

Untersuchung der physikalischen Ursachen von Zugluft

Erhard Mayer und Rudolf Schwab

1. Aufgabenstellung

In vielen Fällen ist die Klimatisierung von Arbeitsplätzen notwendig. Zur Zeit arbeiten in der Bundesrepublik Deutschland ca. 2,5 Millionen Menschen in klimatisierten Gebäuden. Folgende Gründe lassen eine steigende Tendenz erwarten: notwendige Verbesserung der Luftqualität, Energieeinsparung (Heizung mit Wärmerückgewinnung), Bedarf an Reinluftäumen (Mikrochipherstellung, Biotechnologie). Andererseits wird in klimatisierten Räumen öfter über das Raumklima geklagt als in nicht-klimatisierten Räumen. Die wohl am häufigsten genannten Beschwerden stehen dabei im Zusammenhang mit Zugluft [1]. Dies ist eines der Ergebnisse einer zu Beginn des Vorhabens vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) durchgeführten Analyse, die den Stand des Wissens hinsichtlich der gesundheitsgefährdenden Wirkung der Raumklimatisierung wiedergibt sowie notwendige epidemiologische, medizinische und technische Untersuchungen aufzeigt [2]. Hierzu gehören wesentlich physikalische und psychophysische Untersuchungen der Ursachen für das Empfinden von Zugluft. Diese sind Inhalt des vorliegenden Berichts. Auszüge hiervon sind bereits in [3] bis [9] veröffentlicht worden. Die Ergebnisse von Untersuchungen an der Technischen Universität Dänemark, die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführt wurden, sind in [10] zusammengestellt.

Bekannt ist, daß Zugluftprobleme durch eine zu hohe konvektive Abkühlung von Körperoberflächen verursacht werden [11]. Der entsprechende formelmäßige Zusammenhang lautet:

$$q_K = \alpha_K (\vartheta_0 - \vartheta_L),$$

oder aufgelöst nach ϑ_0

$$\vartheta_0 = \vartheta_L + q_K / \alpha_K$$

mit

- q_K : Dichte des konvektiven Wärmestroms
- α_K : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
- ϑ_0 : 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 konvektiver Wärmeübergangskoeffizienten durch erhöhte Luftbewegung. Nun ist

Dr. Erhard Mayer und Rudolf Schwab, Fraunhofer-Institut für Bauphysik.

bekannt, daß das unbehagliche Kaltempfinden, d. h. hier das Zugluftempfinden, über die Hauttemperatur erfolgt [12]. Die Quantifizierung des Zusammenhangs von Luftbewegung (mittlere Luftgeschwindigkeit und Turbulenz), Hauttemperatur, konvektivem Wärmeübergangskoeffizienten und deren Wirkung auf das Zugempfinden ist Aufgabe dieses Vorhabens.

2. Durchführung der Untersuchungen

2.1 Einstellung von Luftgeschwindigkeit, Turbulenzgrad und Anströmrichtung sowie der Randbedingungen

Die physikalischen und psychophysischen Untersuchungen zur Zugluftbewertung wurden im Klimatestrahl des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik durchgeführt. Zur Erzeugung einer Strömung geringer Turbulenz und den vier Hauptanströmrichtungen von oben nach unten, von unten nach oben sowie horizontal wurde die Luft über Laminarisierung nach dem Verdrängungsprinzip mit den entsprechenden Richtungen in den Raum geblasen. Bei Luftgeschwindigkeiten zwischen 0,1 m/s und 0,5 m/s wurde ein Turbulenzgrad (Verhältnis von Schwankungsbreite der Luftgeschwindigkeit zu deren Mittelwert) von unter 5% erreicht. Für horizontale Strömung wurden auch höhere Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade

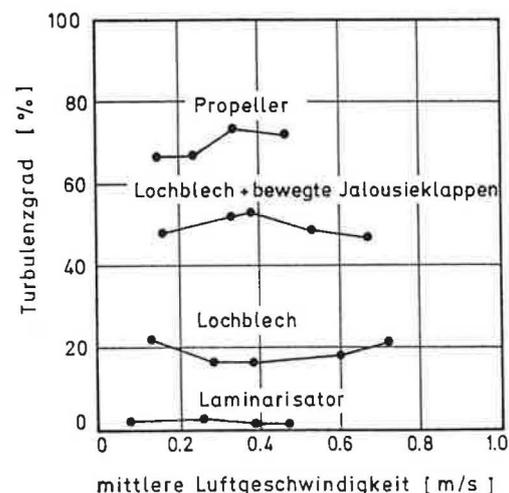


Bild 1. Typische Luftbewegungen, die im Klimatestrahl bei horizontaler Hauptströmung erzeugt wurden, ausgedrückt durch mittlere Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad. Dies geschah bei ca. 5% Turbulenzgrad durch Verdrängungslüftung über einen Laminarisorator, bei ca. 20% über ein Lochblech, bei ca. 50% über ein Lochblech und motorisch bewegte Jalousieklappen, bei ca. 70% durch einen Propeller mit horizontaler Achse.

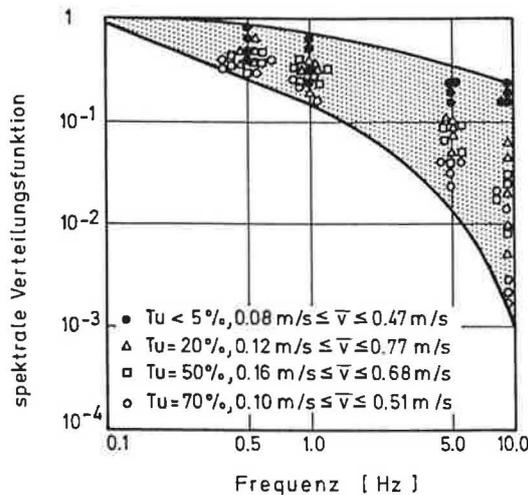


Bild 2. Spektrale Verteilungsfunktionen der im Klimastraum eingestellten Luftbewegungen, mit mittlerer Luftgeschwindigkeit \bar{v} und Turbulenzgrad Tu (normiert auf 1 bei 0,1 Hz).

eingestellt (s. *Bild 1*): ca. 20% Turbulenzgrad mit Hilfe von Lochblenden anstelle der Laminarisatoren, ca. 50% durch motorbetriebene, rotierende Jalousieklappen im Luftstrom und ca. 70% durch einen Propeller mit horizontaler Achse und einem Durchmesser von ca. 1 m. Neben der mittleren Luftgeschwindigkeit, der Anströmrichtung und der Turbulenz ist eine Luftbewegung durch die Geschwindigkeit der zeitlichen Änderungen der Luftgeschwindigkeit bestimmt, d. h. durch deren Frequenz. Die Frequenzanalyse aller eingestellten Luftgeschwindigkeiten ergab eine jeweils gleichartige Verteilungsfunktion ohne hervorgehobene Frequenzanteile, wie aus *Bild 2* hervorgeht. Somit ermöglichte der Klimastraum „frequenzneutrale“ Luftbewegungen, die, wie ein Vergleich mit Messungen in der Praxis in [10] zeigt, als „typisch“ betrachtet werden können. In allen Fällen wurde die Lufttemperatur auf 23°C geregelt und entsprach etwa der Umschließungsflächentemperatur. Die relative Luftfeuchte lag zwischen 20% und 50%.

2.2 Physikalische Messungen

2.2.1 Analyse der Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit wurde mit einem selbstentwickelten Anemometer erfaßt, dessen besondere Kennzeichen Richtungsunabhängigkeit ab ca. 0,05 m/s und eine Zeitkonstante von nur 10 ms sind [13]. Die Auswertung des Meßsignals hinsichtlich mittlerer Luftgeschwindigkeit, Standardabweichung zur Ermittlung des Turbulenzgrades sowie Frequenzanalyse erfolgte mit Hilfe eines Fast Fourier Transformation Analyzers (FFT-Analysator). Dabei betrug die Abfragerate 20 Hz und die jeweilige Meßdauer 3–5 Minuten. Gemessen wurde die Luftbewegung stets im ungestörten Zustand, d. h. ohne künstlichen Kopf bzw. ohne Versuchsperson.

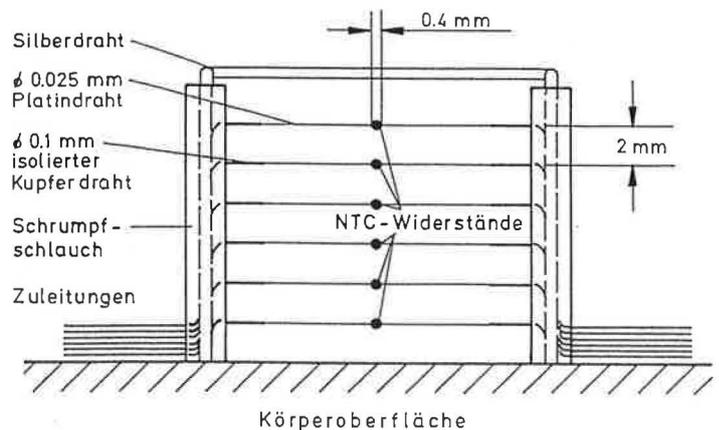


Bild 3. Aufbau der NTC-Leiter.

2.2.2 Messung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten

Ergänzend zu den im nächsten Abschnitt beschriebenen psychophysischen Messungen sollten physikalische Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an einem beheizten künstlichen Kopf eine physikalische Interpretation der Ergebnisse ermöglichen. Dies geschah mit Hilfe von vier hierfür entwickelten sog. NTC-Leitern (s. *Bild 3*), die an einen beheizbaren künstlichen Kopf angebracht wurden. Sechs NTC-Widerstände mit 0,4 mm Durchmesser sind pro Leiter im Abstand von 2 mm in der Art von Leitersprossen angeordnet. Diese Widerstände bestehen aus Halbleitern, welche ihren Widerstandswert bei sinkender Temperatur im Unterschied zu normalen elektrischen Leitern erhöhen, deshalb Negative Temperatur Coefficient, wobei die hierbei gegebene steile Temperatur-Widerstands-Kurve eine hohe Meßgenauigkeit der Lufttemperatur ermöglicht. Nach vorherigem Kalibrieren erlaubt die Messung der Widerstandswerte die Angabe der jeweiligen Temperaturen, welche aufgrund der dünnen Zuleitungsdrähte (0,025 mm Durchmesser) praktisch den zu messenden Lufttemperaturen gleichgesetzt werden können. Die mit Hilfe von drei Trippelpunktzellen durchgeführte Kalibrierung (Wasser mit 0,01°C, Gallium mit 29,771°C und Rubidium mit 39,450°C) ergibt eine Meßgenauigkeit von $\pm 0,1$ K unter üblichen raumklimatischen Bedingungen. In Verbindung mit einer Datenverarbeitungsanlage wird aus dem von der NTC-Leiter ermittelten Abfall der Lufttemperatur vor dem angeströmten beheizten künstlichen Kopf der konvektive Wärmeübergangskoeffizient errechnet. Dabei wird die in [11] hergeleitete Formel benutzt:

$$\alpha_K = \lambda/d$$

mit

- α_K : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
- λ : Wärmeleitkoeffizient der Luft (0,026 W/m² K)
- d: Temperaturgrenzschichtdicke, definiert als derjenige Abstand vom beheizten Kopf, bei dem die Differenz der Temperatur von Kopf ϑ_K und Luft ϑ_L auf $(\vartheta_K - \vartheta_L)/e$ abgesunken ist, (z. B. $\vartheta_K = 34^\circ\text{C}$, $\vartheta_L = 22^\circ\text{C}$, $d = 12 \text{ K}/2,7 = 4,4 \text{ K}$).

