Gesundheits Ingenieur

Haustechnik · Bauphysik · Umwelttechnik

Herausgegeben von K.W. USEMANN 115. Jahrgang 1994 · Heft 6 · Seite 285–344

unter Mitwirkung von F. Baum, H. Erhorn, E. Lahmann, H. Viessmann und J. Wegner

in Verbindung mit dem Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Berlin-Dahlem; Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, München und der Gesundheitstechnischen Gesellschaft, Berlin.

Zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie

Bernd Glück

***Fanger* u.a. veröffentlichten 1985 [1] die Ergebnisse von Behaglichkeitstests mit Versuchspersonen bei geometrisch und thermisch unterschiedlichen Strahlungstemperatur-Asymmetrien. Die aus den stark streuenden Einzelergebnissen ermittelten Zusammenhänge (Unzufriedenheitsgrad in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie) fanden weltweite Verbreitung und auch Eingang in deutsche Normen. Einige Ungereimtheiten waren Anlaß, die Auswertung der Befragungsergebnisse unter veränderten geometrischen Bezugsdefinitionen für die Strahlungstemperatur-Asymmetrie erneut vorzunehmen. Die nunmehr vorliegenden, zum Teil stark abweichenden Zuordnungen sind plausibler und durch Einbeziehen früherer Untersuchungen [2] auch sicherer.**

Relevante Grundlagen im Rückblick

Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrie. Die ersten stammen aus dem Jahr 1953. *Chrenko* gab zulässige Temperaturen für Heizdecken in Abhängigkeit der Einstrahlzahl eines parallel zur Decke liegenden Flächenelementes – welches die Schädeldecke repräsentieren sollte – an. *Kollmar* [3] bezog auf diese Aussagen und präsentierte die im *Bild 1* gezeigten Kurven A und B. Für eine Raumtemperatur von 20 °C und Menschen mit leichter Beschäftigung sollte im Falle dauernden Sitzens bzw. stehens Kurve A mit der Höhe des Bezugselementes von 1,3 m bzw. 1,8 m gelten; für nur zeitweise stehende Menschen (Bezugshöhe von 1,8 m) wurde Kurve B empfohlen. Außerdem bot man an, der wärmephysiologischen Überprüfung im Sonderfall (bedingte Behaglichkeit), nur eine Deckentemperatur zugrunde zu legen, die zu einer Außentemperatur $t_a = -5\,°C$ gehört. In [6] wird angenommen, daß bei den *Chrenko*-Werten die allgemeine thermische Behaglichkeit nicht gesichert war.

Macskásy [4] leitete die zulässige Deckentemperatur $t_{D,zul}$ von der behaglichen trockenen Wärmeabgabe des Kopfes ab. Es gilt

$$t_{D,zul} = 100 \left[\frac{1}{\varphi_{K,D}} \left(\frac{T_K}{100}\right)^4 - \frac{1-\varphi_{K,D}}{\varphi_{K,D}} \left(\frac{T_{uU}}{100}\right)^4 - \frac{\dot{q}_{K,t,b} - \alpha_{K,K}\,(t_K - t_{L,K})}{C_K\,\varphi_{K,D}} \right]^{0,25} - 273 \text{ in } °C \qquad (1)$$

mit

$\varphi_{K,D}$ Einstrahlzahl eines waagerechten Flächenelementes (Schädeldecke) auf die Heizdecke

T_K; t_K Kopftemperatur in K; °C

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, ROM-Zentrale, Hamburg.

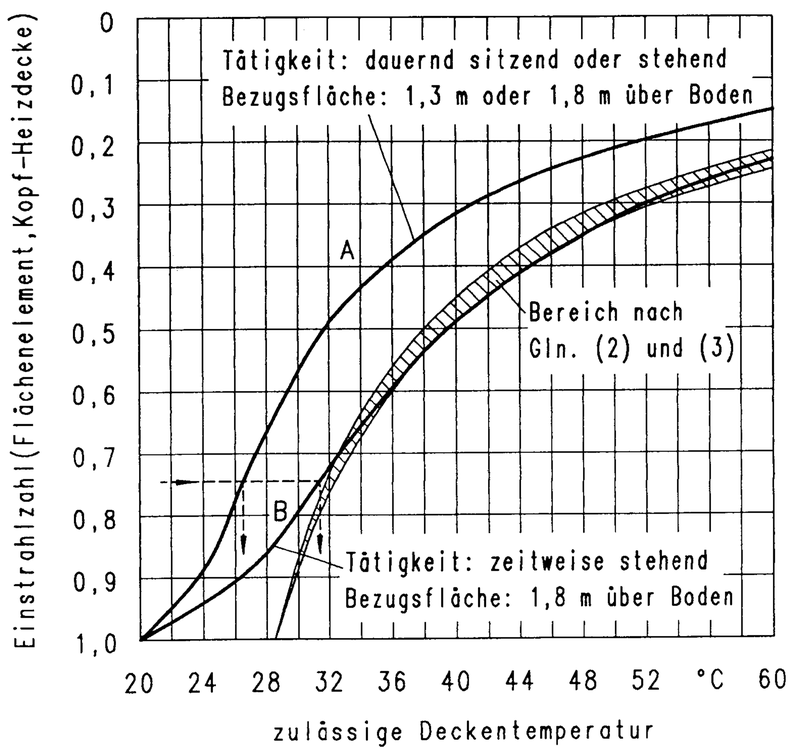

Bild 1. Zulässige Oberflächentemperaturen von Heizdecken bei 20 °C Raumtemperaturen. Kurven A und B nach *Chrenko-Kollmar* [3]; Schraffierter Bereich nach *Macskásy* [4; 5].

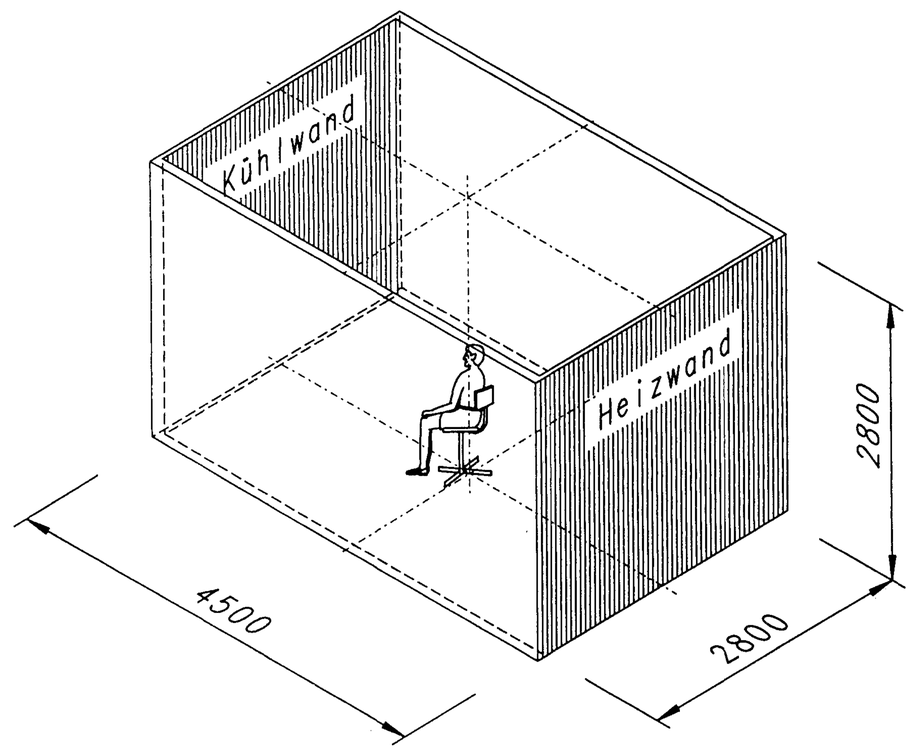

Bild 2. Versuchsanordnung zur Ermittlung der zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei kombinierter Heiz- und Kühlwand-Anordnung nach [6].

