

Thermische Behaglichkeit und Messung des Raumklimas

Von P. Marx und G. Schlüter



links:
Ing. Gert Schlüter,
Berlin

rechts:
Dr.-Ing. Peter Marx,
Fa. Environ-Electronic,
Berlin

Die Verfasser gehen zunächst unter Berücksichtigung der physiologischen Grundlagen auf die spezifische Problematik des Raumklimas und seine Messung ein und beschreiben herkömmliche Methoden der analytischen und der Raumklimasummen-Messung. Anschließend wird ein Meßgerät vorgestellt, mit dem sich die Raumklimakomponenten mit genügender Genauigkeit einzeln erfassen lassen, dessen apparativer Aufwand aber relativ gering ist.

DK 628.87:628.889

Physiologische Grundlagen

Für den lebenden Organismus — speziell des Warmblüters — ist der dauernde Energieumsatz eine unbedingte, das Leben bestimmende Voraussetzung. Die vom Menschen mit der Nahrung aufgenommene gebundene Energie wird zur Aufrechterhaltung seiner Lebensvorgänge im Körperinnern chemisch umgesetzt. Dabei entsteht Wärme, deren überschüssiger Teil (nach Abzug des Eigenbedarfs) hauptsächlich durch Übergang an die umgebende Luft (Konvektion), durch Wärmeabstrahlung des Körpers an kühlere Umgebungsflächen, über die Feuchte durch Verdunstung (Atmung und Schwitzen), geringfügig auch durch Wärmeableitung (z.B. durch die Füße an den Fußboden) abgegeben wird. Auch die von der körperlichen Tätigkeit herkommende Wärme muß zu einem bestimmten Anteil abgeführt werden können, damit der Mensch sich thermisch wohlfühlt, also von der Temperatur her sich „behaglich“ fühlt.

Diese thermische Behaglichkeit wird im wesentlichen erreicht durch eine je nach Raumart und -verwendung sowie der Kondition, Bekleidung und Tätigkeit der Menschen entsprechend zu wählende, wohlabgestimmte Dosierung einzelner Abkühlkomponenten [1]. Für einen solchen optimalen thermischen Zustand müssen also die Raumklimakomponenten, die

in ihrer Verbundwirkung das Raumklima ergeben, auf bestimmte, empirisch ermittelte Werte bzw. Bereiche gebracht werden [2; 13]. Dabei ergibt sich die zusätzliche Aufgabe, das Raumklima auch durch eine physikalisch richtige Bauweise, vernünftige Bemessung der Fenster und eine dem Außenklima angemessene Beheizung behaglich zu machen.

Raumklimakomponenten

Folgende vier Faktoren — im umbauten Raum als Raumklimakomponenten bezeichnet — beeinflussen neben der Bekleidung im Zusammenhang mit der körperlichen Tätigkeit maßgebend die Wärmeabgabe und damit die thermische Behaglichkeit des Menschen:

- Lufttemperatur
- Luftbewegung
- relative Luftfeuchtigkeit
- Temperatur der Umschließungsflächen des Raumes.

Eine Lufttemperatur im Raum von $\sim 21^\circ\text{C}$ wird im allgemeinen als angenehm empfunden, jedoch ist die subjektive Schwankungsbreite so groß, daß — gleiche körperliche Tätigkeit vorausgesetzt — z.B. 20°C von manchen schon als zu warm, 22°C von anderen noch als zu kalt empfunden und bezeichnet werden. Wichtig für die Behaglichkeit ist neben der absoluten Höhe auch die örtliche und zeitliche Gleichmäßigkeit der Lufttemperatur innerhalb eines Raumes, worauf Heizungssystem und Bauweise einen gewissen Einfluß haben. In diesem Zusammenhang schließt sich die Luftbewegung als weitere Raumklima-Komponente an. Völlige Luftruhe in einem Raum anzunehmen oder zu verlangen, entspricht nicht den Untersuchungsergebnissen der Praxis, da bereits der Mensch selbst durch Bewegungen, Atmung und Konvektion die Raumluft in Unruhe bringt [3]. In allen geheizten, belüfteten oder klimatisierten Räumen findet zwangsläufig eine Luftbewegung statt. Ein „Kompromiß“ zwischen den zum Teil recht unterschiedlichen Auffassungen über „zulässige“ gleichförmige Luftgeschwindigkeiten in einem Raum ein-

schließlich der Angaben in DIN 1946 „Lüftungstechnische Anlagen“ Bl. 2 alte (1960) und neue Fassung (E 1972) dürfte sich im Bereich der folgenden Wertepaare bewegen: bei 20°C bis 12 cm/s, bei 22°C bis 17 cm/s, bei 24°C bis 25 cm/s, bei 26°C bis 35 cm/s.

Die Wirkung intermittierender oder gar richtungwechselnder Luftbewegungen auf den Menschen, z.B. von Luftstößen bis ~ 50 cm/s mit einer Frequenz von etwa 2 bis 10 Hz, wie sie mit feinen Anemometern in klimatisierten Räumen gemessen wurden, bedürfen noch der Klärung anhand von Reihenversuchen.