Die Abfragerate für die Lufttemperaturmessungen betrug 4 Hz pro NTC bei einer Meßzeit von 70 Sekunden. Die Meßgenauigkeit der x_k -Messung war ca. $\pm 10\%$.

Die Anordnung der NTC-Leitern auf der Stirn, dem Scheitel und an der Schläfe des beheizten künstlichen Kopfes ist *Bild 4* zu entnehmen. Eine weitere Leiter ist am Nacken montiert. Die Leitern sind schräg an dem Kopf befestigt, um die einzelnen Temperaturfühler möglichst innerhalb der nur wenige Millimeter dicken Temperaturgrenzschicht zu installieren. Zur Gewährleistung einer möglichst homogenen Oberflächentemperatur ist der Kopf aus vollem Aluminium hergestellt worden. Hinter der an der Stirn erkennbaren Scheibe befindet sich eine Heizplatte mit gleichem Durchmesser. Mit Hilfe eines elektronischen Reglers und einem Temperaturmeßfühler auf der Stirnscheibe wird deren Temperatur elektrisch auf 34°C konstant geregelt. Der Kopf war während der Messungen in ca. 130 cm Höhe auf einem Stativ befestigt (Kopfhöhe beim Sitzen).

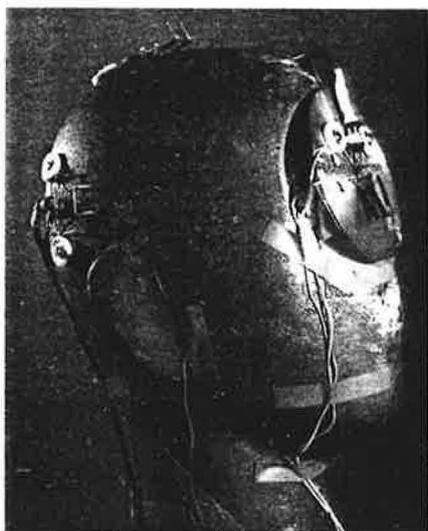


Bild 4. Künstlicher Kopf mit NTC-Leitern auf Stirn, Scheitel und Schläfe.

2.3 Psychophysische Messungen

Psychophysische Messungen wurden durchgeführt, um die von Versuchspersonen wahrgenommenen Wirkungen von Luftbewegungen den physikalischen Messungen zuzuordnen (Zugluftbewertung) sowie um die Bedeutung der Hauttemperatur für Zugluftwahrnehmung zu analysieren („Kaltschwellen“-Ermittlung).

2.3.1 Zugluftbewertung

Im Sinne der Vergleichbarkeit der Meßergebnisse wurden die psychophysischen Untersuchungen zur Zugluftbewertung möglichst an jene angepaßt, wie sie in [10] beschrieben sind. Fünfzig gesunde freiwillige Versuchspersonen wurden den vier Hauptanströmrichtungen ausgesetzt. Das Alter der zur Hälfte weiblichen und männlichen Versuchspersonen lag zwischen 18 und 65 Jahren (Mittelwert 30 Jahre). Deren körperliche Aktivität betrug bei sitzender Tätigkeit ca. $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$. Die Bekleidung



Bild 5. Versuchsperson im Klimastraum bei laminarer Anströmung von oben.

bestand aus einem Trainingsanzug, was einem Wärmedurchlaßwiderstand von ca. $0,8 \text{ clo} = 0,12 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ entspricht. Jede Person nahm entsprechend den vier Anströmrichtungen an vier verschiedenen Tagen jeweils zur gleichen Uhrzeit an den Versuchen teil. Nach 30 Minuten Anpassung an das Raumklima, bei ruhender Luft, wurden die Versuchspersonen jeweils 10 Minuten lang nacheinander folgenden Luftgeschwindigkeiten ausgesetzt: $0,2 \text{ m/s}$, $0,1 \text{ m/s}$, $0,2 \text{ m/s}$, $0,3 \text{ m/s}$, $0,4 \text{ m/s}$, $0,45 \text{ m/s}$. Am Ende der zehnmütigen Meßperioden wurden die Personen u. a. nach unbehaglichem Zugluftempfinden am Nacken und im Gesicht befragt. Bild 5 vermittelt einen Blick in den Klimastraum mit einer Versuchsperson bei turbulenzarmer Anströmung von oben, wie an den Rauchfäden zu erkennen ist. Am Ort der Versuchsperson betrug der Turbulenzgrad weniger als 5% (Messung ohne Versuchsperson).

2.3.2 Ermittlung der „Kaltschwelle“

Bei diesen Messungen sollte diejenige Hautoberflächentemperatur ermittelt werden, bei der ein gerade spürbares Kühlempfinden wahrgenommen wird. Hierfür wurden nacheinander fünfzig Versuchspersonen in einem Klimastraum mit unbewegter Luft sinkenden Raumtemperaturen zwischen 30°C und 25°C ausgesetzt. Die Versuchspersonen befanden sich hierbei in Badebekleidung auf einer Liege (s. *Bild 6*). Aufgrund einer vollflächigen innenseitigen Dämmung der Umschließungsflächen (kein Fenster) folgte deren Oberflächentemperatur praktisch verzögerungsfrei der jeweiligen Lufttemperatur. Das Alter der zur Hälfte weiblichen und männlichen Versuchspersonen lag bei dieser Versuchsreihe zwischen 18 und 49 Jahren (Mittelwert 28 Jahre). Nach 30 Minuten konstanter Raumtemperatur von 30°C zur thermischen Anpassung der Versuchsperson wurde die Temperatur um $0,5 \text{ K}$ – $1,0 \text{ K}$ pro Viertelstunde abgesenkt. Dabei wurde die Versuchsperson zu jeder Viertelstunde u. a. nach dem thermi-



Bild 6. Versuchsperson bei der Ermittlung der Temperaturschwelle für Kaltempfindung.

schen Gesamtempfinden und nach dem örtlichen Empfinden am Nacken und 9 weiteren Körperstellen befragt. Diese Befragungen erfolgten mit Hilfe einer siebenstufigen Skala mit den Bewertungsmöglichkeiten: -3 = kalt, -2 = kühl, -1 = leicht kühl, 0 = neutral, 1 = leicht warm, 2 = warm, 3 = heiß. Zur Ermittlung der zugehörigen Hautoberflächentemperaturen wurden an folgenden Körperstellen NTC-Temperaturfühler angebracht: Stirn, linke Schulter, Brust rechts, linker Oberarm, linker Unterarm, linker Handrücken, rechter Oberschenkel, rechtes Schienbein, rechter Fuß (Spann). Die Genauigkeit der Hauttemperaturmessung betrug ca. $\pm 0,2$ K. Registriert wurden die Temperaturwerte in Abständen von 2 Minuten von einer elektronischen Datenerfassungsanlage. Für die Ermittlung der Gesamtoberflächentemperatur wurde unter Einbeziehung aller genannten Körperstellen-Temperaturen eine von Olesen in [14] angegebene Regressionsformel verwendet.

3. Ergebnisse und Erläuterung der Untersuchungen

Im folgenden werden die Ergebnisse der physikalischen und psychophysischen Messungen mit Versuchspersonen vorgestellt.

3.1 Ergebnisse der physikalischen Messungen zur Zugluftbewertung

Ziel dieser Untersuchungen war die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten im Kopfbereich bei Variation von mittlerer Luftgeschwindigkeit, Turbulenzgrad und Anströmrichtung. Der Kopfbereich wurde hierfür ausgewählt, da der unbedeckte Kopf als besonders empfindlicher „Indikator“ für Zugluftprobleme gilt [15].

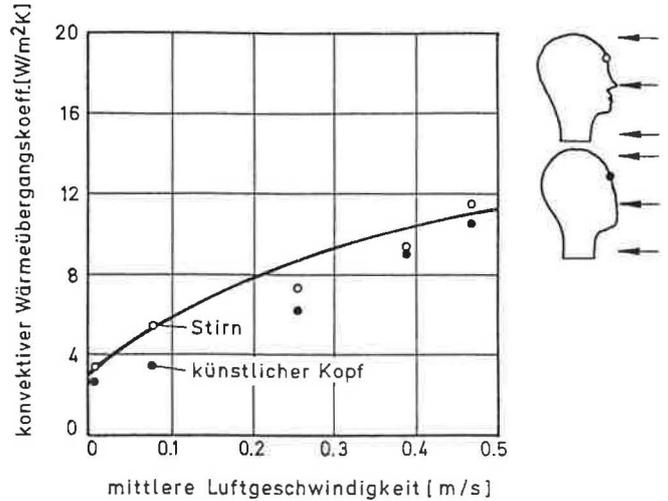


Bild 7. Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten an der Stirn einer Versuchsperson und des künstlichen Kopfes, in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei Anströmung von vorne und einem Turbulenzgrad unter 5%.

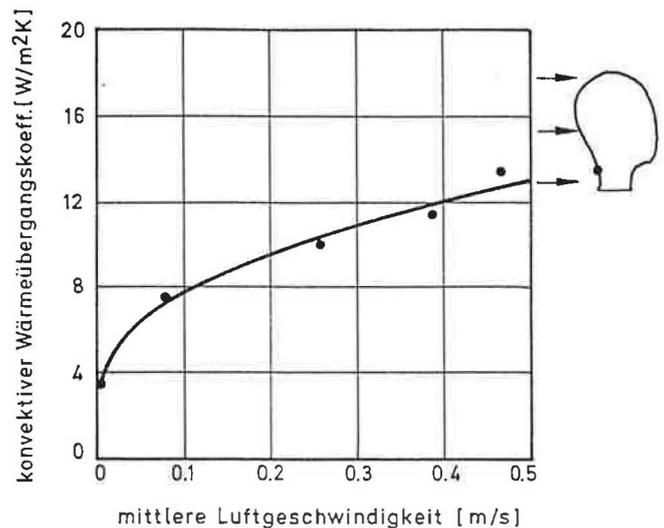


Bild 8. Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient am Nacken des künstlichen Kopfes, in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei Anströmung von hinten und einem Turbulenzgrad unter 5%.

3.1.1 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient bei geringer Turbulenz

Bei horizontaler Luftbewegung und einem geringen Turbulenzgrad von unter 5% wurden Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten im Stirnbereich sowohl des künstlichen Kopfes als auch einer Versuchsperson durchgeführt. Die Ergebnisse für Anströmung von vorne sind in Bild 7 wiedergegeben. Zu erkennen ist die gute Übereinstimmung in beiden Fällen. Aus diesem Grund erfolgten die im weiteren beschriebenen Messungen nur noch am künstlichen Kopf. Nachdem der Nacken als besonders zugempfindlich gilt, wurde α_k auch bei Anströmung von hinten gemessen, wie in Bild 8 dargestellt. In beiden Bildern steigt α_k beginnend bei der Eigenkonvektion von ca. $3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ parabolisch mit der Luftgeschwindigkeit an. Ursache für die vergleichsweise höheren α_k -Werte am Nacken gegenüber der Stirn dürften Geometrieeffekte des Kopfes sein, die auf die Strömungsverhältnisse im Bereich der Grenzschicht wirken.

