

Untersuchungen von Zugerscheinungen mit Hilfe physikalischer Meßmethoden



Erh. MAYER

1. Problemstellung

Maßgebend für die thermische Wechselwirkung des Menschen mit seiner Umgebung und damit für die thermische Behaglichkeit sind vier Raumklimabedingungen:

Lufttemperatur,
Luftgeschwindigkeit,
Umschließungsflächentemperatur und
Luftfeuchtigkeit.

Je nach Aktivität eines Menschen produziert dieser durch den Stoffwechsel Wärme, die unter stationären Bedingungen entsprechend den genannten Größen und der Bekleidung durch Leitung (hauptsächlich über die Füße), Konvektion, Strahlung sowie Verdunstung und Atmung abgeführt wird [1].

Nachdem Luftbewegungen in Räumen mit Lüftungs- und Klimaanlage trotz Erfüllung der Norm DIN 1946 [2] vielfach zu Zugerscheinungen führen, ist die Untersuchung des konvektiven Anteils der Wärmeabgabe von besonderer Bedeutung.

Bestimmt wird die konvektive Wärmeabgabe durch die beiden Raumklimabedingungen Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit sowie durch die Oberflächentemperatur des die Wärme abgebenden Körpers.

Der formelmäßige Zusammenhang lautet:

$$q_k = \alpha_k (\vartheta_o - \vartheta_L),$$

mit q_k : Dichte des konvektiven Wärmestroms
 α_k : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
 ϑ_o : Oberflächentemperatur des warmen Körpers
 ϑ_L : Lufttemperatur,

wobei α_k in erster Linie von der Luftgeschwindigkeit abhängt. Somit ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient diejenige Größe, die eine Luftbewegung, unabhängig von den Temperaturverhältnissen bzgl. der konvektiven Wärmeabgabe und damit bzgl. des Zugempfindens charakterisiert.

Als Ursache für die genannte Diskrepanz zwischen Erfüllung der Norm und dennoch auftretenden Zugerscheinungen wurde von Klimatechnikern vermutet, daß die Luftbewegung durch den Mittelwert der Luftgeschwindigkeit (wie

bisher gehandhabt) nicht zutreffend beschrieben wird; sondern daß zusätzlich Standardabweichung und Frequenz der stets zeitlich schwankenden Strömungsgeschwindigkeiten zu berücksichtigen seien [3; 4]. Tatsächlich haben systematische Untersuchungen bei Fanger, mit Versuchspersonen, die Erfahrung belegt, daß gleichhohe Luftgeschwindigkeiten mit geringer Turbulenz eher behaglich empfunden werden, als solche mit starker Turbulenz [5].

Erste Untersuchungen der physikalischen Ursachen für Zugerscheinungen wurden im Institut für Bauphysik 1978 durchgeführt, mit folgender Hypothese als Ergebnis.

Das Zugempfinden und damit der konvektive Wärmeübergang werden bestimmt vom Produkt der relativen Schwankungsbreite einer Luftströmung und der mittleren Luftgeschwindigkeit, wobei unter relativer Schwankungsbreite oder Turbulenzgrad das Verhältnis aus der Standardabweichung einer zeitlich schwankenden Luftgeschwindigkeit und deren zeitlichem Mittelwert zu verstehen ist [6]. D. h. zur Gewährleistung thermischer Behaglichkeit soll mit zunehmender mittlerer Luftgeschwindigkeit die relative

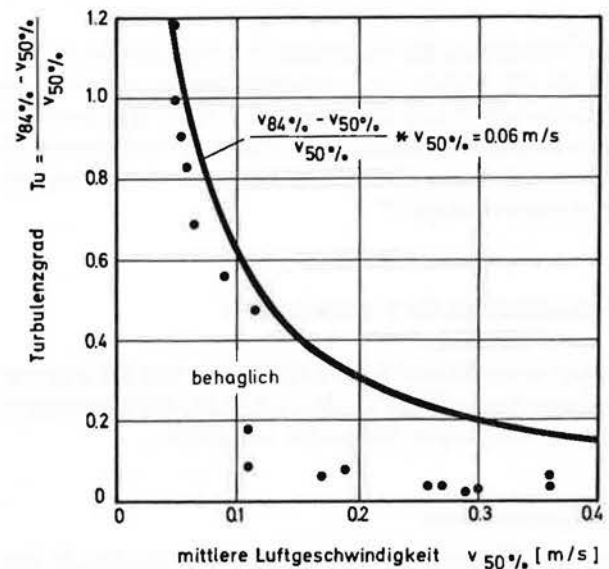


Bild 1. Kombination von mittlerer Luftgeschwindigkeit $v_{50\%}$ und Turbulenzgrad Tu , die in klimatisierten Büro- und sog. Reinlufräumen (Fa. Siemens) mit unterschiedlichen Arten von Verdrängungslüftung und Induktivlüftungen in 20 cm, 130 cm und 180 cm Höhe über dem Boden gemessen worden sind (Punkte). Nach Aussage der Mitarbeiter war in keinem Fall thermisches Unbehagen aufgrund von Zugerscheinungen gegeben. Kombinationen von $v_{50\%}$ und Tu , deren Produkt 0,06 m/s beträgt, sind als Kurve gekennzeichnet. Aus [6].

Schwankungsbreite abnehmen, während bei niedriger Luftgeschwindigkeit auch eine turbulenzreichere Strömung zulässig ist. Dies ist in *Bild 1* verdeutlicht.

In das Diagramm, mit der mittleren Luftgeschwindigkeit als Abszisse und dem Turbulenzgrad als Ordinate, ist eine Kurve gezeichnet, welche die Punkte mit einem konstanten Produkt aus diesen beiden Größen repräsentiert. Die eingezeichneten Punkte markieren Kombinationen von Turbulenzgraden und mittleren Luftgeschwindigkeiten, die in klimatisierten Büro- und sog. Reinlufräumen* mit unterschiedlichen Arten von Verdrängungslüftung und Induktivlüftungen gemessen worden sind.

Nach Auskunft der Mitarbeiter traten an diesen Arbeitsplätzen keine Zegerscheinungen auf. Ausgehend von der Annahme, daß bei Auslegung der Lüftung in den klimatisierten Räumen Zegerscheinungen gerade noch vermieden wurden, wurde die Kurve mit konstantem Produkt von Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit als Einhüllende der Punkte eingezeichnet. Entsprechend der o. g. Hypothese würden Luftbewegungen, die unterhalb der Kurve einzutragen sind, nicht zu Zegerscheinungen führen.

Eine Erklärung für die Hypothese ist möglich mit Hilfe der Bedeutung der körpernahen, relativ warmen Grenzschicht für die Wärmeabgabe des Menschen, die auch *R. P. Clark* vom Clinical Research Centre, Großbritannien, nachgewiesen hat [7].