Die relative Luftfeuchtigkeit hat nur in Verbindung mit der gleichzeitig herrschenden Lufttemperatur einen signifikanten Einfluß auf das Behaglichkeitsempfinden des Menschen. Während relative Luftfeuchten zwischen $\approx 30\%$ und 70% bei $\approx 21^\circ\text{C}$ in Aufenthaltsräumen als normal und angenehm gelten, tritt bei höherer Lufttemperatur — verstärkt bei zunehmender Luftfeuchte — Schwüleempfinden ein, während bei höherer Lufttemperatur und abnehmender Luftfeuchte (Normalfall bei beheizten Räumen im Winter) häufig Austrocknung der Schleimhäute und damit verbundenes Unbehagen hervorgerufen wird. Eine wirkungsvolle Luftbefeuchtung ist dann günstig. Außerdem entstehen auf Heizkörpern mit hohen Oberflächentemperaturen Schwel- und Röstprodukte aus Staub (Pyrolyse), die den Atemtrakt besonders reizen. Dem ist durch häufiges gründliches Reinigen der Heizkörper zu begegnen [2].

Da die notwendige „Entwärmung“ des Menschen — je nach Umgebungsbedingungen — rund zur Hälfte durch Wärmeabstrahlung seiner ≈ 30 bis 33°C warmen Körperoberfläche an kältere Flächen seiner Umgebung stattfindet, hat die „mittlere Umschließungsflächentemperatur“ einen ebenso großen Einfluß auf das Behaglichkeitsempfinden wie die Lufttemperatur. Auch für die mittlere Umschließungsflächentemperatur, die einen arithmetischen Mittelwert der Oberflächentemperaturen aller umgebenden Flächen (Wände, Fenster, Fußboden, Decke, Heizkörper) bei gleichzeitiger Wertung ihres anteiligen Raumwinkelverhältnisses darstellt, gelten empirisch ermittelte Grenzwerte, deren Überschreitung zu Unbehaglichkeit führt. Sie soll etwa gleich der Lufttemperatur sein. Als arithmetischer Mittelwert aus Lufttemperatur und Umschließungsflächentemperatur wird die „empfundene Temperatur“ definiert; sie soll zur optimalen thermischen Behaglichkeit auch bei etwa 21°C liegen, wobei sich Luft- und Umschließungsflächentemperaturen innerhalb einiger Temperaturgrade kompensieren können.

Meßgeräte

Zur Raumklimamessung werden üblicherweise mehrere Meßgeräte verwendet, die jeweils nur eine der genannten Raumklimakomponenten (Lufttemperatur, Luftbewegung, Luftfeuchte oder Temperatur der Raumumschließungsflächen) erfassen und anzeigen oder schreiben. Der apparative Aufwand wird entsprechend groß, was besonders bei ambulanten Stichprobenmessungen lästig und umständlich ist. Andererseits werden Klimasummenmeßgeräte verwendet, die die Einzelkomponenten nicht getrennt erfassen, sondern das Raumklima — beispielsweise als Kühlstärke der Umgebung — komplex bewerten [4]. Abgesehen vom Wert solcher „Klimasummengrößen“ [5] in bezug auf die Behaglichkeitsempfindung des Menschen ist es aufschlußreicher, die Raumklimakomponenten getrennt zu erfassen. Nur so besteht die Möglichkeit, Abweichungen vom gewünschten oder garantierten Raumklimazustand, hervorgerufen etwa durch falsche Bauweise (z.B. schlechte Wärmedämmung der Wände und Decken, zu große Fenster, Fehlbemessung der Heizkörper, Bemessungs- und Ausführungsfehler bei Lüftungs- und Klimaanlage) an den Abweichungen der Einzelkomponenten von Normalwerten zu erkennen und folgerichtig zu beheben.

Als Beispiel sei hier die große Wärmeabstrahlung des Menschen im Winter an übergroße Fensterglasflächen genannt. Empfundener wird die lästige Abkühlung meist als „Zugluft“, während mit einem Meßgerät, das die Luftbewegung und die Temperatur der Umschließungsflächen getrennt anzeigen kann, die wahre Ursache der Klagen aufgedeckt wird. Mit einem Klimasummenmeßgerät ließe sich hier lediglich eine zu hohe Abkühlung, vielleicht noch mit Angabe der Richtung, feststellen oder irgendeine negative Beurteilung in einem auf subjektive Wahrnehmungen aufgebauten willkürlichen Maßstab finden. Schließlich sollte sich das Raumklima auch darum durch physikalisch exakt definierte Größen ausdrücken lassen, damit eine Verbindung zur Baupraxis hergestellt werden kann. Denn für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden sowie ähnliche Zwecke müssen konkrete Zahlenwerte in einem gebräuchlichen Maßsystem vorliegen, nach denen Baustoffe und Ausführungsformen ausgewählt und bemessen werden können. Für die Praxis ist es daher am zweckmäßigsten, die verschiedenen Raumklimakomponenten getrennt zu messen und ihr etwaiges Abweichen vom Sollwertbereich so zu korrigieren, daß ihre Verbundwirkung ein angenehmes Raumklima ergibt. Vorgeschlagen wurden Erweiterungen der synthetischen Methode der Raumklimabewertung durch Einsetzen der Meßwerte der Einzelkomponenten in empirisch aufgestellte „Behaglichkeitsgleichungen“, wie sie z.B. von *van Zuijlen* [1] und *P. O. Fanger* [6] für verschiedene Bedingungen aufgestellt worden sind.