T_{uU} mittlere Temperatur der unbeheizten Umgebung in K

$t_{L,K}$ Lufttemperatur in Kopfhöhe in °C

$\dot{q}_{K,t,b}$ behagliche Mindestwärmestromdichte am Kopf in W/m^2

$\alpha_{K,K}$ Wärmeübergangskoeffizient am Kopf durch Konvektion in $W/(m^2K)$

Setzt man die Werte für Tätigkeiten in Büroräumen nach [5] ein, so ergeben sich Bestimmungsgleichungen, die den Bereich

$$t^{*}_{D,zul} = 100 \left[\frac{10{,}9}{\varphi} + 71{,}7 \right]^{0,25} - 273 \quad \text{in °C} \qquad (2)$$

$$t^{**}_{D,zul} = 100 \left[\frac{12{,}8}{\varphi} + 69{,}8 \right]^{0,25} - 273 \quad \text{in °C} \qquad (3)$$

beranden. Er ist in *Bild 1* eingetragen. Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung mit der *Chrenko-Kollmar*-Kurve B.

In den siebziger Jahren begann mit direkten Untersuchungen zur zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrie.

Olesen/Fanger/Jensen/Nielsen haben 16 fast unbekleidete Personen (0,1 clo) in asymmetrischen Strahlungsfeldern bei individuell vorgewählter und dann konstant gehaltener Empfindungstemperatur befragt [6]. Die geometrische Anordnung ist im *Bild 2* dargestellt. Die Temperaturen der beiden Endwände des Versuchraumes werden in ± 5 K-Schritten erhöht bzw. erniedrigt. Erst bei $\Delta t_{EW} = \pm 15$ K und ± 20 K wurde thermisches Unbehagen mitgeteilt. Der Unzufriedenheitsgrad UZG in Prozent der befragten Probanden ist in *Tab. 1* wiedergegeben. Generell wurden keine geschlechtsspezifischen Unterschiede festgestellt. Bezüglich der Sitzpositionen ergab sich, daß der Mensch die kalte Wand frontal eher akzeptiert als die seitliche oder rückwärtige Anordnung.

Im gleichen Aufsatz [6] wurde eine Umrechnung auf die zulässige, lokale Strahlung für den bekleideten, sitzenden Menschen in thermisch neutraler Umgebung bei ruhender Luft vorgenommen. Es gilt die Ungleichung

$$-2{,}5 - 1{,}2\,(1 - f_{KL}) - 1{,}8\,R_{KL} \le \Phi_{M,S}\,\Delta t_{S,zul} \le$$
$$\le 4 + 1{,}2\,(1 - f_{KL}) + 1{,}8\,R_{KL} \qquad (4)$$

„Strahlungskühlung" „Strahlungsheizung"

mit

f_{KL} Verhältnis der Oberflächen des bekleideten zum nackten Menschen

R_{KL} Bekleidungswert in clo

$\Phi_{M,S}$ Einstrahlzahl des Menschen M auf die thermisch aktive Fläche S (Kühl- oder Heizfläche) Werte sind in *Fanger/Angelius/Kjerulf-Jensen* [8] für den stehenden, sitzenden und sich um

Tabelle 1. Versuchsdaten und Auswertungen für eine Kombination einer Heiz- und einer gegenüberliegenden Kühlwand [6].

	$\Delta t_{EW} = \pm 15$ K $\Delta t_{S,WE,l\text{-}r} = 9{,}8$ K	$\Delta t_{EW} = \pm 20$ K $\Delta t_{S,WE,l\text{-}r} = 13{,}0$ K	Geschlecht	Sitzposition zur Kühl- bzw. Heizwand
UZG	12,5	37,5	Frauen	links – kalt, rechts – warm
%	25	62,5	Frauen	rechts – kalt, links – warm
	12,5	54,2	Männer	links – kalt, rechts – warm
	25	37,5	Frauen	vorn – warm, hinten – kalt
	0	26,5	Männer	vorn – warm, hinten – kalt
	0	12,5	Frauen	vorn – kalt, hinten – warm*)
	0	16,7	Männer	vorn – kalt, hinten – warm*)

*) günstige Sitzposition

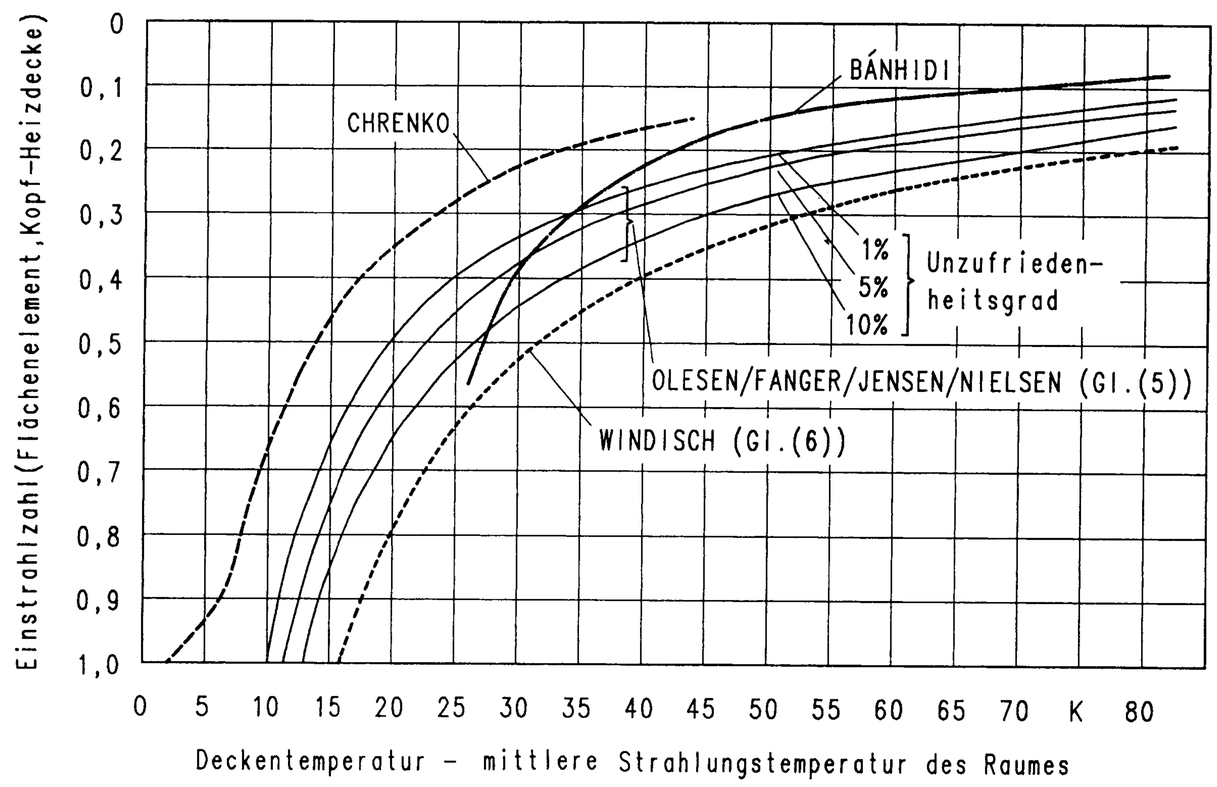

Bild 3. Zulässige Temperaturdifferenzen zwischen der Strahlungsheizfläche und der mittleren Strahlungstemperatur des Raumes in Abhängigkeit der Einstrahlzahl eines exponierten Flächenteilchens der menschlichen Oberfläche auf die Strahlungsheizfläche.