Diese, durch die Eigenkonvektion aufrechterhaltene Grenzschicht wird sowohl durch die Zunahme des Mittelwerts der Luftgeschwindigkeit als auch durch die Turbulenz gestört. Der kombinierte Einfluß der beiden Größen auf das Zugempfinden wird durch deren Produkt charakterisiert, das in *Bild 1* – hypothetisch, aufgrund der bisher vorliegenden Messungen – mit 0,06 m/s angenommen wurde.

Die Überprüfung der Hypothese, d. h. die Klärung der Frage, ob ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Grenzkurve für Zegerscheinungen in *Bild 1* und dem konvektiven Wärmeübergang – der physikalischen Ursache für Zegerscheinungen – besteht, ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen**.

2. Durchführung der Untersuchungen

Zunächst werden der Klimastraum, in dem die Untersuchungen durchgeführt wurden, sowie die hierbei eingesetzten, z. T. neuartigen Meßgeräte vorgestellt.

2.1 Klimastraum

Bei dem Klimastraum des Instituts für Bauphysik handelt es sich um einen Versuchsraum, der die Möglichkeit bietet, die eingangs genannten Raumklimabedingungen:

* In diesen Räumen werden elektronische Bauteile in möglichst staubfreier Luft hergestellt.

** Die Untersuchungen werden mit Förderung des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau durchgeführt.

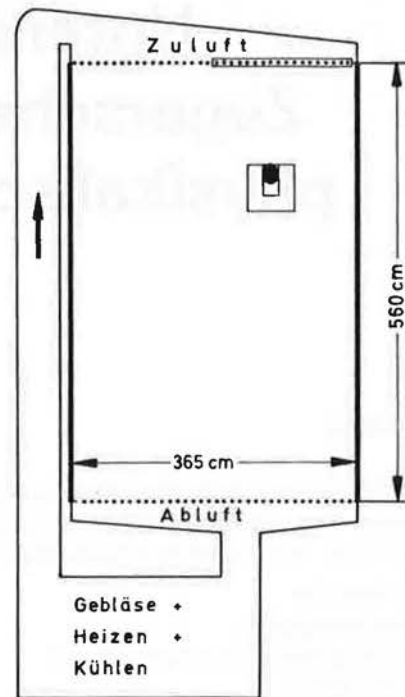


Bild 2. Grundriß des Klimastraums und Anordnung des beheizten künstlichen Kopfes. Höhe des Raums: 260 cm.

Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Umschließungsflächen-temperatur sowie Luftfeuchtigkeit gezielt zu verändern. Für die vorliegenden Untersuchungen der Luftgeschwindigkeit wurden die Lufttemperatur und Umschließungsflächen-temperatur mit 22 °C, sowie die relative Luftfeuchtigkeit mit 50 % konstant beibehalten. Nach dem Prinzip der horizontalen Verdrängungslüftung erfolgt die Luftführung über zwei Lochbleche an den Stirnflächen des Klimastraums (siehe *Bild 2*). In Verbindung mit einer Filtermatte vor dem Lochblech der Zuluft-Austrittsfläche (in Strömungsrichtung) bewirkt diese Art der Belüftung im Versuchsraum eine verhältnismäßig turbulenzarme, in *Bild 2* von oben nach unten gerichtete, Luftströmung, deren Betrag durch die einstellbare Leistung des Gebläses (im *Bild* unten) veränderbar ist. Um nun auch die Turbulenz der

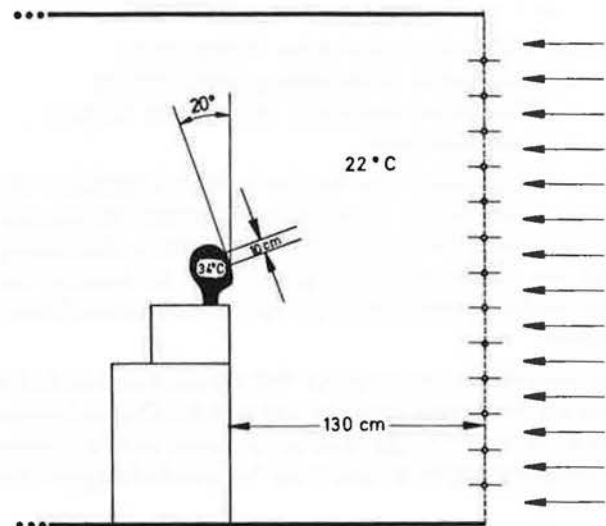


Bild 3. Anordnung des beheizten künstlichen Kopfes im Klimastraum, Längsschnitt.

Luftbewegung zu variieren, sind an der rechten Hälfte der Zuluftfläche horizontale, um 360° drehbare, Jalousieklappen angebracht, die über einen Motor mit einstellbarer Geschwindigkeit gedreht werden können.

Zur Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wurde in den somit bzgl. Mittelwert und Turbulenz veränderbaren Luftstrom ein beheizter Körper gestellt (in *Bild 2* oben rechts in Draufsicht, in *Bild 3*, mit anderem Maßstab dargestellt, in Seitenansicht). Ausgehend von der Tatsache, daß der unbedeckte menschliche Kopf ein besonders empfindlicher „Indikator“ für Zugerscheinungen ist [8], wurde für die vorgesehenen Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten notwendigen beheizten Körper ein künstlicher Kopf gewählt. Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erhalten, wurde dieser aus vollem Metall (Aluminium) hergestellt und auf einem leicht positionierbaren Holzkasten befestigt. Beheizt wurde der Kopf mit Hilfe einer eingebauten elektrischen Heizplatte, deren Heizleistung von einem Regler so gesteuert wurde, daß die Stirn des künstlichen Kopfes konstant 34°C betrug.

2.2 Anemometer

Für die objektive Messung der Geschwindigkeit und insbesondere der Turbulenz einer Luftbewegung war ein Anemometer erforderlich, das in der Lage ist, richtungsunabhängig, flink und mit hoher Auflösung zu messen. Ein solches Gerät war zum Zeitpunkt der vorgesehenen Untersuchungen nicht verfügbar. So schreibt *Moog* in der Schlußbemerkung seines Artikels „Ähnlichkeitstheoretische Überlegungen bei Raumströmungen“ 1978: „... gibt es bisher immer noch kein ausreichend empfindliches, richtungsunabhängiges Anemometer auf dem Markt ...“ [9]. Als Ausweg aus dieser Situation wurde im Institut für Bauphysik ein solches Anemometer entwickelt (ausführlich beschrieben in [10]).