Messung der Einzelkomponenten

Lufttemperaturen werden üblicherweise mit strahlungsgeschützten Quecksilberthermometern, besonders wenn das Quecksilbergemäß von stark bewegter Luft umspült ist (z.B. beim Abmannschen Aspirationspsychrometer), schnell und genau gemessen. Mechanische Thermometer (beispielsweise Bimetallthermometer) sind im allgemeinen weniger genau. Elektrische Thermometer (Widerstandsthermometer, Thermolemente) werden besonders zur Fernanzeige oder -registrierung der Lufttemperatur eingesetzt. Die relative Luftfeuchte wird mit Hygrometern weniger genau, mit Psychrometern und auch mit dem weitverbreiteten Lithiumchlorid-Feuchtegeber recht genau — allerdings mit etwas größerem apparativen Aufwand — gemessen. Luftbewegungen, wie sie in Wohn- und Arbeitsräumen vorkommen, werden sowohl mit elektrischen Anemometern (Hitzdraht mit Temperaturanzeige durch Widerstandsthermometer oder Thermolement) als auch als Resultierende aus Lufttemperatur und Abkühlungsgröße der Luft mit Abkühlungsmeßgeräten (z.B. Katathermometern) ermittelt. Die Temperatur der Raumumschließungsflächen läßt sich z.B. mit feinen, an die Wände geklebten Thermolementen oder durch Abtasten der Flächen mit Temperaturfühlern direkt bestimmen. Man kann sie auch aus der Wärmezu- oder -abstrahlung der Flächen mit Strahlungsempfängern ermitteln. Die gleichzeitige Messung der Abkühlung durch Konvektion sowie der Abkühlung durch Konvektion + Strahlung mit Abkühlungsmeßgeräten erlaubt, aus der Differenz der genannten Abkühlungsarten einen Rückschluß auf die Wärmestrahlungsbilanz zwischen Meßwertgeber und Umschließungsflächen und damit bei bekannter Strahlzahl auf deren Oberflächentemperatur zu ziehen. Schon *Bradtke* hat 1937 ein solches Verfahren beschrieben [7]; da aber die Meßtechnik bei weitem noch nicht so ausgereift war wie heute, wurde seinerzeit dazu das umständlich zu handhabende Katathermometer verwendet.

Raumklima-Analysator

Statt mit verschiedenen spezifischen Meßgeräten bei der Raumklimabestimmung

zu operieren, empfiehlt es sich, die verschiedenen Raumklimakomponenten zwar getrennt, aber mit einem dafür eingerichteten universellen Gerät zu erfassen. Ein neu entwickeltes Raumklimameßgerät dieser Art wird nachstehend vorgestellt [12].

Mechanischer und wärmetechnischer Aufbau des Raumklima-Analysators

Bild 1 zeigt Sensorteil (Meßkopf) und Anzeigeteil, der auch die Stromversorgung und die elektronische Regelschaltung enthält; beide sind durch ein vieladriges abgeschirmtes Kabel verbunden. Die vom Sensorteil erfaßten Klimadaten können je nach Stellung des Wählschalters am Meßinstrument im Anzeigeteil abgelesen werden. Die Säule des Sensorteiles enthält zwei Heißleiter-Thermometer, an denen die Raumluft mit Hilfe eines eingebauten Ventilators vorbeisaugt wird. Dadurch verkürzt sich wegen des besseren Wärmeüberganges die Einstellzeit wesentlich. Eines der Thermometer mißt die Trockenlufttemperatur, das andere, das wie bei einem Abmannschen Aspirationspsychrometer mit einem befeuchteten Stoffüberzug versehen ist, die Temperatur, bei der die Raumluft ohne Änderung des Wärmeinhaltes feuchtegesättigt ist. Aus der Anzeigendifferenz beider Thermometer (psychrometrische Differenz) und der Raumlufttemperatur resultiert die relative Luftfeuchte. Sie wird aus den Meßwerten Trocken- und Feuchtkugeltemperatur im h,x -Diagramm, einer Psychrometertafel oder in dem besonders dafür aufgestellten Nomogramm (*Bild 2*) ermittelt.