Tabelle 2. Versuchsdaten und Auswertungen für Heizdecken [2].

Nr.	t_S	$t_L = t_B = t_D$	t_W	$\Delta t_{S,FE}$	$\Delta t_{S,WE,o-u}$	$\Delta t_{S,WE,o-l}$	UZG Kopf/Gesamt
	°C	°C	°C	K	K	K	%
1	34	24	24,2	4,5	7,6	5,5	0 / 6,3
2	43	23	23,4	9,2	15,4	11,0	12,5 / 25
3	52	22,3	22,9	14,1	23,1	16,3	25 / 43,8
4	63	21,4	22,2	20,4	32,7	22,7	56,3 / 75
5	69	20,6	21,5	23,6	38,2	26,4	62,5 / 68,8

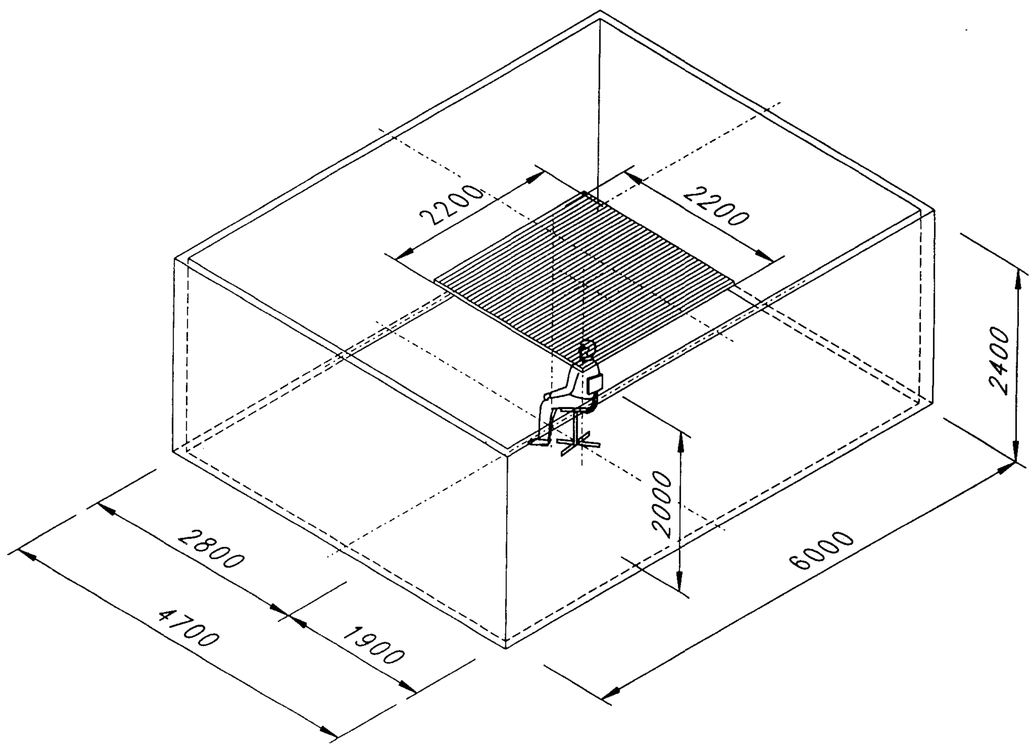

Bild 4. Versuchsanordnung zur Ermittlung der zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei Heizdecken nach [2].

seine Vertikalachse drehenden Menschen angegeben. Nach *Windisch* [5] kann in guter Näherung die Einstrahlzahl eines Kugelelementes φ° in 1 m Höhe verwendet werden.

$\Delta t_{S,zul}$ zulässige Temperaturdifferenz (Absolutwert) zwischen der Oberflächentemperatur t_S der Fläche S und der mittleren Umgebungstemperatur t_U, in der auch t_S enthalten ist, in K

Da die Einstrahlzahl des Menschen $\Phi_{M,S}$ wenig aussagekräftig ist, z. B. bezüglich der Behaglichkeit in Kopfhöhe und wegen der mangelnden Vergleichbarkeit dieser Definition der Strahlungsasymmetrie mit den früheren, sehr praktikablen Aussagen *Chrenko's*, enthält [6] noch Umrechnungen der für „Körpermitte" geltenden Werte auf die zur Strahlungsquelle ungünstiger positionierten Körperflächen. Für $R_{KL} = 1$ clo folgt aus Gl. (4)

$$-8{,}4 \leq \varphi_{M,S}\,\Delta t_{S,zul} \leq 11{,}3 \qquad (5)$$

mit

$\varphi_{M,S}$ Einstrahlzahl eines Flächenelementes des menschlichen Körpers M (z. B. der Schädeldecke) auf die thermisch aktive Fläche S (Kühl- oder Heizfläche).

Dieser Gleichung wurde ein Diskomfortgrad von 5% zugeordnet. Sie ist in *Bild 3* für die Strahlungsheizung ausgewertet und den Ergebnissen von *Bánhidi* und *Chrenko* gemäß [6] gegenübergestellt. Die *Chrenko*-Kurve weicht von *Bild 1* etwas ab. Möglicherweise liegt dies an der Umrechnung der Temperaturdifferenz $(t_{Decke} - t_{Raum})_{zul}$ auf $\Delta t_{S,zul}$, die nicht ohne konkrete Raumgeometrie möglich ist.

Unterschiedliche Annahmen zur Raumgeometrie sind auch die Ursache, warum *Windisch* [5] ebenfalls bezugnehmend auf Gl. (4) für $R_{KL} = 1$ clo

$$\varphi_{M,S}\,\Delta t_{S,zul} \leq 15{,}8 \qquad (6)$$

ermittelt. Diese Kurve ist ergänzend im *Bild 3* vermerkt.

Ebenfalls 16 Personen, allerdings normal bekleidet, (0,6 clo), wurden von *Fanger/Bánhidi/Olesen/Lankilde* in einem Versuchsraum mit einer abgehängten Heizdecke (*Bild 4*) befragt [2].

Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie wird als Unterschied der Strahlungstemperaturen der umgebenden Flächen bezogen auf die beide Seiten eines waagerechten Flächenelementes, das sich in 0,6 m Höhe über dem Fußboden (Mitte des menschlichen Körpers bei Sitzposition) befindet, definiert.

In *Tab. 2* sind die Versuchsbedingungen (Temperaturen: t_S Strahlungsdeckenfläche, t_B Boden, t_D Decke, t_W Wände, t_L Luft), die nach [2] ermittelten Strahlungstemperatur-Asymmetrien auf das Flächenelement $\Delta t_{S,FE}$ gemäß Definition und der Unzufriedenheitsgrad UZG getrennt nach Aussagen bezogen auf das Empfinden des Kopfes und des gesamten Körpers vermerkt. Die Größen $\Delta t_{S,WE}$ entstammen nicht der Originalversuchsauswertung und werden später erläutert.

