



Erhard Mayer

Eine neue Bewertungsgröße für Luftbewegungen in Räumen*

Der Wärmeentzug des Menschen durch Luftbewegung, also Konvektion, wird bestimmt von der Lufttemperatur und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. In früheren eigenen Untersuchungen wurde nachgewiesen, daß dieser Koeffizient den Mittelwert und die zeitliche Schwankung von Luftgeschwindigkeiten integriert. Vor Einführung des Koeffizienten in Regelwerke waren noch Fragen zu klären, worüber im folgenden berichtet wird:

- wie groß sind die Einflüsse von Turbulenzgrad, mittlerer Luftgeschwindigkeit sowie Geometrie des angeströmten Körpers (Mensch) auf den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten?
- wie sind die bisher vorgelegenen Bewertungskriterien für zulässige Luftbewegungen zu verallgemeinern auf unterschiedliche Raumtemperaturen?

A new coefficient for estimating air motion in rooms

Heat loss in the human body through air motion, or convection, is a function of air temperature and the convective coefficient of heat transfer. Earlier experiments by the author established that this coefficient combined the mean value for and temporal deviations in air velocity. Before this coefficient could be designed into regulating devices, it was necessary that the following questions be clarified:

- how influential are the degree of turbulence, the mean air velocity and the geometry of the affected object (human body) on the convective coefficient of heat transfer?
- how may existing criteria for estimating permissible air motion be generalized for varying room temperatures?

Une nouvelle grandeur d'appréciation pour les mouvements d'air dans les pièces

L'absorption de chaleur de l'homme par mouvement de l'air, c'est-à-dire la convection, est déterminée par la température de l'air et par les coefficients de convection de transmission de chaleur. Au cours d'analyses personnelles précédentes, il a été prouvé que ce coefficient intègre la valeur moyenne et la variation temporaire des vitesses de l'air. Avant que le coefficient ne soit introduit dans les systèmes de régulation, il a fallu clarifier certaines questions, ce dont traite le présent article:

- Quelle est l'importance de l'influence du degré de turbulence, de la vitesse moyenne de l'air et de la géométrie du corps qui subit l'air (homme) sur les coefficients de convection de transmission de chaleur?
- Comment généraliser aux diverses températures ambiantes les critères d'évaluation existant jusqu'à maintenant et concernant les mouvements d'air admissibles?

Schlüsselwörter – Key Words

Wärmeübergangskoeffizient, zulässige Luftgeschwindigkeit, thermische Behaglichkeit, Tubulenzgrad, Zugluft.

Heat transfer coefficient, permissible air velocity, thermal comfort, degree of turbulence, draught.

1. Messung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten

1.1 Durchführung von Messungen

Klagen über zu große Luftbewegungen werden durch eine zu hohe konvektive Abkühlung von Körperoberflächen verursacht. Der entsprechende formelmäßige Zusammenhang lautet:

$$q_K = \alpha_K (\vartheta_o - \vartheta_L),$$

oder aufgelöst nach ϑ_o $\vartheta_o = \vartheta_L + q_K/\alpha_K$

mit

q_K : Dichte des konvektiven Wärmestroms

α_K : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

ϑ_o : Oberflächentemperatur des wärmeabgebenden Körpers (Hauttemperatur)

ϑ_L : Lufttemperatur.

Konstanten Wärmestrom vorausgesetzt, der durch die körperliche Aktivität vorgegeben ist, sinkt die Hauttemperatur demnach sowohl bei Absenken der Lufttemperatur als auch bei Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, der o.g. neuen Bewertungsgröße für Luftbewegungen.

Zur Ermittlung des Einflusses der Geometrie angeströmter Körper auf die konvektive Wärmeabgabe wurden ein künstlicher beheizter Kopf, eine beheizte Meßpuppe sowie das im Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelte Raumklimameßgerät, beschrieben in [2], eingesetzt. In den ersten beiden Fällen

erfolgte die Messung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten mit der im IBP entwickelten NTC-Leiter, siehe [1]; das Raumklimameßgerät (RKM) erfaßt den Koeffizienten über das q_K -Meter, einem Bestandteil des RKM. Für die Analyse der vorgegebenen Luftbewegungen, d.h. Messung von mittlerer Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad, wurde eine IBP für Bauphysik entwickelte Strömungs-sonde verwendet. In einer Vergleichsuntersuchung mit anderen bekannten Strömungs-sonden erwies sich diese als praktisch richtungsunabhängig und wies mit 30 ms die kürzeste Ansprechzeit auf, siehe [3]. Turbulenzgrad wird hier definiert als das Verhältnis von Standardabweichung des Betrags der Luftgeschwindigkeit zu deren Mittelwert.