Der Sensorteil des Raumklima-Analysators trägt weiterhin zwei Meßwertgeber in Kugelform für die Erfassung der Kühlstärke der Umgebung. Jede der Kugeln besteht aus einer durch dünnen Kunststoffüberzug zusammengehaltenen Widerstandsdrathwicklung, die mittels eingeklebter Heißleiterfühler und elektronischer Regelung konstant auf 36,5 °C gehalten wird. Die dazu notwendige elektrische Heizleistung ist ein Maß für die Kühlstärke der Umgebung. Der mechanische Aufbau der Kugeln gewährleistet durch die geringe Wärmespeicherfähigkeit und das hohe Wärmeleitvermögen, daß die

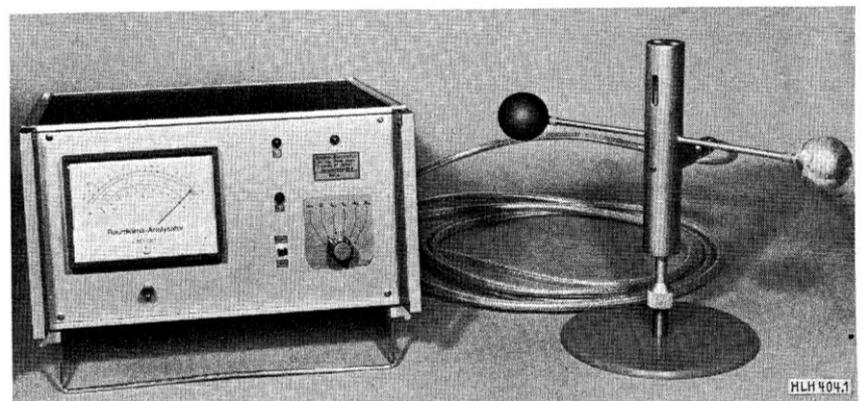


Bild 1: Raumklima-Analysator Meßkopf und Anzeigegerät

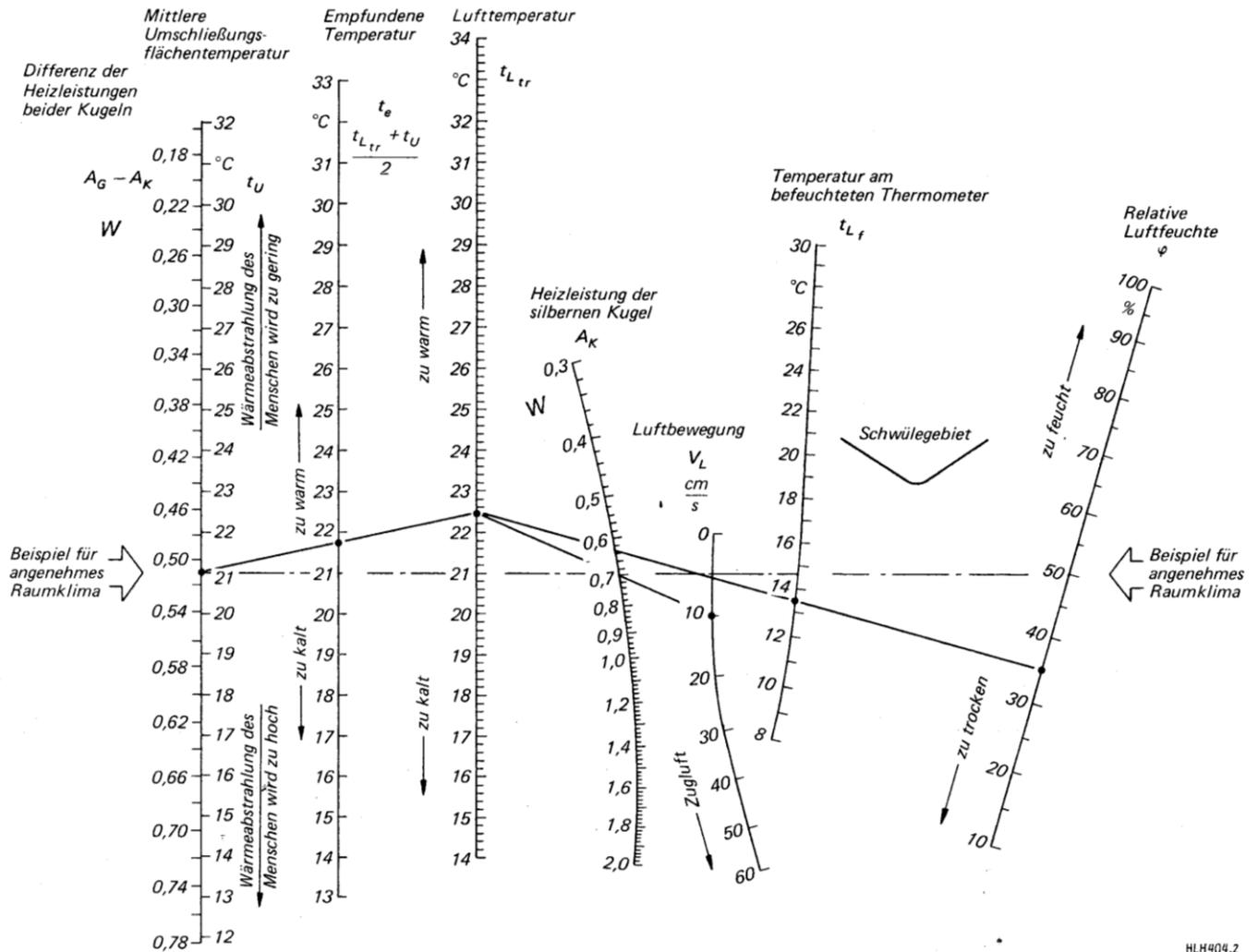


Bild 2: Nomogramm zur Bestimmung des Raumklimas aus den einzelnen Komponenten

gemessen mit dem Raumklima-Analysator

Beispiel: Gemessen seien Lufttemperaturen (auf dem Bild mit $t_{L, tr}$ bezeichnet) $t_{tr} = 22,5^\circ\text{C}$ und $t_f = 13,5^\circ\text{C}$. Geradlinige Verbindung dieser Werte ergibt $\varphi = 35\%$. Beträgt z.B. $A_K = 0,7\text{ W}$, ergibt Verbindung dieses