Griffiths/McIntyre untersuchten 24 Personen in einem Raum (3,7 m × 3,7 m × 2,4 m) mit einer Heizdecke [7]. Die thermischen Versuchsbedingungen sind in *Tab. 3* zusammengestellt. Sie beinhaltet die Umfassungstemperaturen (t_D Decke, t_B Boden, t_W Wände), die Lufttempera-

Tabelle 3. Versuchsdaten und Auswertungen für Heizdecken [7].

Nr.	t_D °C	t_B °C	t_W °C	t_L °C	t_E °C	Δt_{vrt} K	$\Delta t_{S,WE,o-l}$ K
1	26,5	20,2	26,5	21,0	22,9	4,0	1,1
2	30,0	20,4	25,5	21,0	22,9	5,6	3,4
3	38,0	20,7	20,5	21,0	22,0	9,2	9,8
4	45,0	22,3	15,0	21,0	21,1	11,6	15,6

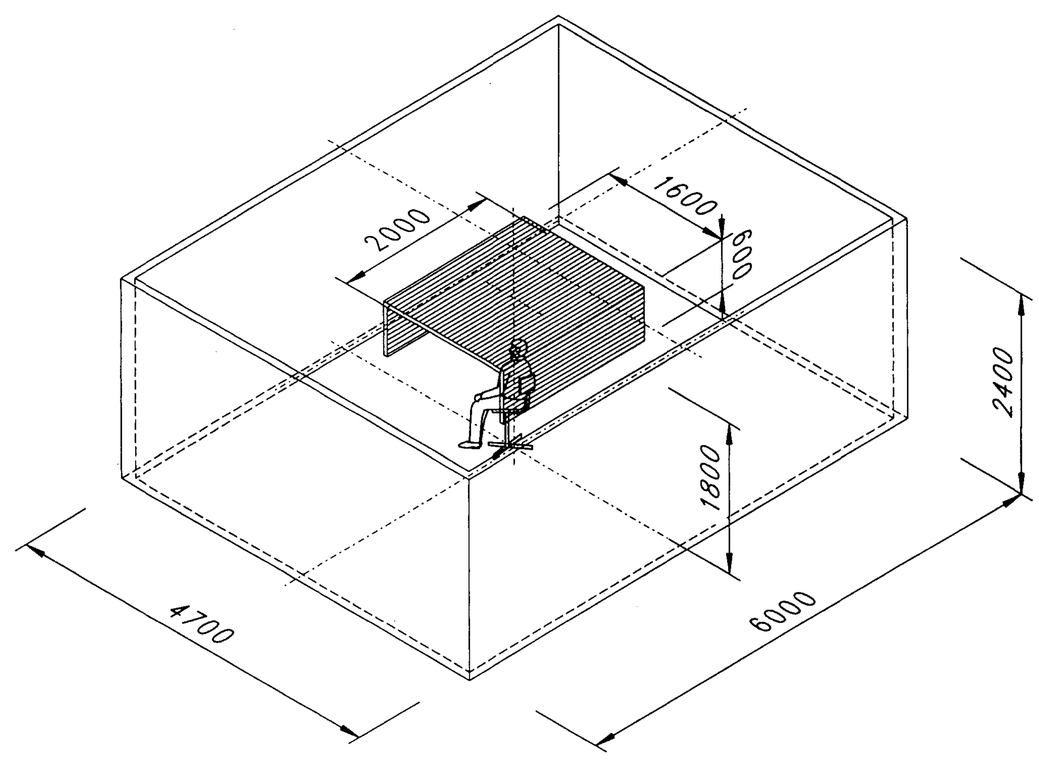

Bild 5. Versuchsanordnung zur Ermittlung der zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei Kühldecken nach [1].

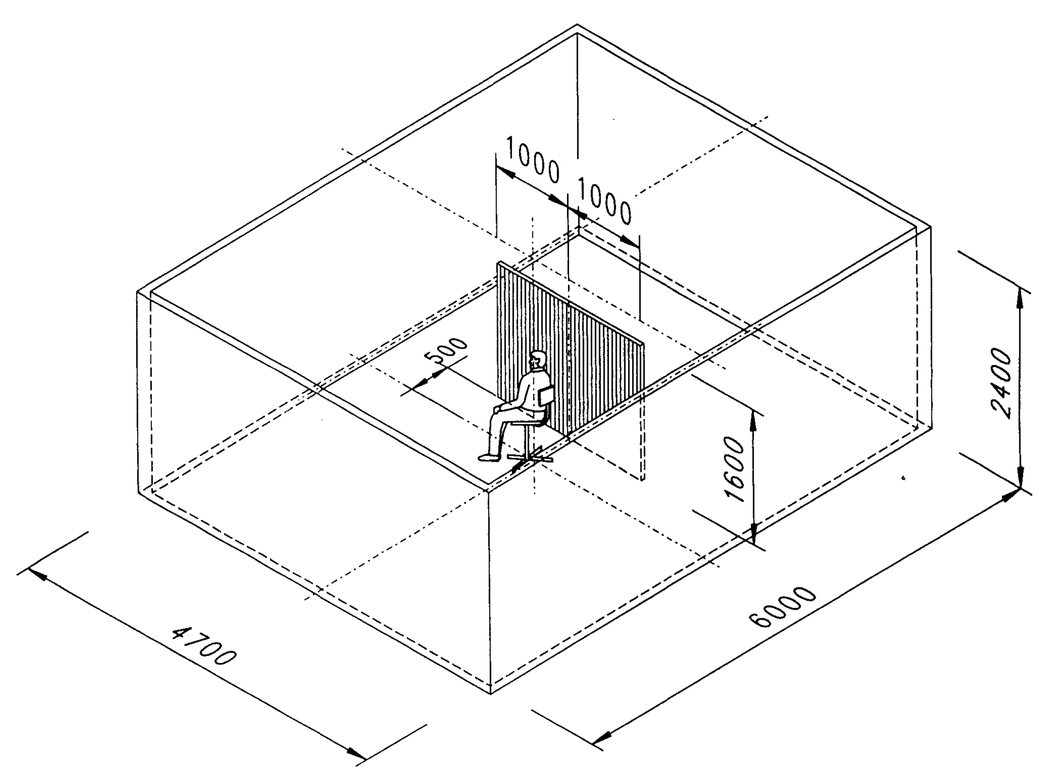

Bild 6. Versuchsanordnung zur Ermittlung der zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei Heiz- und Kühlwänden nach [1].

tur t_L und die Empfindungstemperatur t_E. Die Autoren ermittelten eine sogenannte Vektorstrahlungstemperatur Δt_{vrt} für ein Bezugselement in 1 m Höhe über dem Fußboden. Sehr bemerkenswert ist, daß die Probanden keine signifikanten Diskomfortunterschiede zwischen den vier Versuchsbedingungen empfanden.

Ein zusammenfassender Bericht wurde von *Fanger/Ipsen/Langkilde/Olesen/Christensen/Tanabe* über Kühldecken, Heiz- und Kühlwände erstellt [1]. Die Geometrie der Versuchsanordnung ist aus den *Bildern 5* und *6* ersichtlich. Es wurden bei der Kühldecken- und Heizwandanordnung je 16 Personen, bei Kühlwänden 32 Personen in den Test einbezogen. Sie waren normal bekleidet (0,6 clo). Die Versuchsdaten (Temperaturen: t_S aktive Strahlungsfläche, t_B Boden, t_D Decke, t_W Wände, t_L Luft), die in [1] ermittelten Strahlungstemperatur-Asymmetrien $\Delta t_{S,FE}$ und der durch Befragungen festgestellte Unzufriedenheitsgrad UZG sind den *Tabellen 4* bis *6* zu entnehmen. *Die bereits wiedergegebene Definition zur Strahlungstemperatur-Asymmetrie wurde für Kühldecken übernommen, im Falle der Heiz- und Kühlwände wird das Bezugsflächenelement lediglich vertikal orientiert.* Die in den *Tabellen* vermerkten $\Delta t_{S,WE}$ werden später erläutert.