Einige wesentliche Eigenschaften des Anemometers werden im folgenden kurz vorgestellt:

Das Anemometer arbeitet nach dem sog. Konstanttemperatur-Meßprinzip; d. h. der Meßfühler (ein Heißleiter) wird auf konstante Temperatur beheizt, und die hierfür erforderliche elektrische Leistung ist ein Maß für den Wärmeentzug durch die Luft. Nachdem die Höhe der Wärmeabgabe sowohl durch die Luftbewegung als auch – hier unerwünscht, insbesondere bei wechselnden Lufttemperaturen – durch die Differenz der Temperatur von Meßfühler und Luft bestimmt wird, muß der Temperatureinfluß ausgeschlossen werden. Hierfür dient ein zweiter Heißleiter, der sog. Temperaturkompensationsheißleiter. *Bild 4* vermittelt eine Ansicht des Meßfühlerkopfes mit den beiden Heißleitern.

Bild 5 zeigt anhand von Eichkurven* für das entwickelte Anemometer dessen Grad der Richtungsunempfindlichkeit bezüglich Auf- und Abwärtsströmung. In der oberen Darstellung sind die Luftgeschwindigkeiten zwischen 0 m/s und 0,6 m/s aufgetragen. Ab ca. 0,05 m/s decken sich

* Die Eichkurven wurden mit dem in [11] beschriebenen Eichkanal aufgenommen.

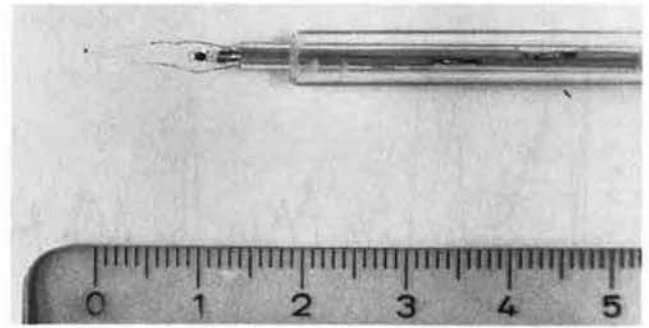


Bild 4. Meßfühler mit Meßheißleiter (an der Spitze) und Kompensationsheißleiter (bei 10 mm).

praktisch beide Eichkurven. Lediglich im Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 0,05 m/s treten, wie der unteren Darstellung von *Bild 5* zu entnehmen ist, gewisse Unterschiede der Ausgangsspannung bei Aufwärtsströmung (Kreise mit gestrichelter Linie) auf.

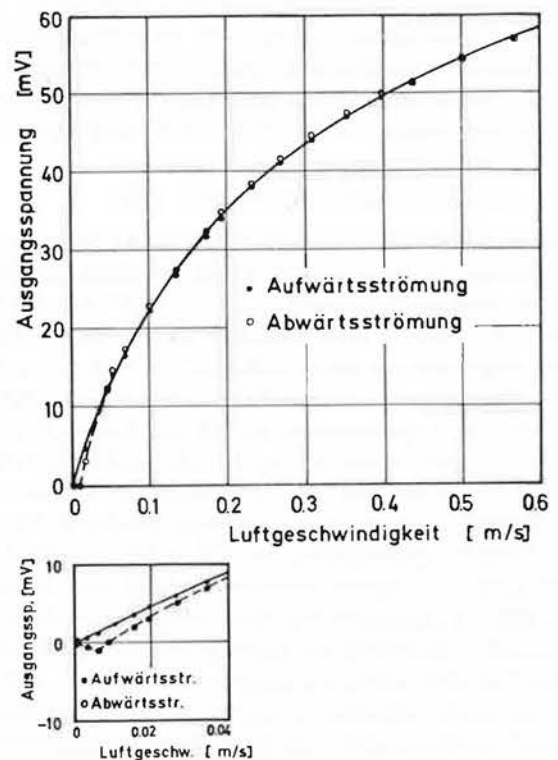


Bild 5. Eichkurven für das entwickelte Anemometer im Bereich von 0 m/s bis 0,6 m/s (oben) und Detaildarstellung im Bereich kleiner Luftgeschwindigkeiten zwischen 0 m/s und 0,04 m/s, bei vergrößertem Maßstab (unten), jeweils für aufwärts (●) und abwärts (○) gerichtete Luftströmung.

Die Ansprechzeit des Anemometers auf wechselnde Luftgeschwindigkeitsbeträge wurde im o. g. Klimatestrahl untersucht. Mit Hilfe von motorbetriebenen Jalousieklappen wurde eine turbulenzreiche Luftströmung erzeugt, der das Anemometer ausgesetzt wurde, mit seitlicher Hauptanströmung. In *Bild 6* ist der zugehörige Originalschrieb für eine Zeitdauer von 10 Sekunden wiedergegeben. Auf der Abszisse ist die Zeitskala, an der Ordinate die Luftgeschwindigkeitsskala, beginnend mit 0,15 m/s aufgetragen. Festzustellen ist, daß Geschwindigkeitsschwankungen, die innerhalb von 50 m/s auftreten, noch registriert werden. Genauere

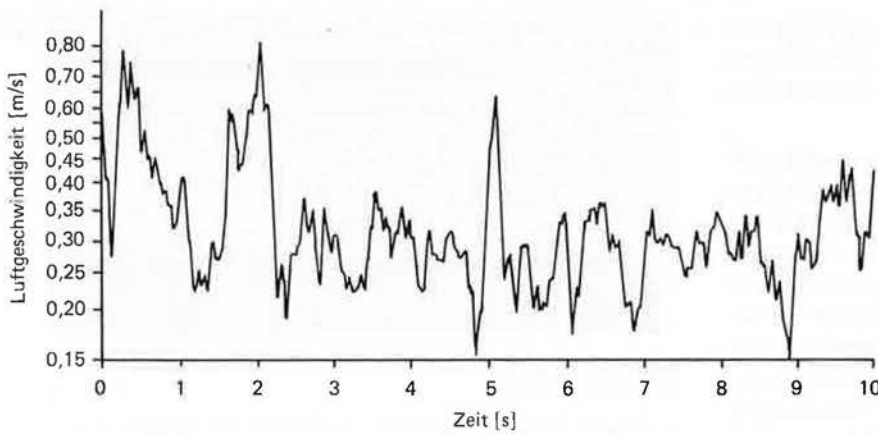


Bild 6. Originalschrieb (im Maßstab $1:\sqrt{2}$ verkleinert) der Anemometer-Meßsignale, bei gegebener Luftbewegung. Hauptanströmrichtung von der Seite, aufgenommen im Klimastraum des Instituts für Bauphysik.