Wertes mit $t_{tr} = 22,5^\circ\text{C}$ eine Luftgeschwindigkeit von 10 cm/s . Wird gleichzeitig eine Gesamtabkühlung von z.B. $A_G = 1,21\text{ W}$ gemessen, beträgt $A_G - A_K = 0,51\text{ W}$ und damit $t_U \approx 21,0^\circ\text{C}$. Verbindung von t_U mit t_{tr} ergibt $t_e \approx 21,8^\circ\text{C}$.

eingeebene Heizleistung verzögerungsfrei den Änderungen der thermischen Reize von außen angepaßt wird und dadurch bei gleichbleibender Kugeltemperatur eine trägheitslose Anzeige der augenblicklich herrschenden Abkühlungsstärke möglich ist. Die beiden Kugeln sind zur weitgehenden Ausschaltung gegenseitiger Beeinflussung in entsprechender Entfernung voneinander und zum Verhindern einer Wärmeabgabe durch Wärmeleitung isoliert angebracht.

Eine der Kugeln ist oberflächenversilbert; d.h., ihre Wärmeabgabe erfolgt fast ausschließlich durch Konvektion. Die Luftbewegung läßt sich grundsätzlich aus konvektiver Abkühlung eines Körpers und der Temperatur der abkühlenden Luft bestimmen. Nach diesem Prinzip erfolgt die Messung der Luftbewegung mit dem Raumklima-Analysator. Durch Verbinden der Werte für Lufttemperatur $t_{L, tr}$ und konvektive Abkühlung A_K (gemessen mit der versilberten Kugel) kann die Luftbewegung im Auswertnomogramm als Resultierende an einer Luftgeschwindigkeitsleiter abgelesen werden. Die andere Kugel ist oberflächengeschwärzt, d.h., sie gibt ihre Wärme außer durch Konvektion

auch durch Abstrahlung an die umgebenden Flächen ab. Je kälter diese Flächen sind, um so größer ist ihre Abkühlung durch Strahlung. Wegen des ausgeprägten Unterschieds der Strahlzahlen beider Kugeln ist die Differenz ihrer Abkühlungswerte $A_G - A_K$ ein Maß für die Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen (Decken, Wände und Fußböden). Die schwarze Kugel zeigt die Gesamtabkühlung A_G , die strahlungsgeschützte Kugel zeigt die Abkühlung überwiegend durch Konvektion A_K . Aus zahlreichen gleichzeitigen Messungen von Umschließungsflächentemperaturen t_U mit an Wänden usw. befestigten Thermoelementen einerseits und Abkühlungsgrößendifferenzen $A_G - A_K$ mit dem Raumklima-Analysator andererseits wurde eine analytische Gleichung

$$A_G - A_K = \left[\frac{(t + 273)^4 - (t_U + 273)^4}{94,34 \cdot 10^7} \right]^{1,02}$$

gefunden, die die Aufstellung einer Vergleichsleiter zwischen $A_G - A_K$ und t_U im Auswertnomogramm erlaubte. Hierbei ist t die Oberflächentemperatur der

schwarzen Kugel = $36,5^\circ\text{C}$. Die empirischen Einzelwerte streuten dabei mit $\pm 0,5^\circ\text{C}$ Oberflächentemperatur um den Mittelwert. Die Abkühlungsgrößen A_G und A_K sind gerätgebunden und dürfen in keinerlei Beziehung zur Entwärmung des menschlichen Körpers gesetzt werden. Sie dienen lediglich als Hilfswerte zur Bestimmung von Luftbewegung und Umschließungsflächentemperatur. Die Heizleistungen der Kugeln wurden seinerzeit noch in $\text{mcal/cm}^2\text{ s}$ angegeben, später wurde auf die Angabe in Watt übergegangen.

Wärmestrahlungsbilanz und ihre theoretische Anwendung auf die Meßgeräte-kugeln des Raumklima-Analysators

Der Wärmeübergang durch Strahlung ist qualitativ und quantitativ allgemein definiert durch die Gleichung:

$$Q_{\text{str}} = C_{1,2} \cdot \varphi_{1,2} \cdot F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1)$$

(Erweitertes Stefan-Boltzmannsches Gesetz).

Die Strahlungsaustauschzahl $C_{1,2}$ ($\text{kcal/m}^2 \text{ h K}^4$) erhält für verschiedene Strahlungsfälle unterschiedliche Werte, in denen die einzelnen Strahlzahlen C_1 und C_2 der im Strahlungsaustausch stehenden Flächen je nach ihrer geometrischen Anordnung mit entsprechender Wertigkeit zum Tragen kommen. So wird z.B., wenn die Fläche F_2 die Fläche F_1 (beide in m^2) vollkommen umgibt,

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)},$$

wobei C_s die Strahlzahl der absolut schwarzen Fläche ist.