In [1] sind die zulässigen Temperaturasymmetrien für Deckenheizungen [2] mit integriert, woraus *Bild 7* entstand. Diese Aussage fand weltweite Verbreitung und bildete auch die Grundlage für die Neufassung der DIN 1946 Teil 2.

Kritische Anmerkungen

Die gut dokumentierten Versuchsbedingungen in [1; 2] und [6] gestatten eine relativ genaue Rückverfolgung über das Zustandekommen der Aussagen. Sie zeigen aber auch die schmale Basis, und Umrechnungen sowie Extrapolationen gestalten die Ergebnisse keinesfalls sicherer. Dies dürfte den Nutzern, die *Bild 7* kompromißlos anwenden, nicht immer voll bewußt sein. Nachfolgend werden einige Schwachpunkte angesprochen.

1. Die Anzahl der Versuchspersonen war relativ klein (32 Personen bei Kühlwänden, 16 Personen bei Kühldecken, Heizwänden sowie Heizdecken) und die Altersgruppe eng begrenzt (19 bis 25 Jahre).
2. Die Definitßion der Strahlungstemperatur-Asymmetrie, bezogen auf ein horizontales oder vertikales Flächenelement in 0,6 m Höhe über Fußboden, hat z. B. mit dem Empfinden der Strahlungsasymmetrie des Kopfes nur eine sehr schwache Korrelation. Dem Empfinden des Kopfes gebührt aber Priorität, denn bei Rumpf und Extremitäten sind individuell empfundener Diskomfort durch angepaßte Kleidung in gewissen Grenzen vermeidbar.
3. Die Aussagen der Probanden waren sehr unsicher. So empfanden gemäß der ermittelten Regressionskurve im Versuchsstand „Deckenheizung" 5 % und im Versuchsstand „Wandheizung" 3 % jeweils bei 0 K Strahlungsasymmetrie thermischen Diskomfort. Um diese offensichtliche „Falschempfindung" zu korrigieren, verschob man die Kurven um 5 % bzw. 3 % Unzufriedener. Die Regression wurde im Wahrscheinlichkeitsnetz durchgeführt und „großzügig" extrapoliert. Dies sei am Beispiel der Heizdecke gezeigt (*Bild 8*). Die fünf Befragungsergebnisse – bezogen auf den Gesamtkörper (*Tab. 2*) – ergeben im Wahrscheinlichkeitsnetz extrapoliert bei $\Delta t_{S,FE} = 0$ einen Unzufriedenheitsgrad von 5 %. Dies stellt analog ISO 7730 den besten, erreichbaren PPD-Wert für PMV = 0 dar. Eine Verschiebung der Kurve um weitere 5 % ist danach nicht akzeptabel. Andererseits würde der extrapolierte Kurvenverlauf fordern, daß $\Delta t_{S,FE} = 0$ sein muß,was nicht realisierbar und aus Erfahrung auch nicht notwendig ist. Führt man dagegen eine lineare Regression durch, so erhält man

$$UZG = -8{,}0 + 3{,}61\ \Delta t_{S,FE,zul} \quad \text{in } \% \qquad (7)$$

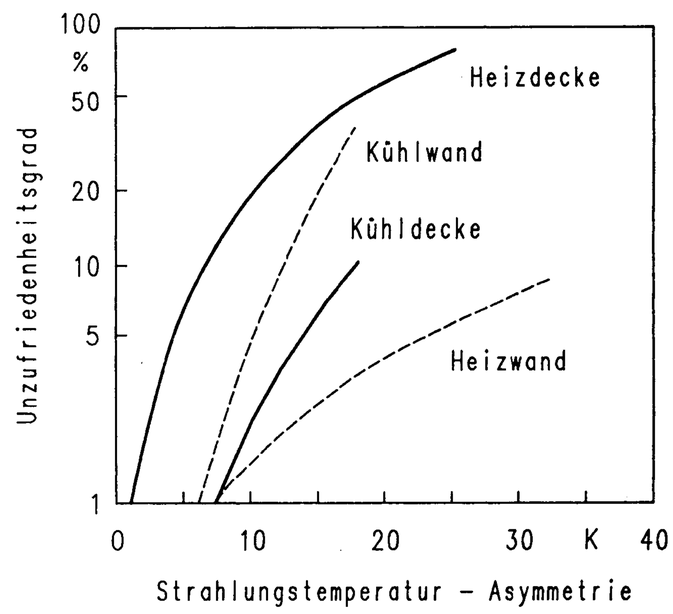

Bild 7. Zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie bezogen auf ein Flächenteilchen in 0,6 m Höhe über dem Fußboden (Anordnung waagerecht bei Deckenheizung und -kühlung; Anordnung senkrecht bei Wandheizung und -kühlung) nach [1].

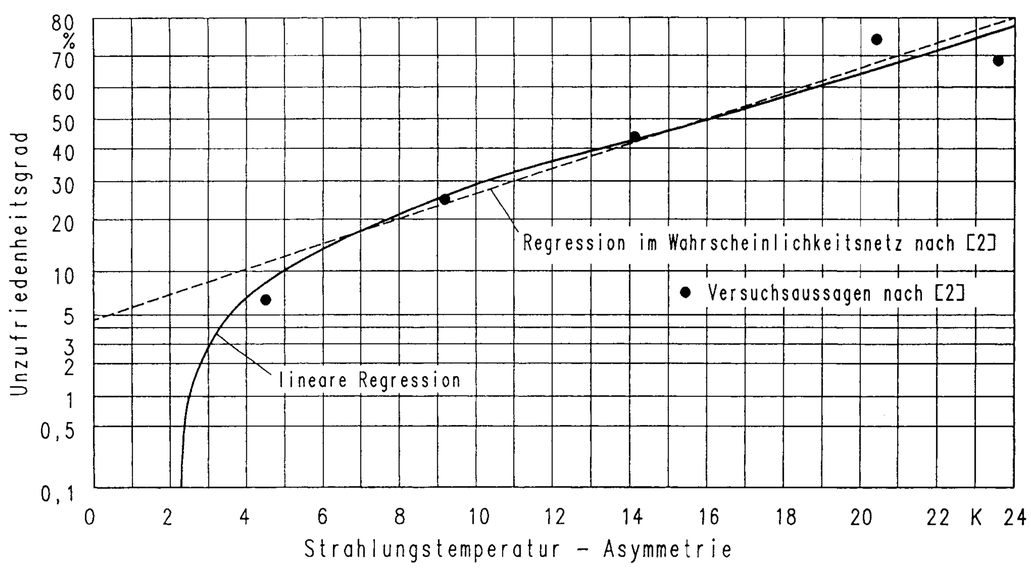

Bild 8. Ergebnisse des Versuches „Heizdecke" (Punkte) nach [2] und *Tab. 2* mit Regressionskurven. Bei der linearen Regression ergibt sich aufgrund der Ordinatenteilung (Wahrscheinlichkeitsnetz gemäß Fehlerintegral) der dargestellte Kurvenverlauf.

mit $\Delta t_{S,FE,zul}$ in K. Der Korrelationskoeffizient $R^2 = 0{,}952$ ist recht gut. Der Kurvenverlauf nach Gl. (7) – im *Bild 8* ergänzt –, gibt die Befragungsergebnisse ebenfalls sehr gut wieder und liefert außerdem einen plausibleren Kurvenverlauf für $\Delta t_{S,FE,zul} < 4$ K. Eine eigenmächtige Kurvenkorrektur – wie in [2] geschehen – ist nicht erforderlich.