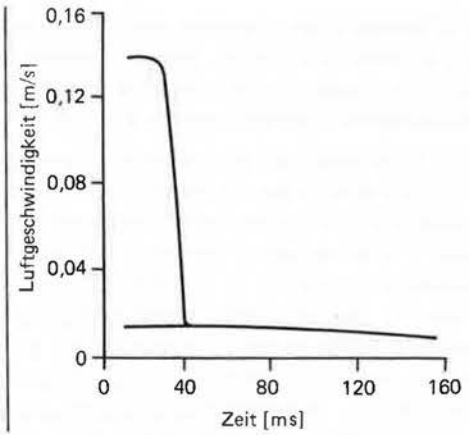


Bild 7. Abklingkurve des Anemometer-Meßsignals bei plötzlicher Unterbrechung einer laminaren Luftströmung mit der Geschwindigkeit $V_{\max} = \text{ca. } 0,14 \text{ m/s}$. Die Abklingzeit von $V_{\max} = 0,14 \text{ m/s}$ auf $V = V_{\max}/e = 0,05 \text{ m/s}$ betrug ca. 10 ms [12].

Untersuchungen im klimatechnischen Labor der Fa. Trox in einem Strömungskanal, bei dem ein konstanter Luftstrom durch einen schnellschließenden Fotoverschluß „gestoppt“ wurde, ergaben eine Abklingzeit der Anemometerausgangsspannung von ca. 10 ms, siehe Bild 7 [12].

2.3 Laser-Differential-Interferometer (LDI)

Eigentliches Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei gegebener Luftbewegung. Da insbesondere der Einfluß sehr schnell schwankender (turbulenter) Luftgeschwindigkeiten auf diese Größe untersucht werden sollte, war für deren meßtechnische Erfassung ein Gerät erforderlich, das die Registrierung praktisch verzögerungsfrei und möglichst ohne Beeinflussung der Meßgröße durchführt. Ein solches Gerät stellt das verwendete, im folgenden beschriebene Laser-Differential-Interferometer (LDI) dar. Ausführliche Beschreibung des LDI in [13]. Mit Hilfe des LDI kann der Temperaturverlauf in Nähe eines beheizten Körpers auf optischem Weg und damit entsprechend den genannten Anforderungen ermittelt werden. Anschließend kann man unter Berücksichtigung der Tatsache, daß sich der vor einem beheizten Körper einstellende Temperaturverlauf in Abhängigkeit von dessen Entwärmung durch die bewegte Luft ergibt, durch Rechnung auf den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten schließen (beschrieben in Abschn. 3.1).

Meßprinzip und Aufbau des LDI

Wesentliches Merkmal eines LDI ist die Aufteilung eines (Laser) Lichtstrahles in zwei mit geringem Abstand parallel nebeneinander verlaufende interferenzfähige Teilstrahlen, die das zu untersuchende Medium durchlaufen (hier die Luft vor dem beheizten Kopf) und anschließend wieder vereinigt werden. Besteht im Medium ein Dichtegefälle (hier aufgrund unterschiedlich warmer Luft), und somit ein Brechzahlgefälle, legen beide Teilstrahlen unterschiedliche optische Weglängen zurück. Die Folge sind eine entsprechende Phasenverschiebung und davon abhängig: Lichtintensitätsverstärkung oder -schwächung durch Interfe-

renz. Im vorliegenden Fall liefert das LDI nach Auswertung der Interferenzergebnisse Meßwerte für den Dichte- und damit Temperaturunterschied der Luft zwischen den beiden Teilstrahlen. Um das gesamte Temperaturprofil vor dem beheizten Kopf zu ermitteln, müssen beide Teilstrahlen schrittweise durch den interessierenden Bereich geführt, und die Einzelwerte der Temperaturdifferenz aufaddiert werden.

Den Aufbau des LDI vermittelt Bild 8 oben.

Ein kontinuierlich arbeitender Helium-Neon-Laser erzeugt einen linear polarisierten Lichtstrahl, der über einen Spiegel zu einem Schwingspiegel abgelenkt wird. Mit Hilfe dessen wird das Licht in dem zu untersuchenden Meßfeld (Bildmitte) mit einstellbarer Geschwindigkeit hin und her geführt. Der linear polarisierte Strahl wird durch die $\lambda/4$ -Platte zirkular polarisiert und in dem Wollastonprisma* in zwei senkrecht zueinander polarisierte divergierende Teilstrahlen gleicher Intensität aufgespalten. Zuvor wird der Lichtstrahl durch das Objektiv zwischen Schwingspiegel und $\lambda/4$ -Platte in die Mitte des Wollastonprismas fokussiert.

Zwischen den beiden aus dem Prisma austretenden, senkrecht zueinander polarisierten Teilstrahlen besteht eine feste Phasenbeziehung.

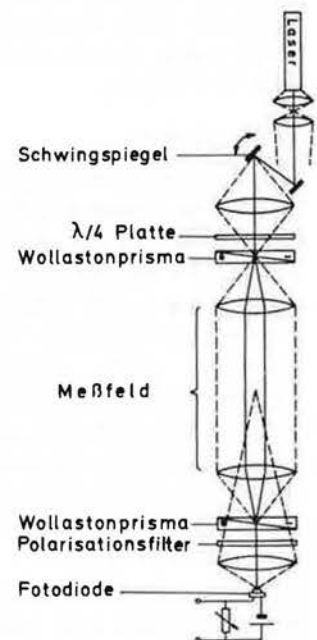


Bild 8. Aufbau des Laser-Differential-Interferometers (Draufsicht).

* Wollastonprismen bestehen aus doppelbrechendem Material, wobei zwei keilförmige Teile so zusammengefügt sind, daß die optischen Achsen senkrecht aufeinander stehen (Striche und Punkte in den Wollastonprismen in Bild 8 geben die Polarisationsrichtung des Lichts an).

Die beiden divergierenden Teilstrahlen werden durch eine Linse parallel zueinander ausgerichtet und durchlaufen das Meßfeld in einem definierten Abstand, der im vorliegenden Fall 0,3 mm betrug.

Mit Hilfe einer gleichen Anordnung von Linse und Wollastonprisma werden beide Teilstrahlen wieder vereint – wobei dieses zweite Wollastonprisma den Gangunterschied ebenfalls um einen festen Betrag ändert. Das anschließende Polarisationsfilter filtert aus den beiden zusammengeführten Teilstrahlen mit zueinander senkrechten Polarisations Ebenen nur Anteile mit gleicher Polarisations Ebene heraus, die dann interferieren.

Schließlich wird der Lichtstrahl durch ein Objektiv auf eine Fotodiode projiziert, wo die Strahlungsleistung in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. In Verbindung mit einer Spannungsquelle und einem Arbeitswiderstand wirkt die Fotodiode als Stromventil, das einen, der jeweiligen Lichtintensität proportionalen Strom durch den Arbeitswiderstand fließen läßt. Der Spannungsabfall am Arbeitswiderstand ist dann das eigentliche Meßsignal des LDI.