Auf den Strahlungsfall „Meßgerätekugel F_1 strahlt an Raumumschließungsflächen F_2 “ angewendet, bedeutet dies, da F_1 gegenüber F_2 verschwindend klein ist, daß die Strahlungsaustauschzahl $C_{1,2}$ praktisch gleich der Strahlzahl der Kugel C_1 wird. Eine der Meßgerätekugeln ist nun geschwärzt, d.h. ihre Wärmeabgabe erfolgt durch Konvektion und Strahlung, wobei

die Strahlzahl $4,2 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4}$ beträgt, ent-

sprechend dem für einen bestimmten Mattlack in der einschlägigen Fachliteratur zu findenden Wert [10; 11].

φ beschreibt das Raumwinkelverhältnis der im Strahlungsaustausch stehenden Flächen; für eine Kugel im Raum wird $\varphi = 1$. Beim Raumklima-Analysator werden die Kugeln jedoch geringfügig durch das Hauptrohr abgedeckt, so daß in diesem Fall 0,97 für φ anzusetzen ist. Die Oberfläche der Meßgerätekugeln F_1 beträgt $0,0065 \text{ m}^2$ und ihre Oberflächentemperatur $= 36,5^\circ \text{C}$. Wird für das erste Rechenbeispiel eine mittlere Umschließungsflächentemperatur t_U eines beliebigen Raumes von 20°C angenommen, so läßt sich aus Gl. (1) die von der Kugel an die Raumumschließungsflächen abgegebene Wärmestrahlungsleistung wie folgt bestimmen:

$$Q_{\text{str}} = 4,2 \cdot 0,97 \cdot 0,0065 \cdot \left[\left(\frac{273 + 36,5}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 20}{100} \right)^4 \right]$$

18,06

$$Q_{\text{str}} = 0,478 \text{ kcal/h}$$

$$Q_{\text{str}} = 0,556 \text{ W}$$

Entsprechend ergibt sich für die oberflächenversilberte Kugel, deren Strahlzahl C_1 zu $0,1 \text{ kcal/m}^2 \text{ h K}^4$ aus der Literatur entnommen wurde,

$$Q_{\text{str}} = 0,013 \text{ W.}$$

Erfahrungsgemäß ändert sich die Strahlzahl der versilberten Kugel für Wärmestrahlung trotz optisch erkennbarem Nachlassen des reinen Silberglanzes nur sehr wenig, so daß unter normalen Umständen ein gelegentliches Aufpolieren mit einem handelsüblichen Silberputztuch genügt, um gleichbleibende Meßergebnisse zu erhalten. Eine Neuversilberung der Kugel ist erst nach einigen Jahren angebracht.

Die Differenz der Wärmestrahlungsleistungen zwischen geschwärzter und versilberter Kugel beträgt also bei einer Umschließungsflächentemperatur t_U von $20^\circ \text{C} = 0,543 \text{ W}$. Die Ergebnisse der gleichen Rechnung bei anderen Umschließungsflächentemperaturen sind der Tabelle zu entnehmen.

Tabelle: Wärmeabgabe der Meßgerätekugeln bei verschiedenen Umschließungsflächentemperaturen t_U .

t_U °C	Wärmeabgabe der Kugeln durch Strahlung		Differenz der Wärmeleistungen W
	Schwarze Kugel W	Silberne Kugel W	
12	0,794	0,019	0,775
16	0,677	0,016	0,661
20	0,556	0,013	0,543
24	0,429	0,010	0,419
28	0,297	0,007	0,290
32	0,160	0,004	0,156

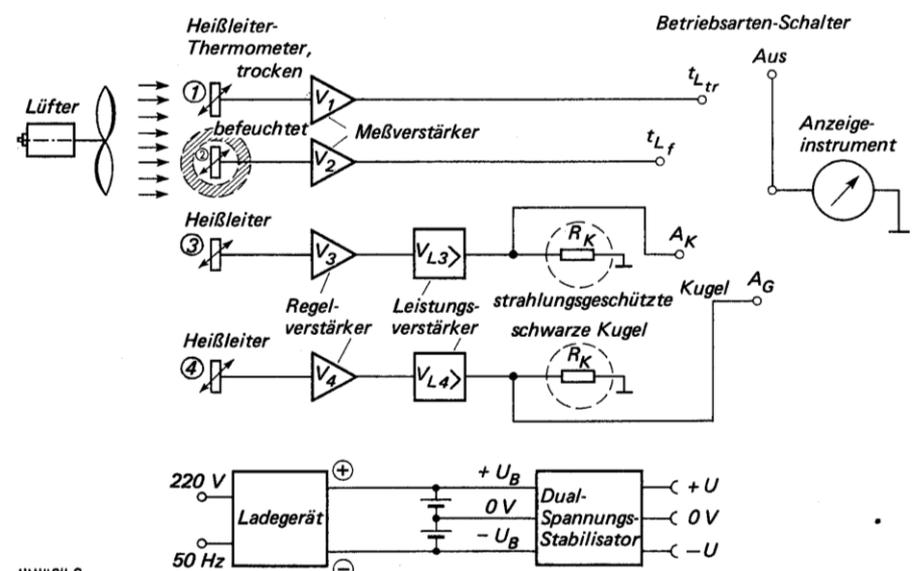
Ein Vergleich dieser rechnerisch ermittelten Wärmeleistungsdifferenzen beider Kugeln bei verschiedenen Temperaturen der Raumbegrenzungsflächen mit der im Auswertennogramm empirisch aufgestellten Vergleichsskala $t_U/A_G - A_K$ zeigt die gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis bei der Konzipierung des Raumklima-Analysators. Beide Kugeln haben wegen ihrer völlig gleichen geometrischen Form und der gleichen geregelten Oberflächentemperaturen auch eine gleichgroße konvektive Entwärmung, so daß auch nach Addition des konvektiven Anteils der deutliche Leistungsunterschied bezüglich Wärmestrahlung erhalten bleibt und sich somit bei gleicher konvektiver Beaufschlagung beider Kugeln (möglichst Lufruhe) die mittlere Oberflächentemperatur der Raumbegrenzungsflächen auf $\pm 0,5^\circ \text{C}$ genau bestimmen läßt.