1.2 Ergebnisse und Erläuterungen der Messungen

Die Ergebnisse der Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K an der Stirn der beheizten Meßpuppe sind in Bild 1 wiedergegeben. Bei Anströmung von vorne betragen die Turbulenzgrade ca. 5 %, 20 %, 50 % und 70 %. Unter Berücksichtigung des gemessenen Eigenkonvektionswerts von ca. 3 W/m²K, der für höhere Luftgeschwindigkeiten gemessenen α_K -Werte sowie eines gleichartigen Kurvenverlaufs für alle untersuchten Turbulenzgrade wurden die Kurven in Bild 1 gezeichnet. Zu erkennen ist zunächst der erwartete Anstieg von α_K mit der Luftgeschwindigkeit. Weiterhin ist die in früheren Arbeiten nachgewiesene Zunahme der Konvektion mit steigender Turbulenz festzustellen, z.B. [1] [4]. Im Unterschied zu diesen Arbeiten vermittelt Bild 1, daß diese Zunahme erst ab höheren Turbulenz-

* Manuskript eingereicht im Dezember 1991

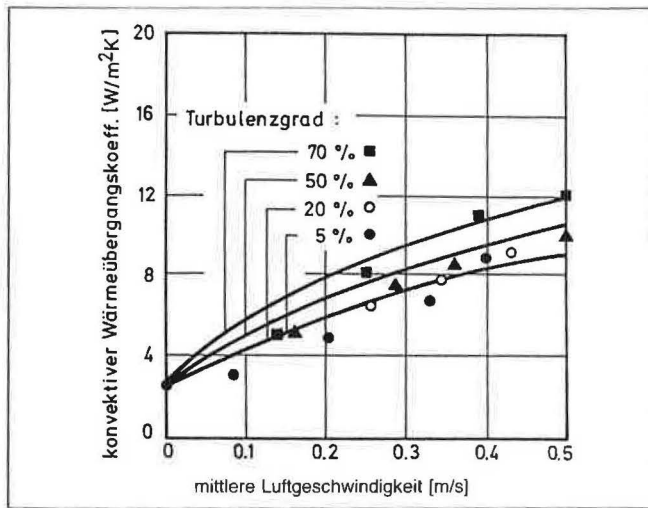


Bild 1 Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten an der Stirn der beheizten Meßpuppe in Abhängigkeit von der mittleren Luftgeschwindigkeit bei Anströmung von vorne und Turbulenzgrade von ca. 5 %, 20 %, 50 % und 70 %. Bei Turbulenzgraden bis 40 % ist der konvektive Wärmeübergang hauptsächlich von der Luftgeschwindigkeit abhängig und der Einfluß der Turbulenz gering.

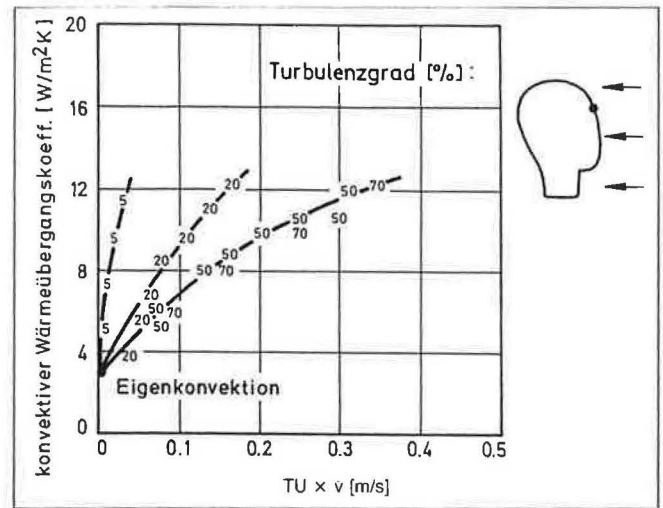


Bild 3 Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten an der Stirn des künstlichen Kopfes in Abhängigkeit vom Produkt aus Turbulenzgrad Tu und mittlerer Luftgeschwindigkeit \bar{v} bei Anströmung von vorne und Turbulenzgraden von ca. 5 %, 20 %, 50 % und 70 % (jeweils Meßpunkte).