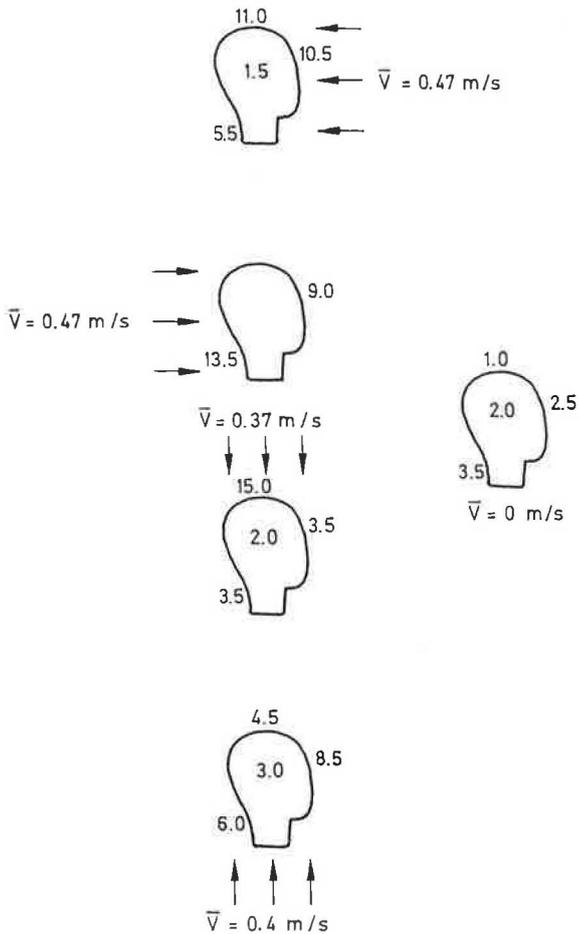


Bild 9. Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten in $W/m^2 K$ an Stirn, Scheitel, Nacken und Schläfe des künstlichen Kopfes bei vier verschiedenen Anströmrichtungen mit maximal erreichbarer mittlerer Luftgeschwindigkeit \bar{v} und einem Turbulenzgrad unter 5% sowie bei ruhender Luft.

Wie sehr sich die α_K -Werte in Abhängigkeit von der Lage am Kopf unterscheiden, geht aus *Bild 9* hervor. Bei ruhender Luft und bei vier verschiedenen Anströmrichtungen mit den im Klimastraum maximal erreichbaren Luftgeschwindigkeiten geringer Turbulenz sind die α_K -Werte angegeben: Für die Stirn, den Scheitel, den Nacken und die rechte Schläfe. Im Fall der Anströmung von hinten war eine Beeinflussung der Meßwerte durch die Zuleitungsdrähte der NTC-Leitern an Scheitel und Schläfe nicht auszuschließen, so daß auf eine α_K -Angabe an diesen Stellen verzichtet wurde (vgl. *Bild 4*). Die großen Unterschiede zwischen den einzelnen α_K -Werten, von 1,5 bis 15,0 $W/m^2 K$ verdeutlichen die starken Einflüsse von Anströmrichtung, Geometrieeffekten sowie die Wirkung des thermischen Auftriebs durch Eigenkonvektion. Letzterer ist vor allem beim Vergleich der Ergebnisse für Abwärts- und Aufwärtsströmung erkennbar. Thermischer Auftrieb bewirkt bei der Abwärtsströmung an der Stirn einen deutlich geringeren α_K -Wert, da die von der Körperwärme erzeugte „Aufwindfahne“ hierbei zum Teil nach unten gedrückt wird und somit die Stirn vergleichsweise weniger stark abkühlt. Von untergeordneter Bedeutung ist dabei der vergleichsweise hohe α_K -Wert am Scheitel, da dessen ungünstige Wirkung durch die Haare und evtl. Kopfbe-

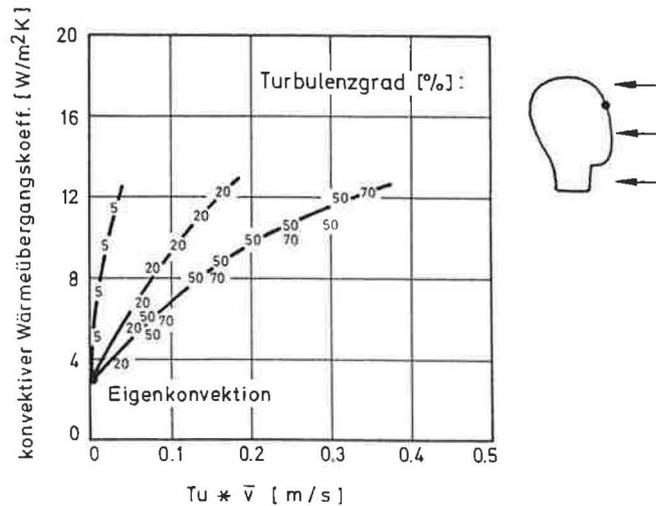


Bild 10. Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten an der Stirn des künstlichen Kopfes in Abhängigkeit vom Produkt aus Turbulenzgrad Tu und mittlerer Luftgeschwindigkeit \bar{v} bei Anströmung von vorne und Turbulenzgraden von ca. 5%, 20%, 50% und 70%.

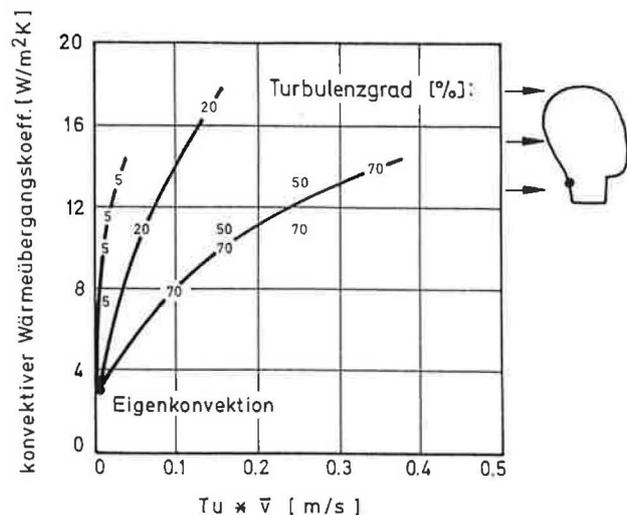


Bild 11. Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten am Nacken des künstlichen Kopfes in Abhängigkeit vom Produkt aus Turbulenzgrad Tu und mittlerer Luftgeschwindigkeit \bar{v} bei Anströmung von hinten und Turbulenzgraden von ca. 5%, 20%, 50% und 70%.

deckung in Reinnräumen verringert wird. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen psychophysischen Messungen.

3.1.2 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient bei mittlerer und hoher Turbulenz

Koeffizienten α_K wurden bei horizontaler Anströmung auch für turbulenzreichere Luftbewegungen gemessen. Die an der Stirn des künstlichen Kopfes bei Anströmung von vorne und Turbulenzgraden von 20%, 50% und 70% gemessenen Werte sind in *Bild 10* und diejenigen am Nacken bei Anströmung von hinten sind in *Bild 11* festgehalten. Zum Vergleich sind die entsprechenden Werte für 5% Turbulenz ebenfalls eingezeichnet. Als unabhängige Veränderliche wurde das Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit gewählt. Zu erkennen ist, daß die α_K -Werte für beide hohen Turbulenzgrade 50%

und 70% eindeutig von diesem Produkt abhängen und somit praktisch von der Standardabweichung der zeitlich schwankenden Luftgeschwindigkeit bestimmt sind. Für turbulenzarme Strömung (5%) und mittlere Turbulenz (20%) trifft dies nicht zu. Die Unterschiede der α_K -Werte in *Bild 10* und *11* sind mit der unterschiedlichen Geometrie der Stirnscheibe und des Nackens des künstlichen Kopfes zu erklären.

3.1.3 Feuchte Wärmeabgabe

Zusätzlich zur trockenen Wärmeabgabe durch Konvektion sollte die Wirkung der feuchten Wärmeabgabe untersucht werden. Zu diesem Zweck arbeitete eine Versuchsperson auf einem Ergometer bis sichtbare Schweißbildung einsetzte. An der feuchten Stirn wurden dann mit der NTC-Leiter Messungen bei horizontaler turbulenzarmer Strömung durchgeführt. Hierbei zeigte sich erwartungsgemäß kein Einfluß der erhöhten Wärmeabgabe durch Verdunstung auf das Temperaturprofil der Luft vor der Stirn, d. h. auf die α_K -Werte.

3.2 Ergebnisse der psychophysischen Messungen

Ziele der psychophysischen Untersuchungen waren die subjektive Zugluftbewertung bei vorgegebener Luftbewegung sowie die Ermittlung der für das Kaltempfinden kritischen Hauttemperatur an Versuchspersonen.

3.2.1 Zugluftbewertung

Im Klimaterraum wurden die psychophysischen Messungen für praktisch turbulenzfreie Strömung ähnlich wie in Reinnräumen mit besonders hohen Reinheitsanforderungen bei Anströmung von vorne, hinten, oben und unten durchgeführt. Die Ergebnisse für horizontale Strömung sind in *Bild 12* festgehalten. Aufgetragen sind die Prozentsätze derjenigen Versuchspersonen, die über Zug-

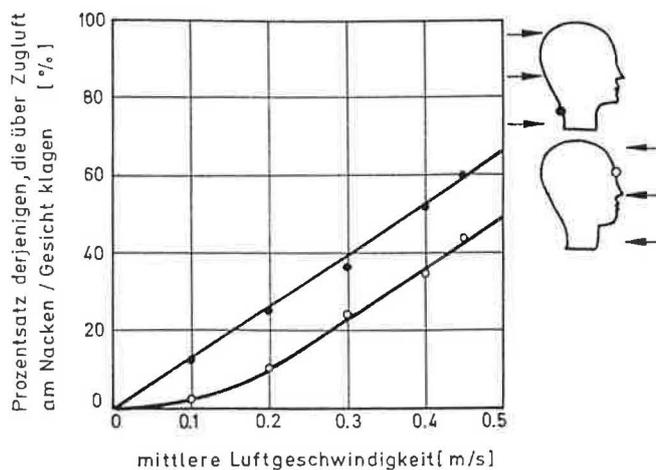


Bild 12. Prozentsatz derjenigen Versuchspersonen, die über Zugluft am Nacken bei Anströmung von hinten und im Gesicht bei Anströmung von vorne klagten, in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, bei einem Turbulenzgrad unter 5% und bei einer Raumtemperatur von 23 °C. Meßwerte für sitzende Versuchspersonen, mit Trainingsanzug bekleidet.

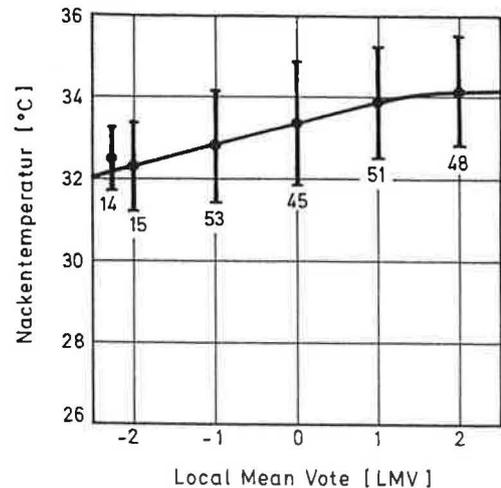


Bild 13. Nackentemperatur bei turbulenzarmer Anströmung von hinten ($T_u < 5\%$); Mittelwerte für 43 Versuchspersonen und Standardabweichungen, in Abhängigkeit von deren auf den Nacken bezogene örtliche Behaglichkeitsbewertung LMV. Die Zahlen geben die jeweilige Häufigkeit bei insgesamt 226 Bewertungen an.