Elektronischer Aufbau des Raumklima-Analysators

Bild 3 zeigt das Blockschaltbild des Raumklima-Analysators. Die dryfit-Akkumulatoren werden über ein automatisch arbeitendes Ladegerät aus dem Netz (220 V, 50 Hz) versorgt. Ein Dual-Spannungsregler liefert eine Betriebsspannung mit einer Stabilität von $\pm 0,01\%$. Die Lufttemperaturen werden von den Heißleitern 1 und 2 in Verbindung mit den Meßverstärkern V_1 und V_2 gemessen. Die elektronische Temperaturregelung der schwarzen und der strahlungsgeschützten Meßkugel erfolgt über die Heißleiter 3 und 4 und die Regel- bzw. Leistungsverstärker V_3, VL_3, V_4 und VL_4 . Der Betriebsartenschalter gestattet die Anwahl der gewünschten Meßgröße, die vom Drehspulinstrument (Güteklasse 0,5%) angezeigt wird. Die Elektronik ist in gedruckter Schaltungstechnik ausgeführt. Eingesetzt wurden sechs integrierte Schaltkreise (Operationsverstärker). Für die diskreten Transistoren und Dioden wurden nur Silizium-Halbleiter verwendet.

Meßbereiche des Raumklima-Analysators

Der Raumklima-Analysator ist netzunabhängig. Eine Akkuladung reicht für etwa 4 Stunden Betriebszeit. Die Anzeigebereiche umfassen für die Lufttemperatur 14°C bis 34°C in $2/10$ grad-Teilung, für die Feuchtkugeltemperatur 8°C bis 30°C in $1/2$ grad-Teilung. Das Nomogramm erlaubt eine genaue Bestimmung der relativen Luftfeuchte von 10 bis 100%, wenn der atmosphärische Luftdruck etwa 755 Torr beträgt.



HLH404.3

Bild 3: Blockschaltbild des Raumklima-Analysators

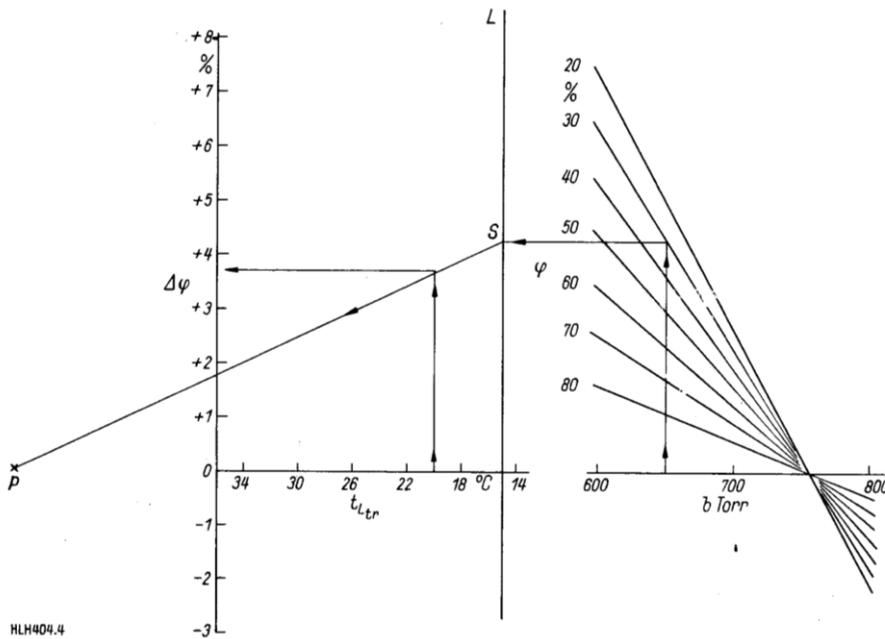


Bild 4: Nomogramm zur Korrektur der für 755 Torr ermittelten relativen Luftfeuchte φ bei abweichendem Luftdruck b und verschiedenen Lufttemperaturen $t_{L, tr}$
 Beispiel: $b = 650$ mmHg; $\varphi = 30\%$; $t_{L, tr} = 20$ °C; vom Luftdruck b senkrecht zur φ -Linie, von dort waagrecht zur Leitlinie L ergibt S . S mit P verbinden. Von $t_{L, tr}$ senkrecht zur Verbindung $S-P$, von dort waagrecht zur Leiter für $\Delta\varphi$.