4. Die gewählten Geometrien der aktiven Strahlungsflächen sind nicht immer praxisgerecht und untereinander nicht vergleichbar. Dies betrifft z. B. die Heizdecke nach *Bild 4* und die Kühldecke nach *Bild 5*. Die Strahlungsasymmetrie, die der Kopf bei der Heizdeckenanordnung empfindet (Schädeldecke empfängt Zustrahlung, Gesicht strahlt zur kühleren Umgebung ab) ist auf jeden Fall ungünstiger als bei der teilweisen Umschließung des Kopfes bei der Kühldeckenanordnung (Schädeldecke und Gesicht strahlen zu den gekühlten Flächen ab).
   Die Überlagerung der Ergebnisse im *Bild 7* zeigt, daß sich die Heizdecken überhaupt nicht in die Darstellungen für Kühlwände, Kühldecken und Heizwände einfügen.
5. Die in [6] erfolgten Umrechnungen der zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrien, die am gering bekleideten Menschen (0,1 clo) ermittelt wurden, auf normal bekleidete Menschen nach Gl. (4) und auf zur Strahlungsquelle ungünstig positionierte Körperflächen nach Gl. (5) tragen wegen der zahlreichen Annahmen spekulativen Charakter. Außerdem ist der Kopf stets unbekleidet. Die in [6] getroffenen Aussagen werden in [2] und [1] den neueren Ergebnissen nicht gegenübergestellt.

Versuch einer neuen, allgemein gültigen Auswertung der vorliegenden Versuchsdaten

Es wird versucht, die Bedeutung der Befragungsergebnisse unter praxisrelevanten Gesichtspunkten zu sehen. Deshalb seien vorab einige *Prämissen* formuliert.

1. Der Kopf des Menschen wird als wichtigster Sensor für die Strahlungsasymmetrie betrachtet. Da er im Raum stets unverhüllt ist, kann ein individuelles thermisches Unbehagen auch nicht durch veränderte Bekleidung ausgeglichen werden.
2. Die Höhe des Kopfes eines sitzenden Menschen über dem Fußboden wird mit 1,3 m angenommen.
3. Der Kopf wird zur mathematischen Erfassung der Strahlungstemperatur-Asymmetrie als würfelförmiges Element nachgebildet [9], wobei die Ober- und Unterfläche des Würfels parallel zur Decke bzw. zum Fußboden liegen. Die vertikalen Flächen des Würfels sind parallel zu den Wänden oder unter einem Winkel von 45° gedreht angeordnet.
   Die Strahlungstemperaturen der Umgebung $t_{Str,i}$ werden bezogen auf die Deck- und Seitenflächen i des Würfelelementes berechnet:

$$t_{Str,i} = \left[\sum_{j=1}^{n} \varphi_{i,j} \, (t_j + 273)^4 \right]^{0,25} - 273 \text{ in } ^\circ\text{C} \qquad (8)$$

mit

$\varphi_{i,j}$ Einstrahlzahl der Fläche i des würfelförmigen Elementes auf die Umfassungsfläche j

t_j Oberflächentemperatur der Umfassungsfläche j in °C

Die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert stellt die Strahlungstemperatur-Asymmetrie dar [9]:

$$\Delta t_{S,WE} = [t_{Str,i}]_{max} - [t_{Str,i}]_{min}. \qquad (9)$$

   Die Strahlungstemperatur auf die Würfelunterfläche bleibt unbeachtet, da in der Realität der Rumpf den Kopf bezüglich eines Strahlungsaustausches nach unten verschattet.
4. Aus den bekannten Versuchsdaten (Geometrie, Temperaturen, Unzufriedenheitsgrade) werden die maximalen Strahlungstemperatur-Asymmetrien rechnerisch bestimmt und zusammen mit den prozentualen Unzufriedenheitsgraden jeweils eine lineare Regressionsfunktion ermittelt.

Heizdecke

Bezug nehmend auf die Geometrie zu *Bild 4* und die in *Tab. 2* vermerkten Temperaturen berechnen sich die Strahlungstemperaturen für das Würfelelement:

obere Fläche

$$t_{Str,o} = [0{,}753\,(t_S + 273)^4 + 0{,}113\,(t_D + 273)^4 + + 0{,}134\,(t_W + 273)^4]^{0{,}25} - 273 \qquad (10)$$

untere Fläche (Berechnung nur zu Vergleichszwecken)

$$t_{Str,u} = [0{,}824\,(t_B + 273)^4 + + 0{,}176\,(t_W + + 273)]^{0{,}25} - 273 \qquad (11)$$

linke Fläche

$$t_{Str,l} = [0{,}200\,(t_S + 273)^4 + 0{,}363\,(t_B + 273)^4 + + 0{,}437\,(t_W + 273)^4]^{0{,}25} - 273. \qquad (12)$$

Damit ergeben sich die Strahlungstemperatur-Asymmetrien des Würfelelementes (oben – unten) $\Delta t_{S,WE,o\text{-}u}$ und (oben – links) $\Delta t_{S,WE,o\text{-}l}$, die in *Tab. 2* ergänzend eingetragen sind.

Zusammen mit $\Delta t_{S,FE}$ nach der *Fanger*-Definition gibt es drei verschiedene Asymmetrien, die nach *Tab. 2* mit zwei unterschiedlichen Unzufriedenheitsgraden (Kopf, Gesamtkörper) korreliert werden können. Für den Ursprungszusammenhang gilt

$$UZG_{FANGER,FE(0,6m)/GESAMT} = -8{,}0 + 3{,}61\,\Delta t_{S,FE} \text{ in } \% \quad (R^2 = 0{,}952). \qquad (13)$$

Für die Auswertung gemäß der vorgenannten Prämissen ist

$$UZG_{WE,o\text{-}l(1,3m)/KOPF} = -20{,}7 + 3{,}17\,\Delta t_{S,WE,o\text{-}l} \text{ in } \% \quad (R^2 = 0{,}975) \qquad (14)$$

relevant. Diese Regressionsgeraden und die jeweils zugehörigen Versuchspunkte sind im *Bild 9* eingetragen. Die übrigen ergänzten Regressionsgeraden dienen nur zur Orientierung. So ist beispielsweise $\Delta t_{S,WE,o\text{-}u}$ bezüglich der Auswertungsart gleich der Betrachtung eines beidseitig „bestrahlten" Flächenelementes $\Delta t_{S,FE}$. Vereinbarungsgemäß ist im ersten Fall die Bezugshöhe allerdings 1,3 m im zweiten Fall 0,6 m.

Es kann davon ausgegangen werden, daß man mit Gl. (14) auf der „sicheren" Seite liegt, da nach *Tab. 3* und [7] auch bei $\Delta t_{S,WE,o\text{-}l} = 15{,}6$ K kein Diskomfort festgestellt wurde. Allerdings waren bei den Versuchen mit hohen Strahlungsasymmetrien, die Empfindungstemperaturen um 0,9 bzw. 1,8 K abgesenkt worden.