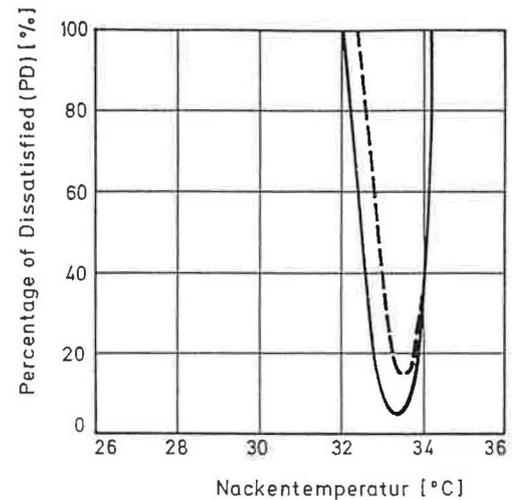


Bild 14. Prozentsatz derjenigen Versuchspersonen, die über Zukühl- und Zuwarmempfinden am Nacken klagten (PD) bei turbulenzarmer Anströmung von hinten ($T_u < 5\%$), in Abhängigkeit von deren Nackentemperatur.

Durchgezogene Kurve aus *Bildern 13* und *23*.
Gestrichelte Kurve aus *Bildern 13* und *24*.

luft am Nacken bei Anströmung von hinten und im Gesicht bei Anströmung von vorne klagten, in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, bei einem Turbulenzgrad unter 5% und bei einer Raumtemperatur von 23 °C. Ab ca. 0,1 m/s steigt mit zunehmender Luftgeschwindigkeit die Zugbelastung linear an; am Nacken bei Anströmung von hinten vergleichsweise stärker. Diese Feststellung steht in Einklang mit den in den *Bildern 7* und *8* wiedergegebenen Messungen. Für den Nacken wurde darüber hinaus der Zusammenhang von Zugluftbewertung und Hauttemperatur untersucht. Die Ergebnisse sind in den *Bildern 13* und *14* dargestellt. *Bild 13* vermittelt den Zusammenhang zwischen der örtlichen Behaglichkeitsbewertung (Local Mean Vote, LMV) am Nacken und der gemessenen Nackentemperatur bei turbulenzarmer Anströmung von hinten. Dabei erfolgte die Behaglichkeitsbewertung nach der international üblichen sie-

benstufigen Bewertung [16] mit den Kriterien: kalt (-3), kühl (-2), leicht kühl (-1), neutral (0), leicht warm (1), warm (2), heiß (3). Ausgewertet wurden hierbei insgesamt 226 Bewertungen und Temperaturmessungen von 43 Versuchspersonen jeweils nach 10 Minuten Meßdauer bei konstanter Luftbewegung. Bild 13 ist zu entnehmen, daß trotz großer Streubreite der Meßergebnisse ein klarer Zusammenhang zwischen der Behaglichkeitsbewertung und der Nackentemperatur besteht. Kleinere LMV-Werte, bedingt durch höhere Luftgeschwindigkeiten, liefern niedrigere Nackentemperaturen entsprechend Bild 13. Mit Hilfe der von Fanger nach [16] in Bild 23 dargestellten Korrelation von Behaglichkeitsbewertung (Predicted Mean Vote, PMV) und der Anzahl derjenigen, die mit der jeweiligen Behaglichkeitsbewertung aufgrund von Zukühl- oder Zuwarmempfinden unzufrieden sind – ausgedrückt in Prozent (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) – ergibt sich Bild 14. Die durchgezogene Kurve vermittelt den Prozentsatz (Percentage of Dissatisfied PD) derjenigen Versuchspersonen, die über Zukühl- oder Zuwarmempfinden bei turbulenzarmer Anströmung von hinten klagten, in Abhängigkeit von deren Nackentemperatur. Dabei sind nach [16] dem Begriff „Zu kühl“ die Behaglichkeitsbewertungen -3 und -2 zugeordnet und dem Begriff „Zu warm“ die Behaglichkeitsbewertungen 2 und 3. Die PD-Werte steigen bei Unterschreiten einer Nackentemperatur von 33,4°C, hier bedingt durch erhöhte Luftbewegung, stark an, und ebenso bei Überschreiten dieser Temperatur, bedingt durch zu geringe Abkühlung.

Über die Ergebnisse der Untersuchungen bei vertikaler Anströmung wurde in bereits erfolgten Teilveröffentlichungen dieser Untersuchung ([7; 8; 9]) berichtet. Wesentliche Resultate hieraus sind im folgenden zusammengestellt. Für den Aufenthalt von Personen mit sitzender Tätigkeit und einer Trainingsanzug-ähnlichen Bekleidung in Reinnräumen mit einem Turbulenzgrad unter 5% sind folgende Feststellungen zu treffen:

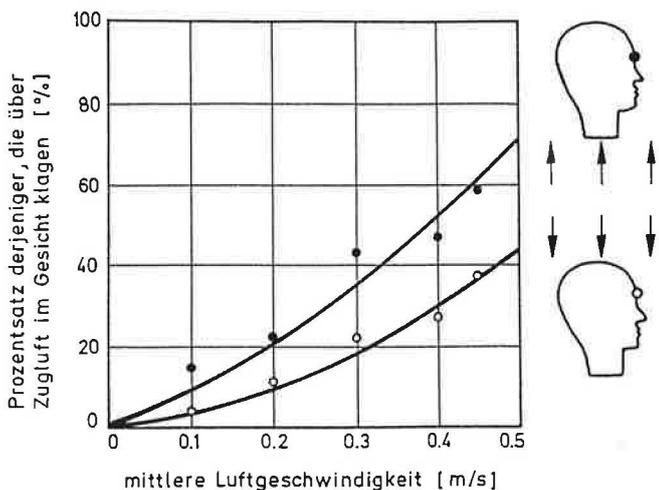


Bild 15. Prozentsatz derjenigen Versuchspersonen, die über Zugluft im Gesicht bei Anströmung von unten und oben klagten, in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, bei einem Turbulenzgrad unter 5% und bei einer Raumtemperatur von 23°C. Meßwerte für sitzende Versuchspersonen, mit Trainingsanzug bekleidet.

1. Die geringste Zugluftbelästigung im Gesichtsbereich tritt bei laminarer Belüftung von oben nach unten auf, in Übereinstimmung mit den Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten.
2. Auch bei dieser Strömungsrichtung, bei 23°C Raumtemperatur, ist ab Luftgeschwindigkeiten von 0,3 m/s mit Klagen über Zugluft in Höhe von 20% zu rechnen, s. Bild 15.
3. Die horizontale Luftströmung ist im Hinblick auf Zugluftbelästigung günstiger zu bewerten als die Strömung von unten nach oben (Vergleich von Bildern 12 und 15).
4. Bei horizontaler Luftführung ist die Anströmung des Gesichts derjenigen des Nackens vorzuziehen (s. Bild 12).

Psychophysische Messungen bei höheren Turbulenzgraden – ebenfalls an 50 sitzenden Versuchspersonen – wurden an der Technischen Hochschule Dänemark bei Fanger durchgeführt. Dabei wurden die Versuchspersonen von hinten angeblasen, bei 23°C Raumtemperatur. In Bild 16 sind die Ergebnisse wiedergegeben. Die diesem Bild entnommenen Zusammenhänge zwischen den Prozentsätzen derjenigen, die eine Luftbewegung im Kopfbereich spüren sowie derjenigen, die über Zugluft klagten,

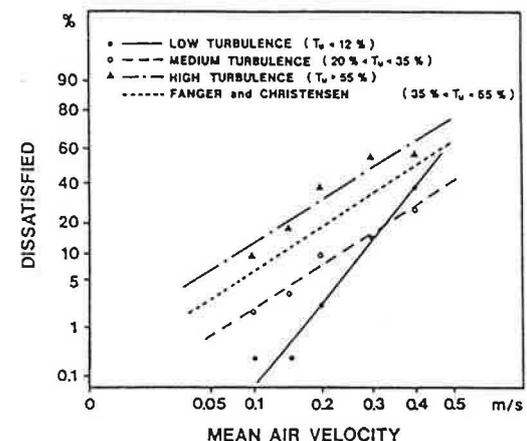
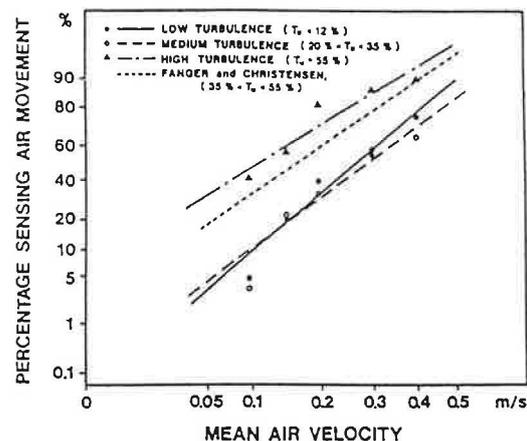


Bild 16. Prozentsatz derjenigen Versuchspersonen, die eine Luftbewegung im Kopfbereich spüren (oben) sowie derjenigen, die über Zugluft im Kopfbereich klagten (unten), in Abhängigkeit von der mittleren Luftgeschwindigkeit, bei unterschiedlichen Turbulenzgraden und einer Raumtemperatur von 23°C. (Originaldarstellungen aus der dänischen Arbeit [10]).

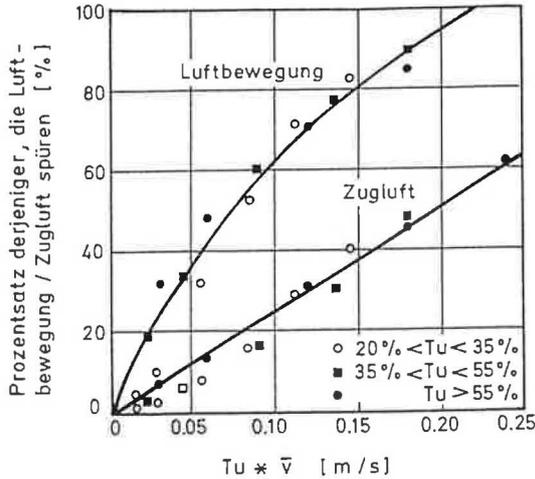


Bild 17. Aus Bild 16 entnommene Zusammenhänge zwischen den Prozentsätzen derjenigen, die eine Luftbewegung im Kopfbereich spüren sowie derjenigen, die über Zugluft klagen, in Abhängigkeit vom Produkt aus Turbulenzgrad Tu und der mittleren Luftgeschwindigkeit \bar{v} , bei Anströmung von hinten und 23°C Raumtemperatur und bei Turbulenzgraden über 20%. Die für unterschiedliche Turbulenzgradbereiche ermittelten Kreise, Vierecke und Punkte wurden aus den Regressionsgeraden in Bild 15, für jeweils gleiche Luftgeschwindigkeiten, berechnet.

sind in Bild 17 in Abhängigkeit vom Produkt aus Turbulenzgrad und der mittleren Luftgeschwindigkeit eingetragen. Diese Ergebnisse bestätigen, daß für Luftbewegungen größerer Turbulenz das Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit für die Zugluftwahrnehmung entscheidend ist, wie in 3.1.2 gezeigt wurde.