graden deutlich wird. Offenbar wird die körpernahe warme Luftschicht erst bei größeren Turbulenzgraden spürbar gestört. Hieraus folgt, daß die in früheren Arbeiten angenommene Abhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten vom Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit erst für höhere Turbulenzgrade gilt. Dies wird bei einer anderen Darstellung der in Bild 1 vermittelten Ergebnisse deutlich. In Bild 2 wurde anstatt der mittleren Luftgeschwindigkeit das Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit als unabhängige Variable gewählt. Aus beiden Bildern ist zusammenfassend zu schließen, daß bei geringer Turbulenz die mittlere Luftgeschwindigkeit allein zur Bewertung von Luftbewegungen hinsichtlich Zugluft ausreicht. Bei Luftbewegungen mit mittlerer und hoher Turbulenz, etwa ab 40 %, ist das Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit – also nach o. g. Definition die Standardabweichung – entscheidend.

Zur Klärung der Frage, inwieweit die Geometrie des angeströmten Körpers die konvektive Wärmeabgabe beeinflusst, wurden die α_K -Messungen an der vollständig beheizten Meßpuppe verglichen

mit denjenigen am beheizten künstlichen Kopf. Die in [1] gewonnenen Ergebnisse für den Kopf sind in Bild 3 wiedergegeben. Aus der Übereinstimmung von Bild 2 und Bild 3 wird deutlich, daß sich an der Stirn, bei Anströmung von vorne, das Vorhandensein des gesamten Körpers praktisch nicht auf die konvektive Wärmeabgabe auswirkt. Offenbar trifft dies auch für die Beheizung der gesamten Körperoberfläche gegenüber der Beheizung nur des Kopfes zu.

Im Unterschied hierzu ist die Lage der Meßstelle am angeströmten Körper entscheidend. Dies verdeutlicht Bild 4. Am Beispiel für Anströmung des Kopfes von vorne, mit konstanter Luftgeschwindigkeit von 0,47 m/s und geringer Turbulenz (5 %) sowie für ruhende Luft sind die α_K -Werte an Stirn, Scheitel, Nacken und Schläfe angegeben. Während beim angeströmten Kopf an Stirn und Scheitel etwa gleiche α_K -Werte gemessen wurden, fällt der deutlich niedrigere Wert an der Schläfe auf. Vergleichsmessungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten mit dem genannten Raumklimameßgerät ergaben ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit dem künstlichen Kopf und der Meßpuppe.

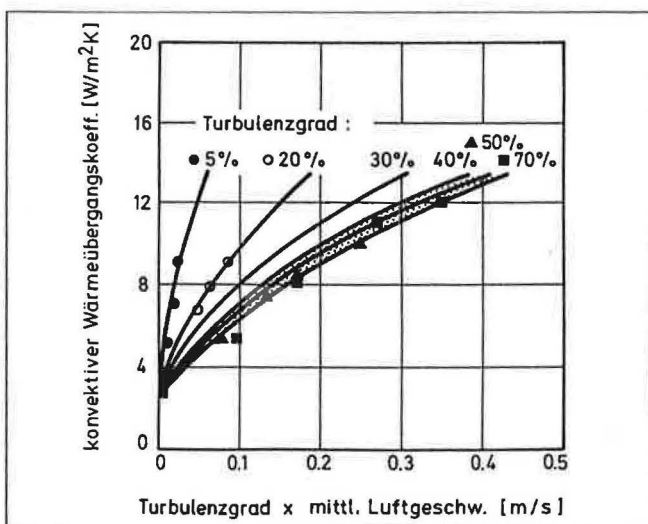


Bild 2 Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit vom Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit. Erst bei größerer Turbulenz ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit von dem Produkt (schraffierter Bereich); bei geringer Turbulenz ist allein die Luftgeschwindigkeit maßgebend (Meßwerte aus Bild 1).