Wird eine Luftfeuchtemessung bei einem von 755 Torr abweichenden Luftdruck durchgeführt, so kann die Korrektur anhand des Nomogrammes (Bild 4) vorgenommen werden. Ein eingetragenes Beispiel erläutert den Korrekturgang, dessen Ergebnis bei allen möglichen Kombinationen zwischen Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchte eine Genauigkeit innerhalb eines halben Prozentes relativer Luftfeuchte liefert.

Die Verlängerungsgerade der Verbindung des Wertepaares $t_{L, tr}$ und $t_{L, fr}$ die im Schnittpunkt mit der φ -Leiter die relative Luftfeuchte ergibt, soll das im Auswertonomogramm eingetragene „Schwülegebiet“ nach Lancaster-Castens [8] nicht schneiden. Die Bereiche für die Abkühlungsgrößen sind so gewählt, daß Umschließungsflächentemperaturen von 12 °C bis 32 °C erfaßt werden können. Die „empfundene Temperatur“ [8] als arithmetisches Mittel aus Luft- und Umschließungs-

flächentemperatur ist im Auswertonomogramm als Leiter eingetragen. Eine Verbindung der Meßwerte von $t_{L, tr}$ und t_U ergibt t_e . Als Resultierende aus konvektiver Abkühlung A_K und Lufttemperatur im Auswertonomogramm (Bild 2) sind Luftgeschwindigkeiten von 0 cm/s (Luftruhe) bis 60 cm/s nachweisbar. Im übrigen sind die Bereiche der Einzelkomponenten aus dem Auswertonomogramm ersichtlich. Abweichungen der Leitermaßstäbe in diesem Nomogramm von denen in einem früheren [9] beruhen auf den sehr unterschiedlichen gerätespezifischen Eigenschaften zwischen dem Raumklima-Analysator und den damals verwendeten Kathetermetern. Alle aus den Anzeigen des Raumklima-Analysators im Auswertonomogramm gefundenen Zustandsgrößen der Raumklimakomponenten wurden in zahlreichen Vergleichsversuchen in einem Klimaraum auf Reproduzierbarkeit geprüft.

Im Auswertonomogramm verbindet eine dünne Linie die Meßwerte auf den einzelnen Leitern der Raumklimakomponenten, die in normalen Aufenthaltsräumen bei Personen durchschnittlichen Wärmeempfindens mit normaler Bekleidung bei Bürotätigkeit oder vergleichbarer Beanspruchung thermische Behaglichkeit hervorruhen. Differenziertere Angaben über „Sollwerte“ der Klimakomponenten sind in der Literatur [2; 6] angegeben.

Schrifttum

- [1] Roedler, F.: Hygienische Grundlagen der Klimatechnik. Ges.-Ing. 78 (1957), S. 1.
- [2] Grandjean, E.: Wohnphysiologie. Zürich: Artemis 1973.
- [3] Schlüter, G.: Schlierenoptisches Sichtbarmachen feinsten Luftströmungen in der wärmephysiologischen und raumklimatischen Forschung. Ges.-Ing. 84 (1963) Nr. 2, S. 48.
- [4] Lutz, H.: Thermische Behaglichkeit in Wohn- und Arbeitsräumen. Ges.-Ing. 91 (1970) Nr. 12, S. 338.
- [5] Liese, W.: Behaglichkeit — hygienische Bedeutung und klimatechnisches Normativ. Ges.-Ing. 91 (1970) Nr. 4, S. 94.
- [6] Fanger, P. O.: Thermal Comfort. Copenhagen 1970.
- [7] Bradtke, F., u. W. Liese: Hilfsbuch für raum- und außenklimatische Messungen. Berlin/Göttingen/New York: Springer 1952.
- [8] Rietschel/Raib: Lehrbuch der Heizungs- und Lüftungstechnik. 15. Aufl. Bd. 1. Berlin/Göttingen/New York: Springer 1968.
- [9] Schlüter, G.: Das Raumklima in grafischer Darstellung. Ges.-Ing. 88 (1967) Nr. 2, S. 52.
- [10] Gröber, Erk, Grigull: Grundgesetze der Wärmeübertragung. Heidelberg: Springer 1963.
- [11] Kollmar A., u. W. Liese: Die Strahlungsheizung. München: Oldenbourg 1957.
- [12] Schlüter, G.: Ein elektronischer Raumklima-Analysator. Aus dem Bundesgesundheitsamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Berlin-Dahlem. Ges.-Ing. 93 (1972) Nr. 10, S. 289/94.
- [13] Schlüter, G.: Das thermische Raumklima und seine Messung. Haustechn. Rundschau (1973) Nr. 3, S. 77/80.

[H 404]