3.2.2 Ermittlung der „Kaltschwelle“

Nach Benzinger sind die von Thermorezeptoren an der Hautoberfläche wahrgenommenen Temperaturen für das Kaltempfinden maßgeblich [12]. Demnach setzt Zukühlempfinden bei Unterschreiten einer bestimmten Hauttemperatur ein („Kaltschwelle“). Da Zugluftwahrnehmung, definiert als zu starke lokale Abkühlung [15], somit über die Reaktion der Thermorezeptoren erfolgt, waren zusätzliche Untersuchungen des Zusammenhangs von Behaglichkeitsbewertung und Hauttemperatur ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Hierzu wurden an liegenden Versuchspersonen in Badebekleidung die für das Kaltempfinden kritischen Hauttemperaturen bei unbewegter Luft und langsam abklingender Raumtemperatur gemessen und Befragungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 18 bis 22 eingezeichnet. Berücksichtigt ist dabei ein von Benzinger und in eigenen Arbeiten [18] festgestellter Tagesgang der Kaltschwelle. Bild 18 zeigt zunächst die an 53 Personen gemessenen Hauttemperaturen, in Abhängigkeit von den Raumtemperaturen. Dabei ist ein Abfall der Hauttemperaturen mit der Raumtemperatur zu erkennen, mit einer Staffelung der Temperaturen vom Fuß zur Stirn. Die für die Gesamtoberfläche errechneten Werte (s. Abschnitt 2.3.2) liegen zwischen denjenigen des Oberschenkels und des Nackens. In Bild 19 sind den Gesamtoberflächentemperaturen die jeweiligen Bewertungen des Gesamttempfindens der Versuchspersonen zugeordnet (Mean Vote). Bei

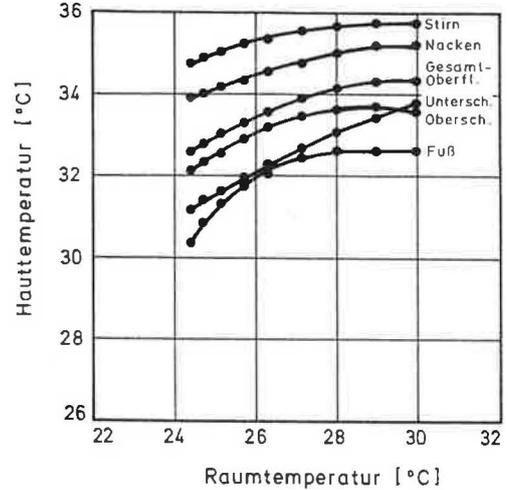


Bild 18. Hauttemperaturen, gemittelt über 53 liegende Versuchspersonen, in Abhängigkeit von den Raumtemperaturen. Dabei betragen die Standardabweichungen für die Hauttemperatur ca. $\pm 0,5\text{ K}$ und für die Raumtemperatur ca. $\pm 0,3\text{ K}$.

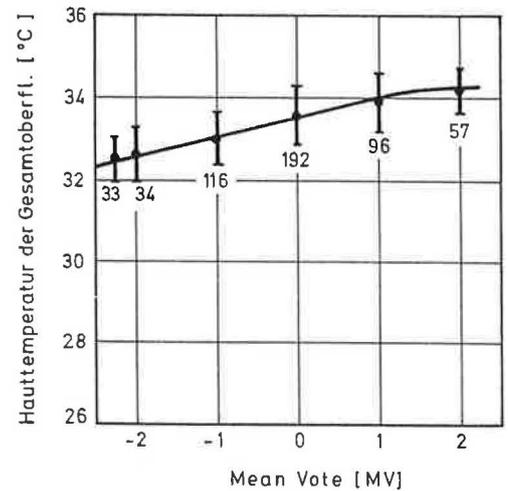


Bild 19. Hauttemperatur der Gesamtoberfläche des Körpers, Mittelwerte für 56 Versuchspersonen und Standardabweichungen, in Abhängigkeit von deren Behaglichkeitsbewertung (MV). Die Zahlen geben die jeweilige Häufigkeit bei insgesamt 528 Bewertungen an.

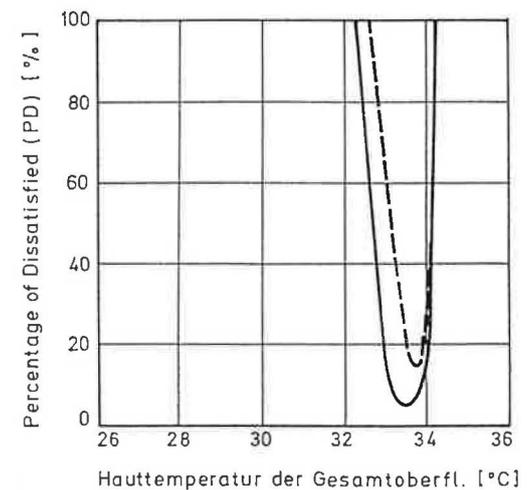


Bild 20. Prozentsatz derjenigen Versuchspersonen, die über Zukühl- und Zuwarnempfinden des gesamten Körpers klagen (PD), in Abhängigkeit von deren Hauttemperatur (Gesamtoberfläche des Körpers).

Durchgezogene Kurve aus Bildern 19 und 23.
Gestrichelte Kurve aus Bildern 19 und 24.

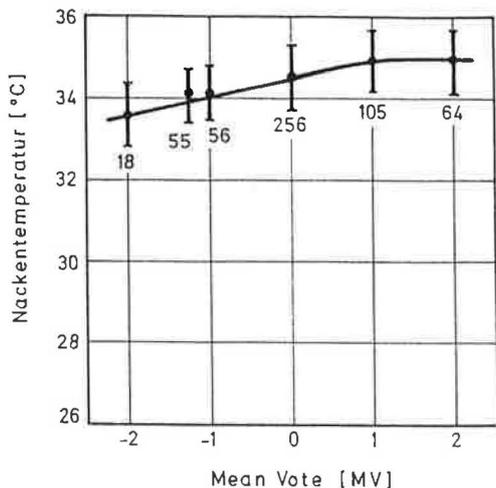


Bild 21. Nackentemperatur, Mittelwerte für 56 Versuchspersonen und Standardabweichungen, in Abhängigkeit von deren thermischer Bewertung (MV). Die Zahlen geben die jeweilige Häufigkeit bei insgesamt 554 Bewertungen an.

der „neutral“-Bewertung (Mean Vote = 0) beträgt die mittlere Hauttemperatur 33,6 °C. Der Änderung der Bewertung von 0 auf 1 (leicht warm) und von 0 auf -1 (leicht kühl) entspricht einer Änderung der Hauttemperatur um ca. ±0,5 K. Wie schon bei der Erläuterung von Bild 13, läßt sich auch hier, mit Hilfe des von Fanger gefundenen Zusammenhangs von Predicted Mean Vote und Predicted Percentage of Dissatisfied (s. Bild 23) aus Bild 19, Bild 20 ermitteln. In Abhängigkeit von der Hauttemperatur ist der Prozentsatz derjenigen Versuchspersonen angegeben, die über Zukühl- und Zuwarmempfinden des gesamten Körpers klagten, also das thermische Empfinden entweder mit -3 (kalt), -2 (kühl) oder 2 (warm), 3 (heiß) bewertet haben. Dem Ergebnis ist zum einen die Bedeutung der Hauttemperatur für das Zukühlempfinden zu entnehmen („Kaltschwelle“ bei 33,6 °C), zum anderen auch für das Zuwarmempfinden. Obwohl letzteres

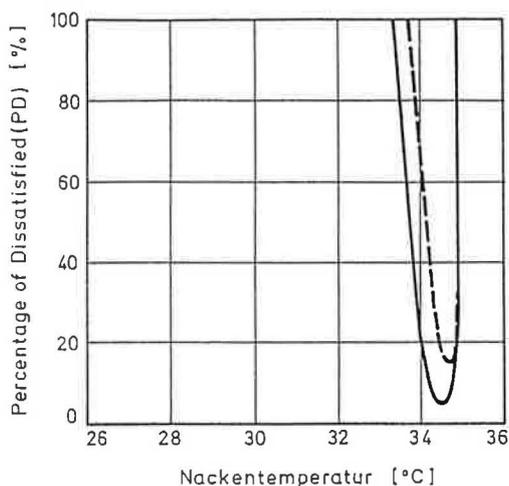


Bild 22. Prozentsatz derjenigen Versuchspersonen, die über Zukühl- und Zuwarmempfinden am Nacken klagten (PD), in Abhängigkeit von deren Nackentemperatur.

Durchgezogene Kurve aus Bildern 21 und 23
Gestrichelte Kurve aus Bildern 21 und 24.

nach Benzinger in erster Linie über die Thermorezeptoren im Stammhirn und nicht über diejenigen an der Hautoberfläche wahrgenommen wird, stellt dies keinen Widerspruch dar. Denn unter den gegebenen stationären Versuchsbedingungen besteht zwischen Hauttemperatur und Kerntemperatur eine enge Korrelation, d. h. auch die für das Zuwarmempfinden entscheidende Kerntemperschwelle dürfte hierbei überschritten sein. Nun wird Zugluft bereits bei lokalem Abkühlen wahrgenommen, und nicht erst bei Abkühlung der gesamten Körperoberfläche. Aus diesem Grund wurden beim Kaltschwellenversuch in ruhender Luft auch die Nackentemperaturen der thermischen Bewertung zugeordnet, s. Bild 21. Gegenüber Bild 13 (Nackentemperaturen bei bewegter Luft) treten dabei geringere Streuungen auf. Offenbar ist bei ruhender Luft und unterschiedlicher Raumtemperatur ein sicheres Urteil zur thermischen Behaglichkeit möglich als bei unterschiedlich bewegter Luft und konstanter Raumtemperatur. In Bild 22 ist in gleicher Weise wie in Bild 14 der in Bild 23 dargestellte Zusammenhang eingearbeitet. Der Vergleich von Bild 22, Messungen nur mit Badebekleidung: Kaltschwelle bei 34,5 °C, und von Bild 14, Messungen mit Trainingsanzug: Kaltschwelle bei 33,4 °C, deutet darauf hin, daß die Kaltschwellentemperatur durch die Bekleidung zu beeinflussen ist.

Schließlich erlauben die Kaltschwellenmessungen eine Ergänzung zu dem von Fanger gefundenen Zusammenhang von Predicted Mean Vote und Predicted Percentage of Dissatisfied (Bild 23). Im Rahmen dieser Messungen wurden die Versuchspersonen zusätzlich zur Bewertung nach der siebenstufigen Mean Vote Skala nach „Zukühlempfinden“, „Zuwarmempfinden“ und nach „Neutral-

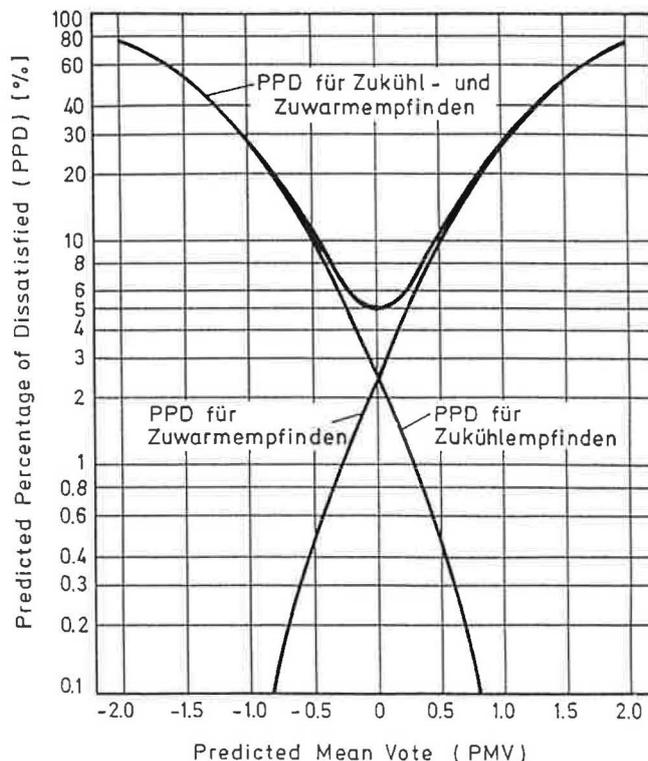


Bild 23. Prozentzahl derjenigen, die über Zukühl- oder Zuwarmempfinden klagten sowie die Summe von beiden (PPD), in Abhängigkeit von der mittleren Behaglichkeitsbewertung (PMV), nach Fanger.