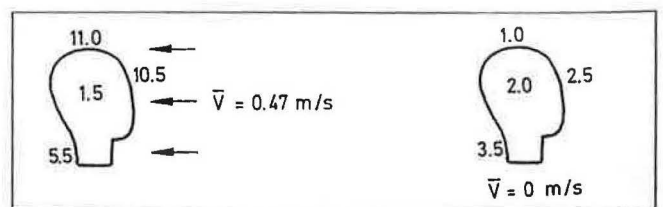


Bild 4 Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten in W/m^2K an Stirn, Scheitel, Nacken und Schläfe des beheizten künstlichen Kopfes bei Anströmung von vorne mit geringer Turbulenz (ca. 5 %) sowie bei ruhender Luft.

2. Gegenüberstellung von physikalischen und psychophysischen Untersuchungen

Um mit Hilfe des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten Luftbewegungen im Hinblick auf die thermische Behaglichkeit bewerten zu können, waren zusätzlich zu den bisher beschriebenen physikalischen Untersuchungen psychophysikalische Untersuchungen, also solche mit Versuchspersonen notwendig. Die Gegenüberstellung solcher Untersuchungen ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

2.1 Berücksichtigung bisheriger psychophysischer Untersuchungen

Wie in [1] ausführlich beschrieben, wurden im Klimatestraum des IBP psychophysische Messungen bei Anströmung von vorne bei einem Turbulenzgrad unter 5 % und bei einer Raumtemperatur von 23 °C durchgeführt. In Bild 5 sind die Ergebnisse wiedergegeben. Aufgetragen sind die Prozentsätze derjenigen, die über

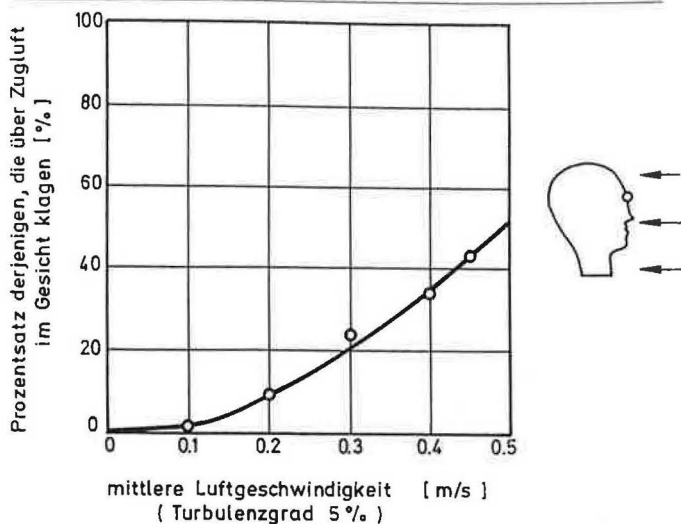


Bild 5 Prozentsatz derjenigen, die über Zugluft im Gesicht bei Anströmung von vorne klagen, in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, bei einem Turbulenzgrad unter 5 % und bei einer Raumtemperatur von 23 °C. Meßwerte für sitzende Versuchspersonen, mit Trainingsanzug bekleidet.

Zugluft im Gesicht klagen, für Luftgeschwindigkeiten zwischen 0 und 0,5 m/s. Verbindet man die physikalischen Ergebnisse aus Bild 1 und die psychophysischen Ergebnisse aus Bild 5, so erhält man die oben genannten Prozentsätze in Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in Bild 6. Aufgrund früherer Untersuchungen [1] gilt der gefundene Zusammenhang von α_K und der Zugluftbewertung praktisch unabhängig von der Anströmrichtung und Turbulenz, d.h. der konvektive Wärmeübergangskoeffizient integriert die Wirkung von mittlerer Luftgeschwindigkeit und dem zeitlich dynamischen Verhalten der Luftbewegung.