Bild 9 ist eine Fotografie des LDI und des künstlichen Kopfes, an dem die Wärmeübergangsmessungen durchgeführt worden sind.

Die etwas komplizierte Auswertung von LDI-Meßsignalen ist in [13] ausführlich beschrieben. Zunächst erhält man aus den Messungen den Verlauf der Luftdichte vor dem beheizten Kopf. Hieraus läßt sich über den bekannten Zusammenhang von Temperatur und Dichte der Luft das gewünschte Temperaturprofil in Kopfnähe ermitteln. Die Genauigkeit der Messungen mit dem LDI, bezogen auf den Temperaturgradienten des Lufttemperaturprofils vor dem beheizten Kopf, betrug 0,1 K/0,3 mm.

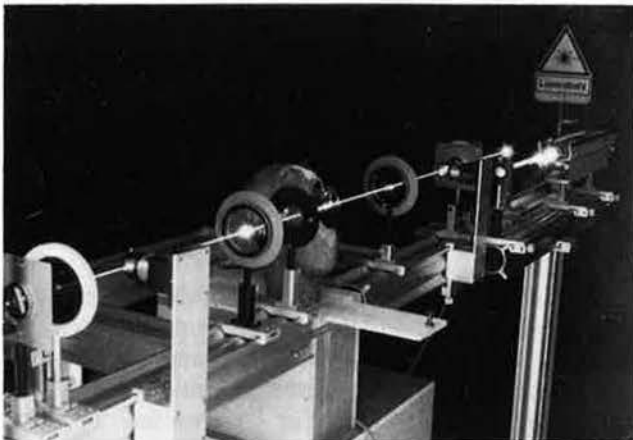


Bild 9. Ansicht des Laser-Differential-Interferometers.

3. Ergebnisse der Untersuchungen und Erläuterungen

Im folgenden werden die Ergebnisse der mit dem Laser-Differential-Interferometer durchgeführten Messungen bei verschiedenen Luftbewegungen vorgestellt.

Wie in Abschn. 2.3 erwähnt, können mit dem Laser Differential Interferometer (LDI) praktisch ohne Beeinflussung einer gegebenen Luftbewegung Lufttemperaturprofile vor

dem beheizten künstlichen Kopf ermittelt werden. Für die Bestimmung konvektiver Wärmeübergangskoeffizienten ist eine entsprechende Umrechnung erforderlich, die zunächst beschrieben wird.

3.1 Zusammenhang zwischen Lufttemperaturprofil und konvektivem Wärmeübergangskoeffizienten

Die Untersuchungen des konvektiven Wärmeübergangs bei unterschiedlichen Luftbewegungen wurden mit der in Bild 3 skizzierten Versuchsanordnung an einem auf 34°C beheizten künstlichen Kopf durchschnittlicher Größe durchgeführt. Und zwar wurden die konvektiven Verhältnisse etwa im Stirnbereich des Kopfes bei Eigenkonvektion (Raumluft ohne Bewegung) und bei unterschiedlicher Anströmung von vorne überprüft. Die Lufttemperatur betrug 22°C.

Nachdem es für eine leichte Auswertbarkeit von LDI-Messungen Voraussetzung ist, daß die beiden Teilstrahlen über eine definierte Weglänge durch das zu untersuchende Medium laufen (erwärmte Luft), wurde der Kopf für die vorliegenden Messungen entsprechend modifiziert. Eine zylindrische Scheibe mit 10 cm Durchmesser wurde so eingebaut, daß anstelle der Stirn mit seitlichen Abrundungen eine ebene Fläche mit definierten Kanten entstand.

Die Ergebnisse der unter diesen Voraussetzungen mit dem LDI gemessenen Lufttemperaturen vor dem beheizten Kopf ließen vermuten, daß deren Abfall von Kopfnähe zu größerer Entfernung exponentiell erfolgt. Zur Überprüfung dieser Vermutung wurden einige der Meßergebnisse auf logarithmischem Papier aufgetragen. In Bild 10 wurde für den Abstand x vom Kopf ein linearer Maßstab (Abszisse) und für die Differenz der Lufttemperaturen am Ort x und in großem Abstand vom Kopf (22°C) ein logarithmischer Maßstab (Ordinate) verwendet. Eingetragen sind die Meßwerte (Punkte) für den Fall der Eigenkonvektion (oberste Kurve), sowie für drei Luftgeschwindigkeiten mit unterschiedlichem Mittelwert und unterschiedlicher Turbulenz. Festzustellen ist, daß sich die Meßpunkte gut durch Geraden verbinden lassen, und somit die o. g. Vermutung bestätigt wird.

Der Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur $\vartheta(x)$ und dem Abstand x von dem beheizten Körper (Kopf) mit dessen Oberflächentemperatur ϑ_0 (hier 34°C) läßt sich dann mit folgender Gleichung beschreiben:

$$\vartheta(x) = (\vartheta_0 - \vartheta_\infty)e^{-\frac{x}{d}} + \vartheta_\infty, \quad (1)$$

wobei ϑ_∞ die Lufttemperatur in großem Abstand vom beheizten Körper (hier 22°C) darstellt und d die Temperaturgrenschichtdicke. Hierunter ist derjenige Abstand vom beheizten Körper zu verstehen, bei dem die Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Raumluft auf den e-ten Teil (Eulerzahl) abgeklungen ist:

$$\begin{aligned} \vartheta_{(x=d)} &= (\vartheta_0 - \vartheta_\infty)/e + \vartheta_\infty = (34^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C})/2.72 + 22^\circ\text{C} \\ &= 26,4^\circ\text{C} \end{aligned}$$

im vorliegenden Fall.

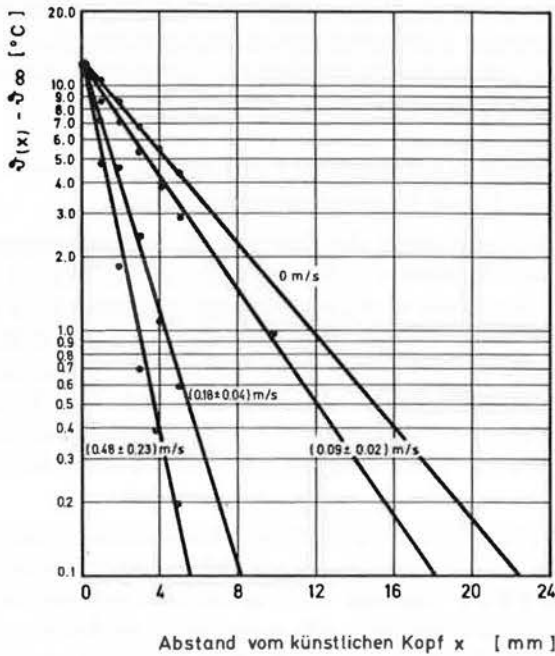


Bild 10. Lufttemperatur $\theta(x)$ im Abstand vom künstlichen Kopf mit 34°C , abzüglich der Lufttemperatur θ_∞ im großen Abstand (22°C).