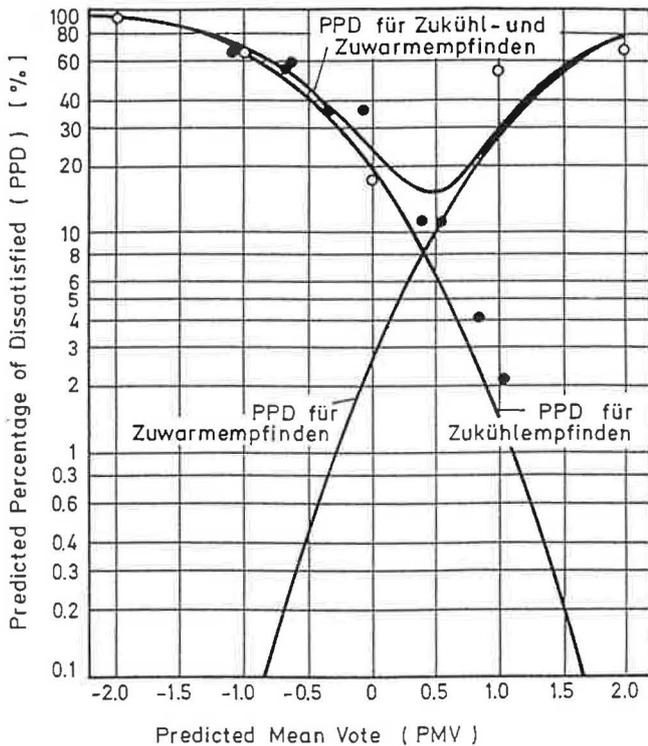


Bild 24. Prozentzahl derjenigen, die über Zukühl- oder Zuwarmempfinden klagen sowie die Summe von beiden (PPD), in Abhängigkeit von der mittleren Behaglichkeitsbewertung (PMV), aufgrund der vorliegenden Messungen. Punkte repräsentieren Zukühlempfinden und Kreise Zukühl- und Zuwarmempfinden.

empfinden“ befragt. Das Ergebnis ist in *Bild 24* eingetragen. Punkte repräsentieren den gefundenen Zusammenhang zwischen den Bewertungen nach der Mean Vote Skala und dem jeweiligen Prozentsatz derjenigen, die unzufrieden waren aufgrund von Zukühlempfinden. Kreise repräsentieren den Zusammenhang zwischen den Mean Vote Werten und dem jeweiligen Prozentsatz derjenigen, die unzufrieden waren aufgrund von Zukühl- und Zuwarmempfinden. Die Kreise liegen etwa auf der Gesamtkurve, die sich durch Addition der Kurven für Zukühlempfinden und für Zuwarmempfinden (von *Bild 23* übernommen) ergibt. Beim Vergleich der *Bilder 23* und *24* ist festzustellen, daß das Minimum der Gesamtkurve in *Bild 23* vergleichsweise nach rechts und oben verschoben ist. Gegenüber mindestens 5% Unzufriedenen (PPD) bei einer Bewertung von 0 (PMV) sind in *Bild 24* mindestens 15% Unzufriedene bei einer Bewertung von 0,5 eingetragen. Zu erklären ist dies damit, daß in *Bild 23* als „Unzufrieden“ jene Versuchspersonen eingestuft wurden, die ihr thermisches Empfinden mit -3, -2, 2 und 3 bewertet haben und in *Bild 24* zusätzlich jene, die mit -1 bewertet haben. Auch bei den in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen psychophysischen Zugluftmessungen wurden Local Mean Vote Bewertungen für den Nacken, bei Anströmung von hinten, und für das Gesicht, bei Anströmung von vorne, durchgeführt. Die Bewertungen wurden zu den Zugluftbewertungen (erstes unangenehmes Wahrnehmen von Zugluft) in Beziehung gesetzt. Dabei stellt sich heraus, daß für die Ermittlung des Prozentsatzes der Zugbelästigten die Local Mean Vote Werte von -1 ebenfalls wie in *Bild 24* mitzuberechnen sind. Diese Fest-

stellung ist eine Bestätigung dafür, daß das unbehagliche Kaltempfinden über die auf Abkühlung reagierenden Thermorezeptoren in der Haut erfolgt; unabhängig davon, ob die Ursache ein Absenken der Umgebungstemperatur ist oder eine Erhöhung der Luftbewegung. Diese Tatsache wird im nächsten Abschnitt bei der Verallgemeinerung der vorgestellten Ergebnisse angewendet. Die in den *Bildern 14, 20* und *22* eingetragenen gestrichelten Kurven wurden unter Verwendung von *Bild 24* anstelle von *Bild 23* ermittelt.

4. Folgerungen für die Praxis

Für die Praxis ergeben sich aus den Untersuchungen Folgerungen, die in zwei Abschnitten vorgestellt werden.

4.1 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient als Bewertungsgröße für Zugluft

Durch Kombination der in den Abschnitten 3.1 und 3.2 beschriebenen physikalischen und psychophysischen Meßergebnisse wird die bereits früher vermutete Bedeutung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten als Bewertungsgröße für Zugluft bestätigt. *Bild 25* faßt die physikalischen Ergebnisse in den *Bildern 7, 8* und *11* und die psychophysischen Ergebnisse in den *Bildern 12* und *17* zusammen. Dargestellt sind die Prozentsätze derjenigen, die über Zugluft klagen, in Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K , bei 23°C Raumtemperatur. Trotz unterschiedlicher Anströmrichtungen, mittlerer Luftgeschwindigkeiten und unterschiedlicher Turbulenzgrade erweist sich α_K für die vorgegebene Raumtemperatur anhand von *Bild 25* als die physikali-

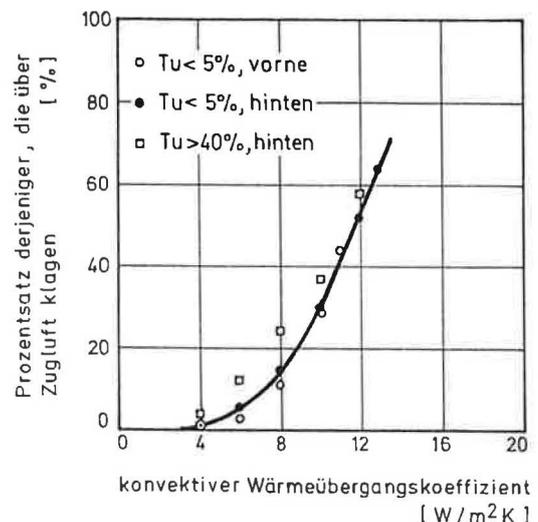


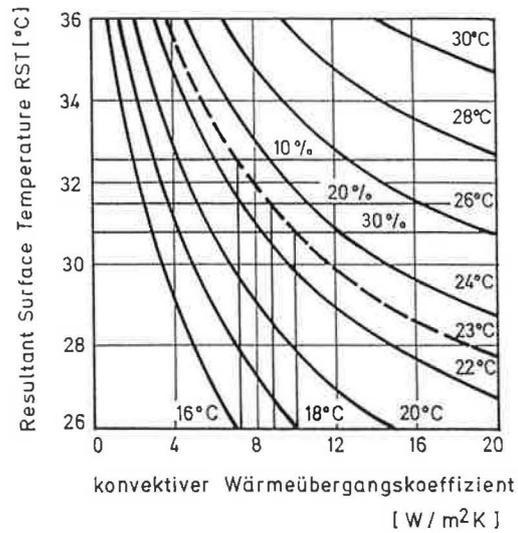
Bild 25. Prozentsätze derjenigen, die über Zugluft klagen, in Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizient an der angeströmten unbedeckten Körperoberfläche (Kopf), bei 23°C Raumtemperatur

- für Anströmung von vorne, bei geringer Turbulenz ($Tu < 5\%$), aus *Bildern 7* und *12*: Kreise
- für Anströmung von hinten, bei geringer Turbulenz ($Tu < 5\%$), aus *Bildern 8* und *12*: Punkte
- für Anströmung von hinten, bei hoher Turbulenz ($Tu > 40\%$), aus *Bildern 11* und *17*: Vierecke.

sche Größe, mit der eine Luftbewegung hinsichtlich der abkühlenden und damit „Zug“ verursachenden Wirkung quantifiziert werden kann. Gewisse Unterschiede zwischen den dänischen [10] und eigenen Meßergebnissen, wie sie in *Bild 25* (Vierecke) zum Ausdruck kommen, können durch unterschiedliche Eigenschaften der verwendeten Geräte zur Analyse der Luftgeschwindigkeit (Ansprechzeit) bedingt sein und sind noch zu überprüfen. Insgesamt ist festzustellen, daß aufgrund der Bedeutung der Hauttemperatur für Zugluftempfinden (s. Abschnitt 3.2.2) sowie der in *Bild 25* zusammengefaßten Ergebnisse künftig andere Anforderungen an die Zugfreiheit zu stellen sind als bisher. Diese Anforderungen müssen sowohl Grenzwerte für die mittlere Luftgeschwindigkeit als auch für das zeitlich dynamische Verhalten der Luftbewegungen, nämlich deren Turbulenzgrad oder Standardabweichung, enthalten. Die für das dynamische Verhalten ebenfalls wichtigen Frequenzen der Luftbewegungen unterscheiden sich in der Praxis meist kaum und brauchen deshalb in der Regel nicht berücksichtigt werden. Als integrale Bewertungs- und Meßgröße ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient anzusehen.