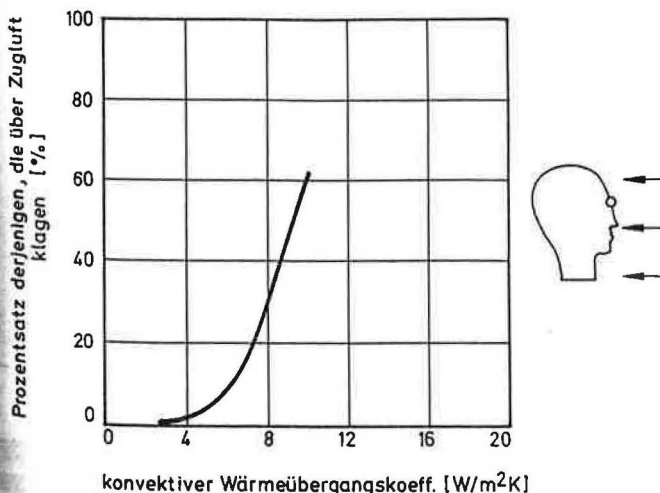
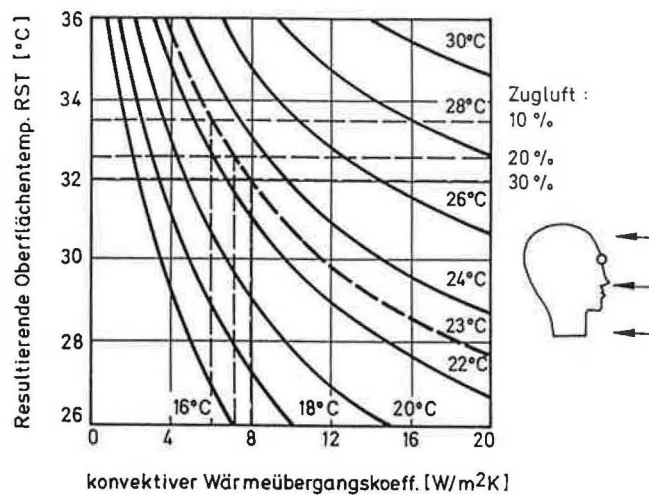


Bild 6 Prozentsatz derjenigen, die über Zugluft klagen, in Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Stirn, bei 23 °C Raumtemperatur bei Anströmung von vorne und einem Turbulenzgrad unter 5 %; aus Bildern 1 und 5.

2.2 Luftbewegungsbewertung für verschiedene Raumtemperaturen

Für die Anwendung der bei einer Raumtemperatur von 23 °C ermittelten Ergebnisse auf weitere Temperaturen wurde eine Wärmebilanzgleichung für die trockene Wärmeabgabe des Menschen verwendet. Hierbei ist die Wärmeabgabe durch Verdunstung nicht berücksichtigt. Diese ist in Bild 7 grafisch dargestellt.



Wärmebilanzgleichung

$$120 \text{ W/m}^2 = \alpha_K (RST - \vartheta_L) + 4.9 \left[\left(\frac{RST + 273.2}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{UF} + 273.2}{100} \right)^4 \right]$$

Bild 7 Resultierende Oberflächentemperatur RST einer mit 120 W/m² beheizten Fläche in Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K so wie von der Raumtemperatur (Lufttemperatur ϑ_L und Umschließungsflächentemperatur ϑ_{UF} gleich), bei ausschließlich trockener Wärmeabgabe. Die resultierende Oberflächentemperatur wurde mit der angegebenen Wärmebilanzgleichung ermittelt. Aus Bild 6 sind die dort bei 23 °C Raumtemperatur angegebenen α_K -Werte entnommen für 10 %, 20 % und 30 % Unzufriedene aufgrund von Zugluft.

In Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K sind die Oberflächentemperaturen RST einer mit 120 W/m² beheizten Fläche aufgetragen, bei jeweils gleichen Temperaturen ϑ_L und Umschließungsflächentemperaturen ϑ_{UF} (Raumtemperaturen) zwischen 16 °C und 30 °C. Die vorgegebene Heizleistung entspricht etwa der Gesamtwärmeabgabe der in der vorliegenden Untersuchung besonders betrachteten menschlichen Stirn in Ruhe und ist der konvektiven Wärmeabgabe und der Wärmeabgabe durch Abstrahlung gleichgesetzt. Von Bild 6 wurden die α_K -Werte entsprechend 10 %, 20 % und 30 % Unzufriedenen aufgrund von Zugluft im Gesicht bei Anströmung von vorne und bei 23 °C übernommen, also ca. 6 W/m²K, 7 W/m²K und 8 W/m²K. Unter der Voraussetzung, daß gleiches Zugluftempfinden durch jeweils dieselbe Hautoberflächentemperatur zu beschreiben ist, wurden die RST-Werte für 10 %, 20 % und 30 % Unzufriedene durch waagrechte Linien gekennzeichnet. Aus den Schnittpunkten dieser Linien mit den Temperaturkurven erhält man direkt den in Bild 8 aufgezeichneten Zusammenhang von Raumtemperatur und zulässigem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Um Aussagen über zulässige Luftgeschwindigkeiten bei horizontaler Anströmung von vorne zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse der Bilder 1 und 8 kombiniert und in Bild 9 grafisch dargestellt. Angegeben sind die mittleren Luftgeschwindigkeiten entsprechend 15 % Unzufriedenen aufgrund von Zugluft im Gesicht in Abhängigkeit von der Raumtemperatur für Turbulenzgrade zwischen 0 % und 70 %.

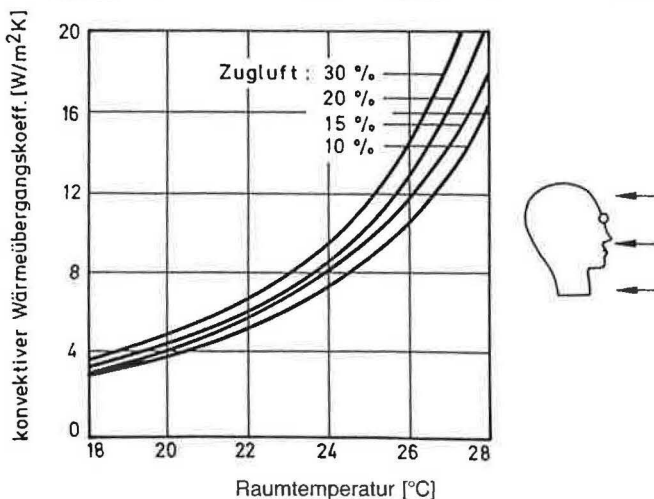


Bild 8 Aus Bild 7 entnommene konvektive Wärmeübergangskoeffizienten entsprechend 10 %, 15 %, 20 % und 30 % Unzufriedenen aufgrund von Zugluft in Abhängigkeit von der Raumtemperatur.

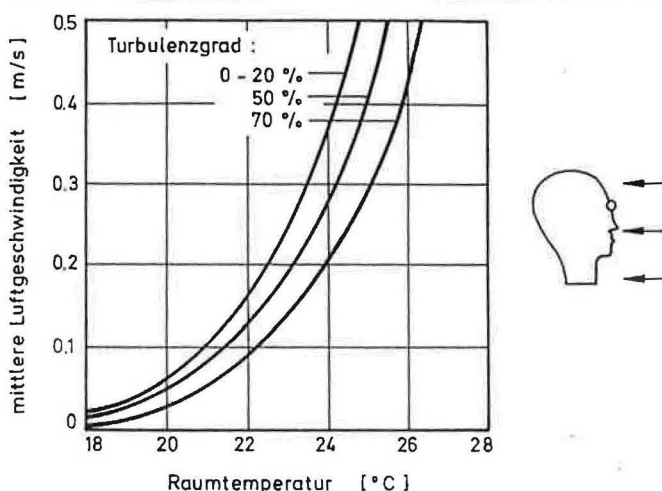


Bild 9 Mittlere Luftgeschwindigkeiten entsprechend 15 % Unzufriedenen aufgrund von Zugluftwahrnehmung im Gesicht, bei Anströmung von vorne für Turbulenzgrade zwischen 0 % und 70 %, in Abhängigkeit von der Raumtemperatur (aus Bildern 1 und 8 entnommen). Grundlage hierfür sind psychophysische Messungen bei 23 °C an sitzenden Versuchspersonen mit Trainingsanzug bekleidet (Bild 5), physikalische Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (Bild 1) sowie die Anwendung einer Wärmebilanzgleichung (Bild 7).