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß am Ort $x = 0 \text{ mm}$ keine Luftbewegung herrscht, also die nichtstrahlungsbedingte Wärmeabgabe (Wärmestromdichte q) ausschließlich durch Wärmeleitung der Luft (mit der Wärmeleitfähigkeit λ_{Luft}) erfolgt:

$$q = \lambda_{\text{Luft}} \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0} \quad (2)$$

sowie mit der bekannten Gleichung für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K :

$$q = \alpha_K (\theta_0 - \theta_\infty) \quad (3)$$

erhält man durch Gleichsetzen von (2) und (3) und unter Verwendung von (1):

$$\alpha_K = \frac{\lambda_{\text{Luft}}}{d} \quad (4)$$

Demnach läßt sich der konvektive Wärmeübergangskoeffizient auf einfache Weise aus dem mit den LDI zu bestimmenden Temperaturprofil bzw. der Temperaturgrenschichtdicke errechnen.

3.2 Zusammenhang zwischen Luftbewegung und konvektivem Wärmeübergangskoeffizienten

Ziel der Untersuchungen war es, den Zusammenhang zwischen Turbulenzgrad und Mittelwert* einer Luftgeschwindigkeit und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K zu finden.

* Strenggenommen müßte man zwischen arithmetischem Mittelwert und dem 50% Wert der Summenhäufigkeit einer schwankenden Luftgeschwindigkeit unterscheiden. Da aber bei den vorliegenden Messungen hierfür stets praktisch eine Gaußsche Normalverteilung vorlag, sind beide Werte identisch und werden im folgenden gleichgesetzt.

Zu diesem Zweck wurden im Klimastraum verschiedene Kombinationen von Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit erzeugt, und mit dem Laser-Differential-Interferometer die hierbei vor dem beheizten künstlichen Kopf auftretenden α_K -Werte ermittelt. Die Ergebnisse der Strömungsmessungen sind in Bild 11 in der gleichen Art wie in Bild 1 durch Punkte gekennzeichnet. Von Bild 1 übernommen wurde auch die Kurve mit dem konstanten Produkt aus Turbulenzgrad Tu und mittlerer Luftgeschwindigkeit $v_{50\%}$: $Tu \cdot v_{50\%} = 0,06 \text{ m/s}$, unterhalb derer die o.g. Kombinationen als thermisch behaglich empfunden worden waren.

Neben die Punkte wurden die α_K -Werte in $\text{W/m}^2\text{K}$ geschrieben. Hierbei ist zu erkennen, daß diese, beginnend bei ca. $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Eigenkonvektion, erwartungsgemäß mit zunehmender mittlerer Luftgeschwindigkeit ansteigen. Ebenso ist auch ein Anstieg mit zunehmendem Turbulenzgrad festzustellen. Weiterhin fällt auf, daß alle Meßpunkte

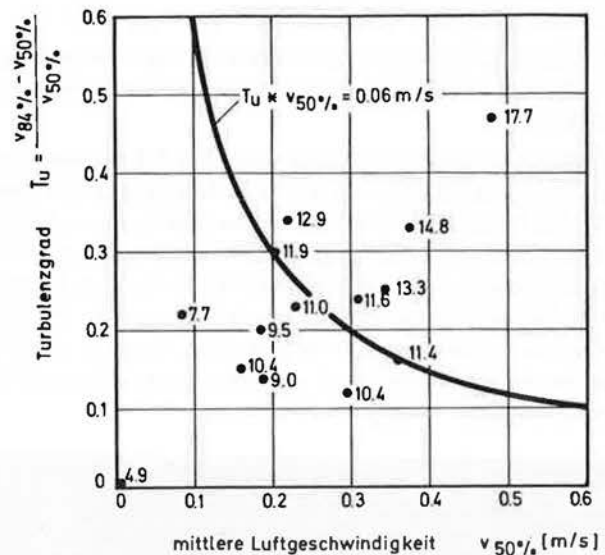


Bild 11. Meßwerte des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in $\text{W/m}^2\text{K}$ (neben den Punkten) bei unterschiedlichen mittleren Luftgeschwindigkeiten $v_{50\%}$ und Turbulenzgraden Tu . Kombination von $v_{50\%}$ und Tu , deren Produkt $0,06 \text{ m/s}$ beträgt, sind als Kurve gekennzeichnet.

in Nähe der eingezeichneten Kurve etwa gleiche Werte, zwischen $11 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $12 \text{ W/m}^2\text{K}$, im Mittel $11,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, besitzen; d. h., daß offenbar ein Zusammenhang zwischen dem Produkt $Tu \cdot v_{50\%}$ und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten besteht. Zur Überprüfung, ob dieser Zusammenhang auch für die anderen α_K -Werte gilt, wurde in Bild 12 die Diagonale von links unten nach rechts oben in gleich große Abschnitte unterteilt und Kurven mit konstanten Produkten $Tu \cdot v_{50\%}$ eingezeichnet, deren Werte auf der Skala am rechten Bildrand angegeben sind. Ordnet man diesen Kurven α_K -Werte entsprechend der Skala am oberen Bildrand zu, so ist festzustellen, daß die neben den Meßpunkten eingetragenen α_K -Werte verhältnismäßig gut in dieses „Kurvenraster“ passen. Der somit in Bild 12 gefundene Zusammenhang zwischen $Tu \cdot v_{50\%}$ und α_K wird in der Darstellung nach Bild 13 noch deutlicher. Aufgetragen