4.2 Anwendung der Meßergebnisse auf unterschiedliche 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. Diese ist in *Bild 26* grafisch dargestellt. In Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K sind die Oberflächentemperaturen RST einer mit 120 W/m² beheizten Fläche aufgetragen, bei jeweils gleichen Lufttemperaturen 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 [19] und ist der konvektiven Wärmeabgabe und der Wärmeabgabe durch Abstrahlung gleichgesetzt. Von *Bild 24* wurden die α_K -Werte entsprechend 10%, 20% und 30% Unzufriedenen aufgrund von Zugluft im Gesicht bei Anströmung von vorne übernommen, also ca. 7 W/m² K, 9 W/m² K und 10 W/m² K. Unter der Voraussetzung, daß gleiches Zugluftempfinden durch jeweils dieselbe Oberflächentemperatur zu beschreiben ist (s. Abschnitt 3.2.2), 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 27* aufgezeichneten Zusammenhang von Raumtemperatur und zulässigem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für die drei genannten Prozentwerte. Um auch Aussagen über zulässige Luftgeschwindigkeiten bei horizontaler Anströmung von vorne und einer Turbulenz unter 5% zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse der *Bilder 7* und *27* kombiniert und in *Bild 28* grafisch dargestellt. Angegeben sind die mittleren Luftgeschwindigkeiten entsprechend 10%, 20% und 30% Unzufriedenen aufgrund von Zugluft im Gesicht in Abhängigkeit von der Raumtemperatur. Hierbei wurde der für



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

Bild 26. Resultierende Oberflächentemperatur RST einer mit 120 W/m² beheizten Fläche in Abhängigkeit vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K sowie von der Raumtemperatur (Lufttemperatur ϑ_L und Umschließungsflächentemperatur ϑ_{UF} gleich), bei ausschließlich trockener Wärmeabgabe. Aus *Bild 25* sind die dort bei 23°C Raumtemperatur angegebenen α_K -Werte entnommen für 10%, 20% und 30% Unzufriedene aufgrund von Zugluft.

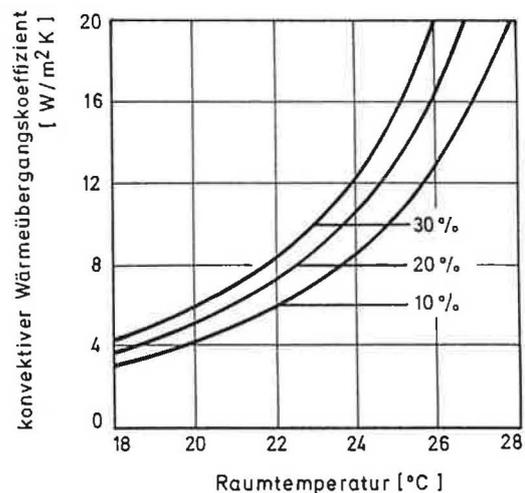


Bild 27. Aus *Bild 26* entnommene konvektive Wärmeübergangskoeffizienten entsprechend 10%, 20% und 30% Unzufriedenen aufgrund von Zugluft, in Abhängigkeit von der Raumtemperatur.

Räume mit geringer Turbulenz (Reinräume) häufigere Fall der Anströmung von vorne gegenüber von hinten zugrunde gelegt. Bei Anströmung von oben sind ähnliche Verhältnisse wie in *Bild 28* zu erwarten (Vergleich der *Bilder 12* und *15*). Darstellungen dieser Art, mit Angabe zulässiger Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Raumtemperatur, sind prinzipiell bei geringer Turbulenz nur für jeweils einen bestimmten Turbulenzgrad gültig, wie die *Bilder 10* und *11* zeigen. Bei höheren Turbulenzgraden, ab Werten von ca. 40%, bestimmt das Produkt aus Turbulenzgrad (Quotient aus Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit und mittlerer Luftgeschwindigkeit) und mittlerer Luftgeschwindigkeit, also letztlich die

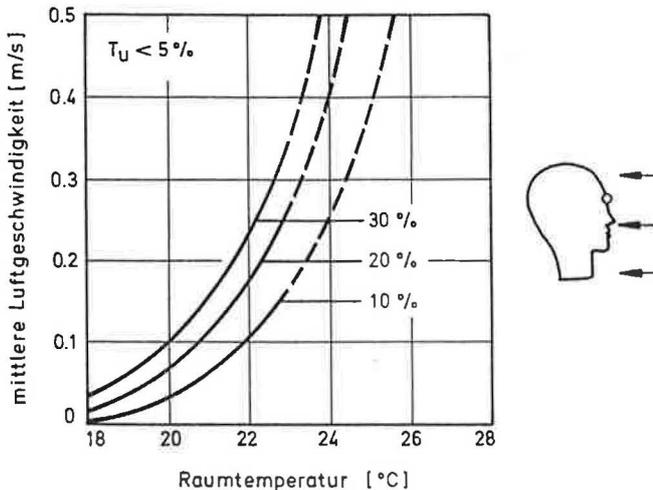


Bild 28. Mittlere Luftgeschwindigkeiten entsprechend 10%, 20% und 30% Unzufriedenen aufgrund von Zugluftwahrnehmung im Gesicht, bei Anströmung von vorne und einem Turbulenzgrad unter 5%, in Abhängigkeit von der Raumtemperatur. Aus *Bildern 12* und *27* entnommen. Grundlage hierfür sind psychophysische Messungen bei 23 °C an sitzenden Versuchspersonen, mit Trainingsanzug bekleidet (*Bild 12*), physikalische Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (*Bild 7*) sowie die Anwendung einer Wärmebilanzgleichung (*Bild 26*). Insbesondere für höhere Temperaturen (ab 23 °C) sind die Kurven mit weiteren psychophysischen Messungen zu überprüfen.

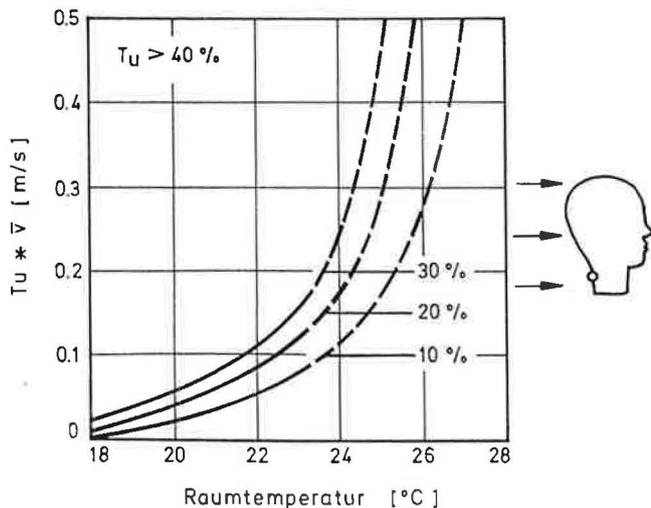


Bild 29. Produkte aus Turbulenzgrad T_u und mittlerer Luftgeschwindigkeit \bar{v} entsprechend 10%, 20% und 30% Unzufriedener aufgrund von Zugluftwahrnehmung am Nacken, bei Anströmung von hinten und einem Turbulenzgrad über ca. 40%, in Abhängigkeit von der Raumtemperatur. Aus *Bildern 11* und *27* entnommen. Grundlage hierfür sind psychophysische Messungen bei 23 °C an sitzenden Versuchspersonen, mit Trainingsanzug bekleidet (*Bild 12*), physikalische Messungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (*Bild 11*) sowie die Anwendung einer Wärmebilanzgleichung (*Bild 26*). Insbesondere für höhere Temperaturen (ab 23 °C) sind die Kurven mit weiteren psychophysischen Messungen zu überprüfen.

Standardabweichung, die Höhe des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und damit das Zugluftempfinden. *Bild 29* gibt die aus der Kombination der *Bilder 8* und *27* erhaltenen zulässigen Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Raumtemperatur wieder. Hierbei wurde der für das Zugluftempfinden kritischere Fall der Anströmung von hinten zugrunde gelegt.

Mit der Einschränkung, daß die vorgestellten Ergebnisse bisher nur bei 23 °C durch psychophysische Messungen belegt worden sind und die Analyse der Luftbewegungen bei den eigenen und dänischen Messungen mit verschiedenen Geräten erfolgte, können die Bewertungskurven für Zugluft in Reinnräumen mit hohen Anforderungen (Turbulenzgrad $< 5\%$) und in klimatisierten Räumen mit Mischungslüftung (Turbulenzgrad $> 40\%$) angewendet werden. Die Auswirkungen der genannten Einschränkung müssen – insbesondere für höhere Raumtemperaturen – noch genauer überprüft werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Untersuchungen war das Herausfinden und Quantifizieren der physikalischen Ursachen für Zugluft, als Voraussetzung zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen in solchen klimatisierten Räumen, in denen Zugluftprobleme auftreten. Hierzu wurden physikalische Messungen an einem beheizten künstlichen Kopf sowie psychophysische Messungen an ca. 150 Versuchspersonen in Klimaträumen durchgeführt. Die physikalischen Untersuchungen beinhalteten die Messung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei den vier Hauptanströmungsrichtungen und bei unterschiedlicher Turbulenz. Die psychophysischen Untersuchungen bestanden aus:

1. Ermittlung derjenigen Hauttemperaturen in ruhender Luft und bei sinkender Raumtemperatur, bei denen eine unerwünschte Kälteempfindung, ähnlich wie bei Zugluft, einsetzt.
2. Zugluftuntersuchen unter praktisch turbulenzfreien Reinnraumbedingungen bei den vier Hauptanströmungsrichtungen;
3. Zugluftuntersuchen an der Technischen Universität Dänemark bei Anströmung von hinten und bei unterschiedlicher Turbulenz.

Aufgrund der Untersuchungen sind folgende Ergebnisse festzuhalten:

1. Die Belastung des Menschen durch Luftbewegung wird physikalisch sinnvoll mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K beschrieben. Dieser integriert sowohl die Höhe der mittleren Luftgeschwindigkeit als auch das zeitlich dynamische Verhalten von Luftbewegungen, gekennzeichnet durch den Turbulenzgrad (Quotient aus Standardabweichung und mittlerer Luftgeschwindigkeit), die Standardabweichung und die Frequenz. Die an der angeströmten Körperoberfläche gemessenen α_K -Werte korrelieren mit der Temperaturabnahme an dieser Stelle und der Beanspruchung der Versuchspersonen, d.h. deren Zugluftbewertung. Somit ist der α_K -Wert in Verbindung mit der Lufttemperatur als aussagekräftige Bewertungs- und Meßgröße für Zugluft anzusehen. Die Ergebnisse wurden für Meßstellen auf der Stirn und am Nacken überprüft. Für weitere zugluftempfindliche Körperstellen und -bereiche, z. B. den Fußknöchelbereich, wären gleichartige Messungen unter besonderer Berücksichtigung der Geometrie des angeströmten Körperteils durchzuführen. Bei feuchter Wärmeabgabe

(Schwitzen) bleibt α_K unverändert. Anstelle der hier verwendeten indirekten α_K -Meßmethode über den Temperaturgradienten der Luft vor dem angeströmten Körper wäre für die Ermittlung der feuchten Wärmeabgabe die direkte Messung über eine „künstliche Haut“ (z. B. nach [20]) mit Wasserbenetzung erforderlich.

2. Für geringe Turbulenzgrade, bis ca. 40%, ist der Zusammenhang von mittlerer Luftgeschwindigkeit und α_K für jeden Turbulenzgrad gesondert zu ermitteln. Für Turbulenzgrade über 40% hängt α_K vom Produkt aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit, also letztlich der Standardabweichung, ab. Bei der Ermittlung dieses Zusammenhangs erwies sich der Einfluß der Geräte zur Luftgeschwindigkeitsanalyse, insbesondere deren Ansprechzeit und Richtungsabhängigkeit, als besonders stark. Diesem Umstand ist bei der Zugluftbewertung von Luftbewegungen in Zukunft und in früheren Untersuchungen Rechnung zu tragen.
3. Mit Hilfe einer Wärmebilanzgleichung für die trockene Wärmeabgabe der jeweils angeströmten Körperoberfläche ist eine begrenzte Verallgemeinerung der nur für 23°C Raumtemperatur ermittelten Ergebnisse möglich. Eine solche Betrachtung für den Kopfbereich führte
 - zu einer Darstellung der je nach Prozentsatz „Unzufriedener aufgrund von Zugluft“ zulässigen mittleren Luftgeschwindigkeit bei vorgegebener Raumtemperatur, gültig für Räume mit praktisch turbulenzfreier Strömung, z. B. Reinräume mit besonders hohen Anforderungen
 - zu einer Darstellung des zulässigen Produkts aus Turbulenzgrad und mittlerer Luftgeschwindigkeit (Standardabweichung), gültig für Räume mit hoher Turbulenz, wie z. B. klimatisierte Räume mit Mischungslüftung.