Temperaturen auch die feuchte Wärmeabgabe über Verdunstung berücksichtigt werden. Inwieweit der Anteil der feuchten Wärmeabgabe mit zunehmendem Wärmeübergangskoeffizient zunimmt und damit die o.g. Kurvenverläufe beeinflusst, ist zur Zeit noch Gegenstand der Forschung.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Bisher wurden für die Bewertung von Luftbewegungen im Hinblick auf Zugluftprobleme die mittlere Luftgeschwindigkeit und die Raumtemperatur verwendet. In der vorliegenden Untersuchung wird gezeigt, daß neben der mittleren Luftgeschwindigkeit auch die Turbulenz von Luftbewegungen auf den konvektiven Wärmeentzug des Menschen wirkt. Meßgrößen für die integrale Wirkung von mittlerer Luftgeschwindigkeit und Turbulenz auf die Abkühlung der Haut und damit die thermische Behaglichkeit sind die Lufttemperatur und der konvektive Wärmeübergangskoeffizient. Voraussetzung für die richtige Zuordnung von mittlerer Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad zur neuen Bewertungsgröße, dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, ist eine korrekte Analyse von Luftbewegungen. Diese setzt Anemometer voraus, welche die Luftbewegungen richtungsunabhängig und möglichst ohne Verzögerung erfassen. Die Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ergaben, daß Luftgeschwindigkeiten mit geringer Turbulenz bzgl. Zugluft unabhängig von der Turbulenz zu bewerten sind. Für Luftgeschwindigkeiten mit mittlerer und hoher Turbulenz, etwa ab 40 %, ist das Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit entscheidend. Mit Hilfe früherer psychophysischer Messungen (Befragungen von Versuchspersonen) und der Verwendung einer Wärmebilanzgleichung führten die genannten physikalischen Messungen zu Kurven zulässiger mittlerer Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Raumtemperatur und Turbulenzgrad. Dabei zeigt sich für Raumtemperaturen um 23 °C eine gute Übereinstimmung mit früheren Ergebnissen Fangers, während sich für niedrigere Raumtemperaturen geringere und für höhere Raumtemperaturen höhere zulässige Luftgeschwindigkeiten ergeben. Die Untersuchungen zeigen, daß der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zusammen mit der Lufttemperatur für die Zugluftbewertung geeignet und meßbar ist. Vor der Einführung dieser neuen Bewertungsgröße in Regelwerke sollten ergänzende psychophysische Messungen bei ca. 20 °C und 26 °C durchgeführt werden.

Das Forschungsvorhaben wurde von der Forschungsvereinigung Luft- und Trocknungstechnik e. V. (FLT) und dem Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AIF-Nr. 7764) gefördert.

Literatur

- [1] Mayer, E.; Schwab, R.: Untersuchung der physikalischen Ursachen von Zugluft. Gesundheitsingenieur 111 (1990), H. 1, S. 17-30.
- [2] Mayer, E.: Thermische Behaglichkeit in Räumen. Neue Beurteilungs- und Meßmöglichkeiten. Gesundheitsingenieur 110 (1989), H. 1, S. 35-43.
- [3] Mayer, E.: Überprüfung einer neuen Bewertungsgröße für Luftbewegungen in Räumen. Bericht 3/1/34/91 (1991) der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik.
- [4] Fanger, P. O.; Melikov, A.; Hanzawa, H.; Ring, J.: Air Turbulence and Sensation of Draught. Energy and Buildings, 12 (1988), H. 1, S. 21-39.

Weitere Randbedingungen für diese Kurven sind: Anströmung von vorne, sitzende Tätigkeit und Bekleidung, deren Wärmedämmung etwa der eines Trainingsanzugs entspricht. Hinsichtlich des Kurvenverlaufs für höhere Temperaturen ist folgende einschränkende Feststellung zu treffen. Während die verwendete Wärmebilanzgleichung die physiologischen Verhältnisse für Temperaturen unter ca. 23 °C richtig wiedergeben dürfte, müßte bei höheren