Kühldecke

Ausgehend von *Bild 5* und *Tab. 4* liefert Gl. (8) die Strahlungstemperaturen bezogen auf die signifikanten Flächen des Würfelelementes:

obere Fläche

$$t_{Str,o} = [0{,}924\,(t_S + 273)^4 + + 0{,}076\,(t_L + 273)^4]^{0{,}25} - 273 \qquad (15)$$

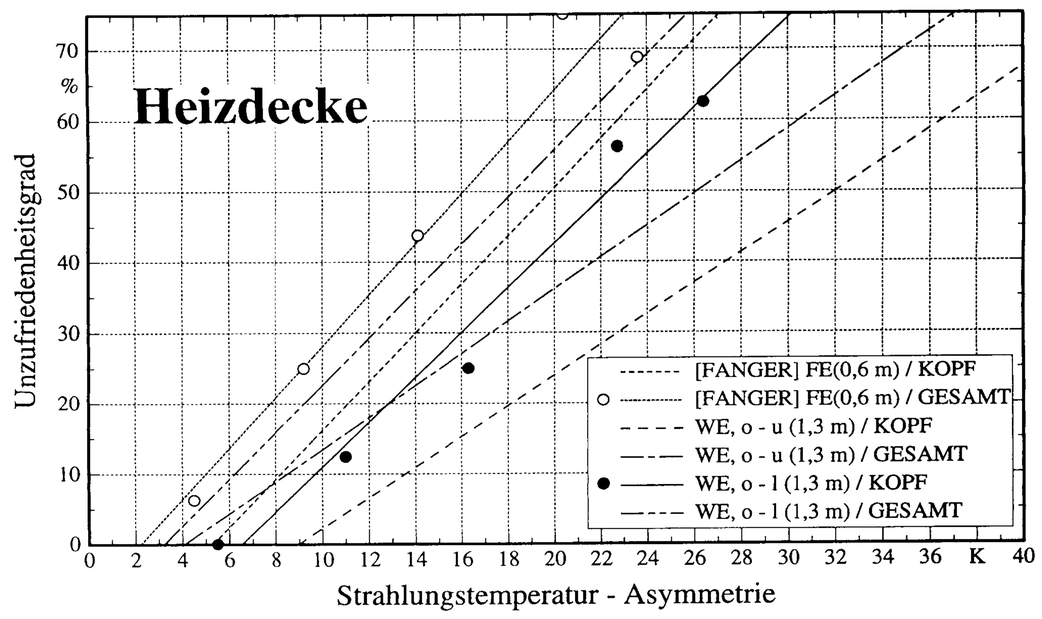

Bild 9. Unzufriedenheitsgrad in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für Heizdecken. Die Regressionsgraden sind aus Versuchsergebnissen (*Tab. 2*) ermittelt. Beispielhafte Eintragungen der Befragungswerte (Kreise gehören zur punktierten Linie, Punkte zur Vollinie) zeigen die Streuung.

Tabelle 4. Versuchsdaten und Auswertungen für Kühldecken [1].

Nr.	t_S °C	$t_L = t_W = t_B = t_D$ °C	$\Delta t_{S,FE}$ K	$\Delta t_{S,WE,o\text{-}u}$ K	$\Delta t_{S,WE,o\text{-}v}$ K	UZG %
1	16,0	24,1	4,4	7,4	4,6	1
2	12,1	25,8	7,5	12,5	7,8	1
3	7,9	27,2	10,5	17,6	11,1	1
4	3,9	28,7	13,0	22,5	14,4	6,5
5	0,8	29,7	15,0	26,2	16,9	6,5

untere Fläche (Berechnung nur zu Vergleichszwecken)

$$t_{Str,u} = [0{,}007\,(t_S + 273)^4 + + 0{,}993\,(t_L + 273)^4]^{0{,}25} - 273 \qquad (16)$$

vordere Fläche

$$t_{Str,v} = [0{,}362\,(t_S + 273)^4 + + 0{,}638\,(t_L + 273)^4]^{0{,}25} - 273. \qquad (17)$$

Die vordere Würfelfläche wird verwendet, weil diese die höchste Strahlungstemperatur liefert. Da gemäß Versuchsbeschreibung [1] und *Tab. 4*, die Temperaturen der inaktiven Umfassungsflächen gleich der Lufttemperatur sind, werde in den Gln. (15) bis (17) t_L verwendet.

Damit errechnen sich nach Gl. (9) die Strahlungstemperatur-Asymmetrien $\Delta t_{S,WE,o\text{-}u}$ und $\Delta t_{S,WE,o\text{-}v}$ (*Tab. 4*). Bezieht man $\Delta t_{S,FE}$ mit ein, so liefert die Zuordnung zu den Unzufriedenheitsgraden drei Regressionsgeraden (*Bild 10*). Für die beiden relevanten Definitionen gelten:

$$UZG_{FANGER,FE(0,6m)} = -2{,}85 + 0{,}60\,\Delta t_{S,FE} \text{ in } \% \quad (R^2 = 0{,}713) \qquad (18)$$

$$UZG_{WE,o\text{-}v(1,3m)} = -2{,}59 + 0{,}529\,\Delta t_{S,WE,o\text{-}v} \text{ in } \% \quad (R^2 = 0{,}751). \qquad (19)$$

Heizwand

Auf der Grundlage von *Bild 6* und *Tab. 5* folgen für die hintere und vordere Vertikalfläche des Würfelelementes gemäß Gl. (8) die Strahlungstemperaturen:

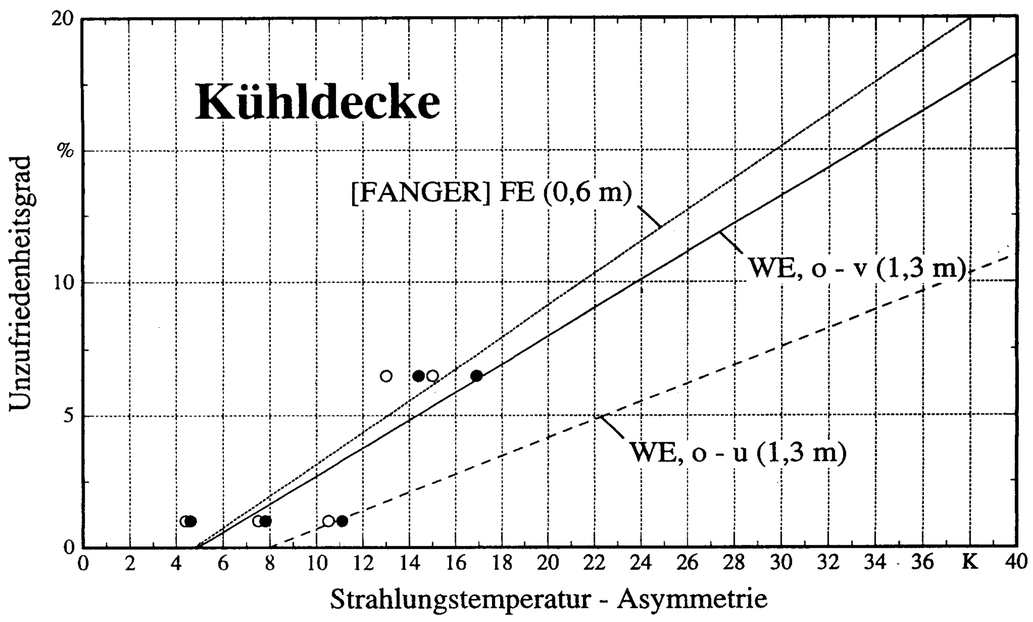

Bild 10. Unzufriedenheitsgrad in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für Kühldecken. Die Regressionsgraden sind aus Versuchsergebnissen (*Tab. 4*) ermittelt. Beispielhafte Eintragungen der Befragungswerte (Kreise gehören zur punktierten Linie, Punkte zur Vollinie) zeigen die Streuung.