Zur Bestätigung der zum Teil durch Berechnung gewonnenen Darstellungen (Anwendung der Wärmebilanzgleichung) sollten Messungen bei weiteren Raumtemperaturen durchgeführt werden. Insbesondere bei höheren Raumtemperaturen ist die Zulässigkeit der Beschränkung auf die trockene Wärmeabgabe zu überprüfen. Entscheidend muß hierbei für die weiteren Untersuchungen die Fragestellung sein, ob bei höheren Temperaturen eine höhere zulässige Luftgeschwindigkeit das Einsetzen von Schweißbildung reduziert bzw. verhindert oder ob Schweißbildung einsetzt und trocken wie latent eine verstärkte Wärmeabfuhr erfolgt; dies wäre physiologisch sicherlich nicht unbedenklich. Der Grad der Bekleidung und der Aktivität sind hierbei entscheidend. Zu klären ist auch die Frage, inwieweit die Bekleidung der üblicherweise bedeckten Körperteile die Zugluftempfindlichkeit unbedeckter Körperteile (Gesicht, Nacken) verändert.

4. Der von Fanger gefundene Zusammenhang zwischen dem zu erwartenden Prozentsatz Unzufriedener (Predicted Percentage of Dissatisfied PPD) und der zu erwartenden mittleren Behaglichkeitsbewertung für das thermische Empfinden des gesamten Körpers (Predicted Mean Vote PMV) ist bei Auftreten von Zugluft zu ergänzen. Für die Gesamtbewertung ist im günstigsten Fall nach Fanger mit PPD = 5% Unzufriedenen zu rechnen, bei der Bewertung PMV = 0 (thermisch neutral). Dabei wird „Unzufriedenheit“ definiert mit Zukühlempfinden für die PMV-Werte -3 (kalt), -2 (kühl) und mit Zuwarmempfinden für die PMV-Werte 2 (warm), 3 (heiß). Bei Auftreten von Zugluft ist in den Definitionsbereich für Unzufriedenheit durch Zukühlempfinden der PMV-Wert -1 (leicht kühl) mit aufzunehmen. Dies hat zur Folge, daß dann im günstigsten Fall etwa mit PPD = 15% Unzufriedenen zu rechnen ist, bei der Bewertung PMV = 0,5 (zwischen neutral und leicht warm).

Insgesamt ist festzustellen, daß mit den vorgestellten Laboruntersuchungen der physikalischen Ursachen für Zugluft – die durch Praxisuntersuchungen abzusichern sind – Grundlagen für die Planung von Raumlufttechnischen Anlagen mit künftig höherer Akzeptanz bestehen.

Das Forschungsvorhaben wurde gefördert vom Bundesministerium für Forschung und Technologie im Rahmen des Programms „Forschung zur Humanisierung des Arbeitslebens“.

Literatur

- [1] Kröling, P.: Gesundheits- und Befindensstörungen in klimatisierten Gebäuden. W. Zuckschwerdt Verlag, München, Bern, Wien (1985).
- [2] Mayer, E. und Schwab, R.: Konzept für epidemiologische, medizinische und technische Untersuchungen zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen in klimatisierten Räumen. Bericht B Ho-R 7/85 (1985) des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.
- [3] Mayer, E.: Measurement of the Convective Surface Coefficient of Heat Transfer of Man. Roomvent. 87, Vol. 2b. Kongress Stockholm (1987), pp. 1–6.
- [4] Mayer, E.: Physical Causes for Draft: Some new findings. ASHRAE Transactions, Vol. 93, part 1 (1987), pp. 540–548.
- [5] Mayer, E.: Airvelocity and thermal Comfort. Vol. 5: INDOOR AIR '87. Berlin: Institute for Water, Soil and Air Hygiene (1987), pp. 471–475.
- [6] Mayer, E.: Zugluftuntersuchungen bei Reinraumbedingungen. VDI-Bericht Nr. 654 (1987), S. 75–85.
- [7] Mayer, E. und Schwab, R.: Direction of low turbulent air flow and thermal comfort. Berglund, B.; Lindvall, T. (Hrsg.): HEALTHY BUILDINGS '88, Swedish Council for Building Research, Stockholm (1988), Vol. 2: Planning, Physics and Climate Technology for Healthier Buildings. S. 577–582.
- [8] Mayer, E.: Welche Luftströmrichtung ist in Reinräumen zu bevorzugen? IBP-Mitteilung 15 (1988), H. 158.
- [9] Mayer, E.: Einfluß der Einströmrichtung auf die thermische Behaglichkeit in Reinräumen. VDI-Bericht (1988), S. 51–58.
- [10] Fanger, P. O.; Melikov, A. K.; Hanzawa, H. und Ring, J.: Air Turbulence and Sensation of Draught. Energy and Buildings, 12 (1988), pp. 21–39.
- [11] Mayer, E.: Untersuchungen von Zegerscheinungen mit Hilfe physikalischer Meßmethoden. Gesundheits-Ingenieur 106 (1985), H. 2, S. 65–73.
- [12] Benzinger, T. H.: The Physiological Basis for Thermal Comfort. INDOOR CLIMATE, Danish Building Research Institute, Kopenhagen (1979). S. 441–474.
- [13] Mayer, E.: Konstant-Temperatur-Anemometer mit Temperaturkompensation. Patentschrift DE 3 108 021 C2 (1986).

- [14] *Olesen, B. W.*: How many sites are necessary to estimate a mean skin temperature? *Thermal Physiology*. Edited by J.R.S. Hales. Raven Press, New York (1984), S. 33–38.
- [15] *P.O. Fanger and N.K. Christensen*: Perception of draught in ventilated spaces, *Ergonomics*, 29 (2) (1986), pp. 215–235.
- [16] ISO 7730: Moderate thermal environments – determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Standards Organization, Genf (1984).
- [17] *Fanger, P.O.*: *Thermal Comfort*. Robert E. Krieger publishing company, Malabar, Florida (1982).
- [18] *Mayer, E.*: Tagesgang für thermisches Behaglichkeitsempfinden. *Gesundheits-Ingenieur – gi* 107 (1986) H. 3, S. 173–176.
- [19] *Frank, W.*: *Raumklima und Thermische Behaglichkeit*. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn KG, Berlin–München–Düsseldorf (1975).
- [20] *Mayer, E.*: Einrichtung zur Beurteilung des Raumklimas. Patentschrift DE 3205704 C2 (1988).

Messen, Ausstellungen, Kongresse, Tagungen, Lehrgänge 1990

(ohne Gewähr und kein Anspruch auf Vollständigkeit)

20. bis 24. Februar 1990	Utrecht (Niederlande): Verwarming en Sanitair, Fachmesse für Installationstechnik
7. bis 9. März 1990	Ostfildern: Hydraulik und Regelung von Warmwassernetzen in Heizungs- und Klimaanlageanlagen. Lehrgang Techn. Akademie Esslingen
8. bis 9. März 1990	Aachen: Symposium „Neuer Stand der Sanierungstechnik von Altlasten“. RWTH, Forschungsinst. f. Wassertechnologie
8. bis 12. März 1990	Mailand (Italien): 27. Mostra Convegno. Fachmesse für Heizung, Klima, Kühlung und Sanitärtechnik
9. März 1990	Ostfildern: Luft und Klima als Planungsfaktoren im Umweltschutz. Lehrgang Techn. Akademie Esslingen
12. bis 15. März 1990	Tokyo (Japan): 3. Int. Energy Agency, Heat Pump Conference. Sekr.: Azuma Shurui Bldg., 9–11 Kanda Awaji-cho, 2-chome, Chiyoda-ku, Tokyo, 101 Japan
13. bis 17. März 1990	Stuttgart: INTHERM 90
15. März 1990	Ostfildern: Sonnenbeheizte Freibäder. Lehrgang Techn. Akademie Esslingen
20. März 1990	Ostfildern: Tauwasserausfall und Schimmelbildung in Wohngebäuden. Lehrgang Techn. Akademie Ostfildern
22. bis 23. März 1990	Ostfildern: Baulicher Brandschutz. Lehrgang Techn. Akademie Esslingen
27. März 1990	Ostfildern: Sanierung von Rohrleitungen unter Verwendung korrosionsbeständiger Kunststoffe. Lehrgang Techn. Akademie Esslingen
28. März 1990	München: 20. Abwassertechn. Seminar. TU München, Lehrst. f. Wassergütwirtschaft u. Gesundheitsingenieurwesen
28. bis 30. März 1990	Essen: 23. Essener Tagung „Wasser–Abwasser–Abfall“, Saalbau, Verant.: Lehrst. f. Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, 5100 Aachen
23. bis 24. April 1990	Darmstadt: IBK-Bau-Fachtagung 110 „Das 100-Milliarden-Ding“. Abwasserkanäle und -Leitungen. Inst. f. Bauen m. Kunststoffen
6. bis 11. Mai 1990	Hamburg: XII. Weltkongreß f. Arbeitsschutz. ICC Hamburg
10. Mai 1990	Frankfurt a. M.: Fachtagung und Ausstellung Blockheizkraftwerke. Inf.: Promotor Verlag, Pf. 211053, 7500 Karlsruhe 21
10. bis 11. Mai 1990	Lindau (Bodensee): Int. IBK-Kongreß „Der Europäische Baumarkt '92“. Inst. f. Bauen m. Kunststoffen, Darmstadt
14. bis 15. Mai 1990	Karlsruhe: Lehrgang Automatisierung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlageanlagen. VDI-Bildungswerk, Düsseldorf
16. bis 18. Mai 1990	Karlsruhe: Lehrgang Gebäude-Leittechnik für betriebstechnische Anlagen in Gebäuden. VDI-Bildungswerk, Düsseldorf
21. bis 23. Mai 1990	Timmendorfer Strand: Jahrestagung d. Fachgruppe Wasserchemie i. d. Ges. Deutscher Chemiker
24. bis 27. Mai 1990	Genua (Italien): 5. Intern. Ausstellung f. Sanierung, Umbau und Restaurierung im Bauwesen und Energieeinsparung im Bauwesen
10. bis 13. Juni 1990	Basel (Schweiz): INEX 90. 16. intern. Fachmesse für Eisenwaren, Werkzeuge, Haushalt, Haushaltapparate
3. bis 6. September 1990	Rotterdam (Niederlande): Intern. Symposium Klima, Feuchte und Energie. Auskunft: Bauzentrum, Postfach 299, NL 3000 AG Rotterdam
11. bis 14. Oktober 1990	Ulm: Schornstein 90, Messe
16. bis 18. Oktober 1990	Köln: Tagung „Brandschutz in der Gebäudetechnik“. VdS und VDI. Inf.: VDI-TGA, Pf. 3049, 4000 Düsseldorf 1
13. bis 16. November 1990	Paris (Frankreich): Europäisches Symposium „Korrosion und Bauschäden“. CSTB, 75016 Paris, 4 av. du Recteur Poincaré