaigen Differenz zwischen der mittleren Strahlungstemperatur $t_{mrt,b}$ und der Lufttemperatur t_a , obwohl nur von einer diffusen Himmelsstrahlung und einer reflektierten Sonnenstrahlung die Rede ist.

Das Bild 4 zeigt die Meßergebnisse für den 1. Dezember 1970. Am betreffenden Tag war das Wetter bis Ende des Vormittags trübe. Danach schien die Sonne ein paar Stunden, wonach dann für den Rest des Tags wieder trübes Wetter war. Der Radiator war angestellt, und der Raum war entsprechend einer Außentemperatur von 8°C belastet.

Die mittlere Strahlungstemperatur $t_{mrt,l}$, die auch als eine mittlere Oberflächentemperatur betrachtet werden kann, ist wegen des großen Winkelverhältnisses der Globusthermometer zum Fenster von dessen Temperatur stark beeinflusst (siehe Bild 2). Die Differenz zwischen der Lufttemperatur t_a und der mittleren Strahlungstemperatur $t_{mrt,l}$ ist deshalb in der Praxis ein Ausdruck für den Wärmeverlust durch das Fenster, und die Differenz hat dadurch auch einen gleichmäßigen Verlauf tagsüber.

Vor 10 Uhr und nach 14 Uhr war der Lichtpegel so niedrig, daß die drei mittleren Strahlungstemperaturen $t_{mrt,b}$, $t_{mrt,w}$ und $t_{mrt,l}$ alle gleich waren, was auch aus den Formeln (7), (8) und (10) für R_s gleich Null hervorgeht.

Während zwei Zeitspannen war die Temperatur des schwarzen Globusthermometers $t_{g,b}$ gleich der Lufttemperatur t_a . Es geschieht in dieser Situation kein Wärmeübergang durch Konvektion und damit kein gesamter Wärmeübergang durch Strahlung, und die mittlere Strahlungstemperatur $t_{mrt,b}$ ist gleich der Lufttemperatur t_a .

Das bedeutet, daß die vom Globusthermometer absorbierte thermische Strahlung der emittierten Strahlung gleich ist. In dem Fall, daß ein anderes Absorptionsverhältnis geltend ist, wie z. B. das für das weiße Globusthermometer geltende, wird eine mittlere Strahlungstemperatur $t_{mrt,w}$ bestimmt, die wegen des Vorhandenseins einer kurzwelligen Strahlung und unterschiedlicher Absorptionsverhältnisse in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen von der Lufttemperatur t_a abweicht. Während der ganzen Meßperiode ist nur diffuse und reflektierte Strahlung vorhanden.

Schlußfolgerung

Diejenige mittlere Strahlungstemperatur, die man normal mit verschiedenen Meßinstrumenten wie z. B. einem Standard-Globusthermometer bestimmt, ist die mittlere Strahlungstemperatur mit Bezug auf eine thermische, graue Kugel $t_{mrt,b}$.

Die Messungen haben gezeigt, daß diffuse und reflektierte Strahlung mit kurzen Wellenlängen einen wesentlichen Einfluß auf die Differenz zwischen dieser mittleren Strahlungstemperatur und der Lufttemperatur haben können.

Falls man die mittlere Strahlungstemperatur mit Bezug auf einen Körper, der in verschiedenen Wellenlängenbereichen unterschiedliche Absorptionsverhältnisse hat wie z. B. eine Person, zu bestimmen wünscht, sollten u. a. diese Verhältnisse in Betracht gezogen werden. (Bei Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur mit Bezug auf eine Person sollte im Falle einer großen Variation der Strahlungsintensität in den verschiedenen Richtungen, wie z. B. in direkter Sonnenstrahlung, außerdem die Variation der Strahlungsfläche der Person in diesen Richtungen berücksichtigt werden.) Das kann u. a. durch Verwendung eines Meßinstruments mit einem Fühler, der ein Absorptionsverhältnis mit einer passend gewählten Funktion der Wellenlänge hat, vorgenommen werden.

Literatur

- [1] Richards, Charles H., Alice M. Stoll und James D. Hardy: The Panradiometer: An Absolute Measuring Instrument for Environmental Radiation, The Review of Scientific Instruments, 22, No. 12, 925-934, 1951.
- [2] Strong, John und George W. Hopkins, An Environmental Mean Radiation Temperature Meter, The Review of Scientific Instruments, 41, No. 3, 360-364, 1970.
- [3] Sieber, W., Zusammensetzung der von Werk- und Baustoffen zurückgeworfenen Wärmestrahlung, Zeitschrift für technische Physik, Nr. 6, 130-135, 1941.

Werkbilder: Firma Danfoss A/S, 6430 Nordborg, Dänemark