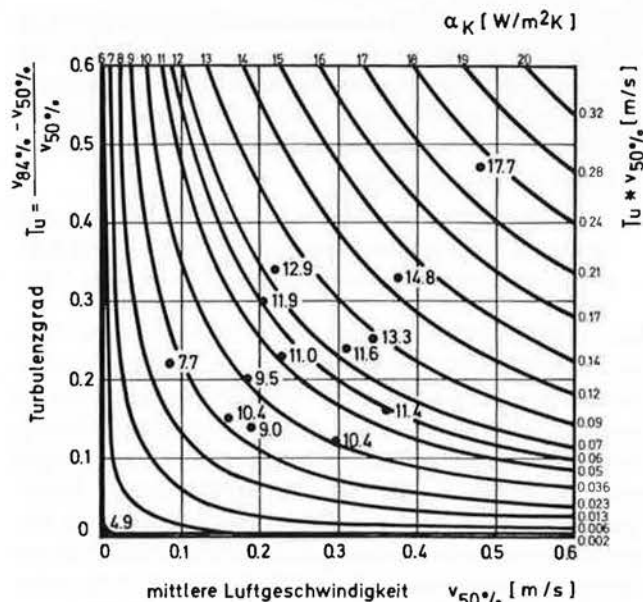


Bild 12. Meßwerte des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K in W/m^2K (neben den Punkten) bei unterschiedlichen mittleren Luftgeschwindigkeiten $v_{50\%}$ und Turbulenzgraden Tu . Sowie Kurven mit konstantem Produkt $Tu \cdot v_{50\%}$ (Skala am rechten Bildrand). Aufgrund der eingetragenen α_K -Meßwerte wurden diesen Kurven α_K -Werte zugeordnet (Skala am oberen Bildrand).

sind in Abhängigkeit von dem Produkt $Tu \cdot v_{50\%}$, das mit

$$Tu \cdot v_{50\%} = \frac{v_{84\%} - v_{50\%}}{v_{50\%}} \cdot v_{50\%} = v_{84\%} - v_{50\%} \quad (5)$$

praktisch die Standardabweichung s der Luftgeschwindigkeitsschwankungen beinhaltet, die Meßwerte für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K (Punkte). Bei Zuordnung der beiden Skalen am rechten und oberen Bildrand von *Bild 12* wird der mathematische Zusammenhang

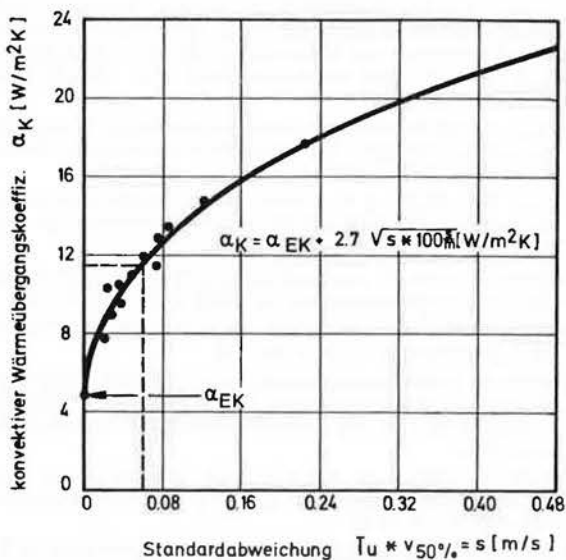


Bild 13. Gemessener Zusammenhang zwischen konvektivem Wärmeübergangskoeffizient α_K und dem Produkt aus Turbulenzgrad Tu und mittlerer Luftgeschwindigkeit $v_{50\%}$, d.h. der Standardabweichung s der Luftbewegung (Punkte). Sowie rechnerischer Zusammenhang zwischen α_K und s , ermittelt anhand der in *Bild 12* dargestellten Skala für α_K und s (durchgezogene Kurve), mit der Eigenkonvektion α_{EK} .

zwischen s und α_K erkennbar. Dieser lautet

$$\alpha_K = \alpha_{EK} + 2.7 \sqrt{s \cdot 100} \frac{s}{m} W/m^2K, \quad (6)$$

wobei α_{EK} die Eigenkonvektion bedeutet, und die Standardabweichung in m/s einzusetzen ist. Demnach steht die konvektive Entwärmung eines beheizten Körpers mit der Schwankungsbreite bzw. Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit in einem parabolischen Zusammenhang. Diese Feststellung gilt zunächst nur für die vorgelegenen Randbedingungen: Entwärmung der Stirn eines beheizten Kopfes, bei Anströmung von vorne.

Nach Gl. (6) liegt die minimale konvektive Wärmeabgabe, die z. B. bei unbewegter Luft gegeben ist, in Höhe der Eigenkonvektion. Aber auch bei strömender Luft, ohne Turbulenz ($s = 0$ m/s) würde demnach die Eigenkonvektion

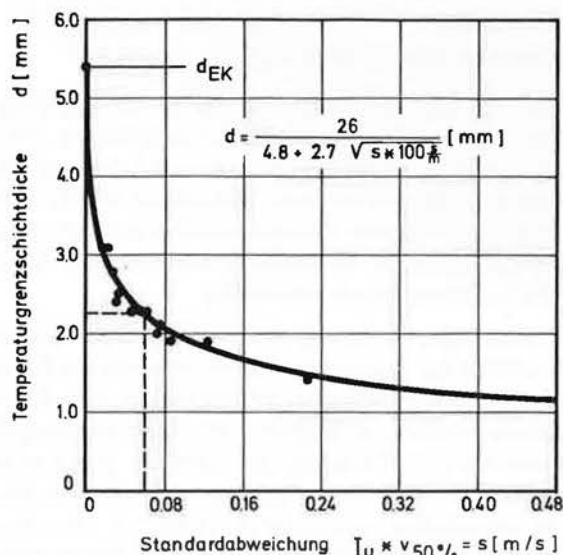


Bild 14. Gemessener Zusammenhang zwischen Temperaturgrenzschichtdicke d vor dem beheizten künstlichen Kopf und dem Produkt aus Turbulenzgrad Tu und mittlerer Luftgeschwindigkeit $v_{50\%}$, d.h. der Standardabweichung s der Luftbewegung (Punkte). Sowie rechnerischer Zusammenhang zwischen d und s , ermittelt nach der in *Bild 13* angegebenen Beziehung sowie der Gleichung $\alpha_K = \lambda/d$, mit der Wärmeleitfähigkeit der Luft λ (durchgezogene Kurve). d_{EK} ist die bei Eigenkonvektion gemessene Temperaturgrenzschichtdicke.

nicht überschritten. Eine Erklärung hierfür ist die Wirkung der erwärmten Luftschicht an der Körperoberfläche, die in diesem Fall durch die (in der Praxis kaum gegebene) turbulenzfreie Luftbewegung nicht gestört würde; d.h. die Grenzschichtdicke dieser Luftströmung läge noch außerhalb der Temperaturgrenzschichtdicke (nach Abschn. 3.1.) der durch den Körper erwärmten Luft. Für den Kurvenabschnitt bis zu dem mit gestrichelten Linien gekennzeichneten Punkt treten nach *Bild 1* bzw. *Bild 12* noch keine Zugscheinungen auf ($s = 0,06$ m/s , $\alpha_K = 11,5$ W/m^2K , bei ca. $22^\circ C$).

Den Einfluß der Standardabweichung einer Luftbewegung auf die Temperaturgrenzschichtdicke vermittelt *Bild 14*. Aufgetragen sind die mit dem Laser-Differential-Interferometer ermittelten Werte der Temperaturgrenzschichtdicke in Abhängigkeit von der Standardabweichung (Punkte).

Der rechnerische Zusammenhang

$$d = \frac{26}{4,8 + 2,7 \sqrt{s \cdot 100 \frac{s}{m}}} \text{ mm} \quad (7)$$

ergibt sich aus den Gl. (6) und (4).

Beginnend mit der höchsten Grenzschichtdicke für Eigenkonvektion (5,4 mm) fällt die Kurve zu Beginn verhältnismäßig steil ab. D.h. bereits kleinste Schwankungen der Luftgeschwindigkeiten bewirken eine Beeinflussung der Eigenkonvektion. Etwa ab dem durch die gestrichelten Linien gekennzeichneten Punkt mit der Standardabweichung s von 0,06 m/s, die nach *Bild 1* als noch thermisch behaglich eingestuft wurde (bei ca. 22 °C), beeinflussen größere s -Werte die Temperaturgrenzschichtdicke in geringerem Maß.

4. Zusammenfassung und Deutung der Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die Ermittlung der physikalischen Ursachen für Zegerscheinungen. Nachdem für thermische Unbehaglichkeit, und damit auch für das Zugempfinden, die Höhe der Abkühlung des durch den Stoffwechsel erwärmten Körpers entscheidend ist, waren hierfür Messungen der konvektiven Wärmeabgabe bei gegebenen Luftbewegungen notwendig.

Diese Messungen wurden im Klimastraum des Instituts für Bauphysik bei Variation des Mittelwerts und der Turbulenz der Luftgeschwindigkeit und sonst konstanten Raumklimakomponenten (Lufttemperatur, Umschließungsflächentemperatur, Luftfeuchte) durchgeführt. Zur Analyse der Strömungsverhältnisse wurde ein im Institut für Bauphysik entwickeltes Anemometer eingesetzt, das durch Richtungsunabhängigkeit, hohes Auflösungsvermögen und große Flinkheit gekennzeichnet ist.

Die Untersuchungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wurden an der Stirn eines beheizten künstlichen Kopfes bei Anströmung von vorne durchgeführt. Hierzu wurde ein Laser-Differential-Interferometer aufgebaut, das es gestattet, praktisch verzögerungsfrei und ohne Beeinflussung der Strömungsverhältnisse Temperaturprofile der Luft in Nähe des beheizten Körpers aufzunehmen. Aus den Temperaturprofilen sind die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten durch einfache Berechnung zu ermitteln.

Aufgrund der durchgeführten Messungen sind die folgenden Feststellungen zu treffen.

1. Der konvektive Wärmeübergang nimmt mit dem Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit, gleichzusetzen mit der Standardabweichung der Luftgeschwindigkeitsschwankungen, zu; und zwar
2. beginnend mit der Eigenkonvektion steigt der konvektive Wärmeübergangskoeffizient parabolisch mit zunehmender Standardabweichung an.

3. Entscheidend für den konvektiven Wärmeentzug ist die mehr oder weniger starke Störung der körpernahen, aufgrund von Eigenkonvektion aufsteigenden erwärmten Luft, durch das Pulsieren (Schwanken) von Luftbewegungen, durch äußere Einflüsse (z. B. Lufteinführung durch die Klimaanlage).

4. Der Betrag des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_k ist umgekehrt proportional zur Temperaturgrenzschichtdicke dieser vom Körper erwärmten Luft.

Die vorgestellten Ergebnisse sind das Resultat erster Messungen der beschriebenen Art. Für eine genauere, umfassendere Aussage der Wirkung von Luftbewegungen auf die konvektive Entwärmung und damit die thermische Behaglichkeit des Menschen sind weitere gleichartige Messungen nötig. Hierbei wären über das bisherige Maß hinaus Turbulenz und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit, sowie Anströmrichtung und Geometrie des beheizten Körpers zu variieren, und nicht zuletzt der Einfluß der hier noch unberücksichtigt gebliebenen Frequenzen der Luftbewegungen auf den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten zu überprüfen.

Literatur

- [1] *Fanger, P. O.*: Calculation of Thermal Comfort: Introduction of a Basic Comfort Equation. Reprint ASHRAE Transactions, Vol. 73, Part II, 1967.
- [2] DIN 1946, Blatt 2, Lüftungstechnische Anlagen, Januar 1983.
- [3] *Finkelstein, W.; Fitzner, K.; Moog, W.*: Messungen von Raumluftgeschwindigkeiten in der Klimatechnik. IILH 24 (1973), Nr. 2 Februar.
- [4] *Recknagel-Sprenger*: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 62. Ausgabe 1983.
- [5] *Pedersen, J. K.*: Abschlußbericht des Forschungsvorhabens „Untersuchungen über die klimatologische Behaglichkeit, Einfluß der Luftbewegungen im klimatisierten Raum auf die Behaglichkeit“, an der Technischen Universität von Dänemark, Bericht der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e. V., Frankfurt/Main, 3/1/27/78, April 1978.
- [6] *Mayer, E.*: Die thermischen Bestimmungselemente des Schutzraumklimas und ihre Wertigkeit, Teil 1: konvektive Wärmeabgabe, Bericht B Ho 10/78 an BMBau, Oktober 1978.
- [7] *Clark, R. P.; Mullan, B. H.*: Convective body cooling in air-conditioned buildings, Proceedings of the Physiological Society, 15. Januar 1977, Journal of Physiology, 267, 9–11 P.
- [8] *Aschoff, J.; Wever, R.*: Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen. Die Naturwissenschaften, 45 (1958), Heft 20, S. 477–485.
- [9] *Moog, W.*: Ähnlichkeitstheoretische Überlegungen bei Raumströmungen, Klima-Ingenieur 11/78, S. 267–270.
- [10] *Mayer, E.*: Entwicklung eines richtungsunabhängigen Anemometers für geringe Luftgeschwindigkeiten, Bericht B Ho 3/81 an Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e. V., Frankfurt/Main, April 1981.
- [11] *Gertis, K.; Schwarz, B.; Künzel, G.*: Zur Messung kleiner Luftgeschwindigkeiten mit beheizten Sonden, Archiv für technisches Messen (1970) Nr. 411, S. 79–84.
- [12] Bericht zur Überprüfung der IBP-Sonde im Laboratorium der Fa. Trox, Neukirchen-Vluyn, noch nicht veröffentlicht, 1983.
- [13] *Mayer, E.*: Entwicklung eines Meßgeräts zur getrennten und integrierten Erfassung der physikalischen Raumklimakomponenten. Dissertation 1983 an der Technischen Universität München.