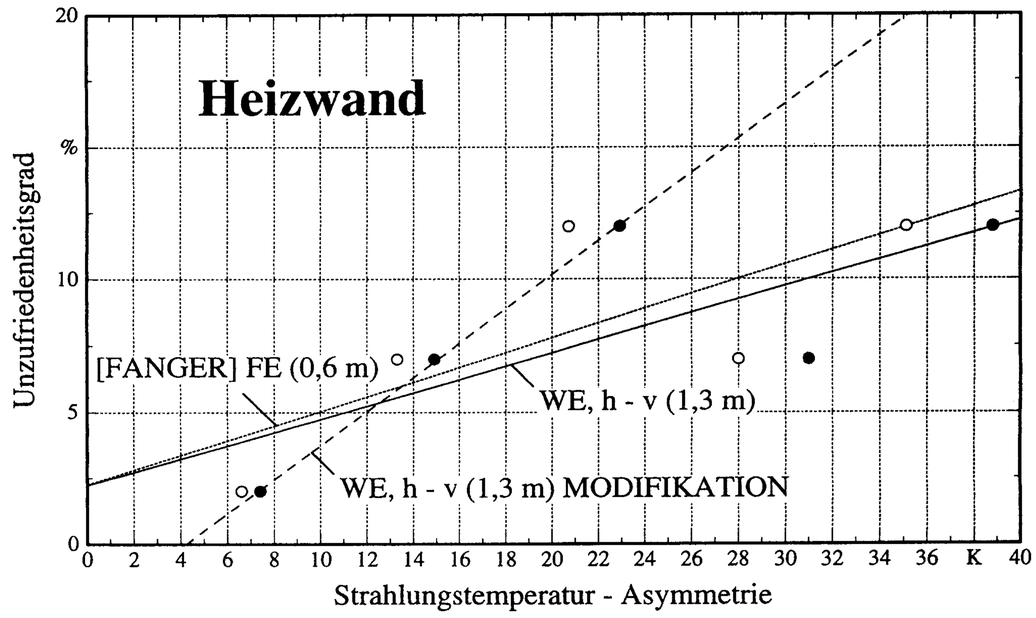

Bild 11. Unzufriedenheitsgrad in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für Heizwände. Die Regressionsgraden sind aus Versuchsergebnisse (*Tab. 5*) ermittelt. Eintragungen der Befragungswerte (Kreise gehören zur punktierten Linie, Punkte zur Vollinie) zeigen die starke Streuung.

hintere Fläche

$$t_{Str,h} = [0{,}676\,(t_S + 273)^4 + 0{,}324\,(t_L + 273)^4]^{0{,}25} - 273 \qquad (20)$$

vordere Fläche

$$t_{Str,v} = t_L, \qquad (21)$$

wobei t_L wiederum stellvertretend für alle Oberflächentemperaturen der inaktiven Umfassungen steht. Gl. (9) liefert $\Delta t_{S,WE,h\text{-}v}$ *Tab. 5*).

Mit den Unzufriedenheitsgraden nach *Tab. 5* folgt weiter:

$$UZG_{FANGER,FE(0,6m)} = 2{,}26 + 0{,}277\,\Delta t_{S,FE} \quad \text{in \%} \quad (R^2 = 0{,}563) \qquad (22)$$

$$UZG_{WE,h\text{-}v(1,3m)} = 2{,}22 + 0{,}251\,\Delta t_{S,WE,h\text{-}v} \quad \text{in \%} \quad (R^2 = 0{,}562). \qquad (23)$$

Da auch beim Würfelelement der höchste Strahlungstemperatur-Unterschied zwischen der hinteren und vorderen Fläche auftritt, entspricht dies praktisch der Definition der Strahlungsasymmetrie für ein vertikales Flächenelement. Unterschiedlich sind allerdings die Bezugshöhen.

Grundsätzlich ist die Unsicherheit der in [1] gegebenen Versuchswerte sehr groß (s. *Tab. 5*), was die niedrigen Korrelationskoeffizienten verdeutlichen. Es ist auch die einzige Versuchsreihe, die bei $\Delta t_S = 0$ noch Unzufriedenheit angibt. Würde man spekulativ nur die ersten drei Versuchswerte verwenden, so erhielte man die Modifikation

$$UZG_{WE,h\text{-}v(1,3m),Mod} = -2{,}72 + 0{,}645\,\Delta t_{S,WE,h\text{-}v} \quad \text{in \%} \quad (R^2 = 1{,}000). \qquad (24)$$

Die Gln. (22) bis (24) sind in *Bild 11* ausgewertet.

Kühlwand

Die Versuchsdurchführung erfolgte völlig analog zur Heizwand. Deshalb gelten für die Strahlungstemperaturen weiterhin die Gln. (20) und (21). Mit den in *Tab. 6* vermerkten Werten folgen:

$$UZG_{FANGER,FE(0,6)} = -20{,}9 + 3{,}16\,\Delta t_{S,FE} \quad \text{in \%} \quad (R^2 = 0{,}818) \qquad (25)$$

$$UZG_{WE,h\text{-}v(1,3m)} = -22{,}1 + 3{,}23\,\Delta t_{S,WE,h\text{-}v} \quad \text{in \%} \quad (R^2 = 0{,}832). \qquad (26)$$

Beide Kurven sind im *Bild 12* dargestellt. Sie unterscheiden sich erwartungsgemäß kaum voneinander.

Kombinierte Heiz- und Kühlwand

Wertet man die Versuche, die in *Bild 2* und *Tab. 1* zusammengefaßt sind, aus und bezieht die thermischen Gegebenheiten sowie die geäußerten Unzufriedenheitsgrade auf das Empfinden des Kopfes, so ergeben sich nachfolgende zusammengefaßte Aussagen gemäß Gl. (8):

linke Fläche

$$t_{Str,l} = [0{,}326\,(28 + \Delta t_{EW} + 273)^4 + 0{,}674\,(28 + 273)^4]^{0{,}25} - 273 \qquad (27)$$

Tabelle 5. Versuchsdaten und Auswertungen für Heizwand [1].

Nr.	t_S °C	$t_L = t_W = t_B = t_D$ °C	$\Delta t_{S,FE}$ K	$\Delta t_{S,WE,h\text{-}v}$ K	UZG %
1	32,6	21,9	6,6	7,4	2
2	42,0	20,7	13,3	14,9	7
3	51,6	19,3	20,7	22,9	12
4	61,1	17,9	28,8	31,0	7
5	70,1	16,7	35,1	38,8	12

Tabelle 6. Versuchsdaten und Auswertungen für Kühlwand [1].

Nr.	t_S °C	$t_L = t_W = t_B = t_D$ °C	$\Delta t_{S,FE}$ K	$\Delta t_{S,WE,h\text{-}v}$ K	UZG %
1	17,8	25,9	5,3	5,4	4
2	13,3	27,1	8,6	9,1	1
3	8,7	28,1	12,8	12,7	10
4	4,1	29,0	16,6	16,1	30
5	0,4	29,6	18,2	18,7	45

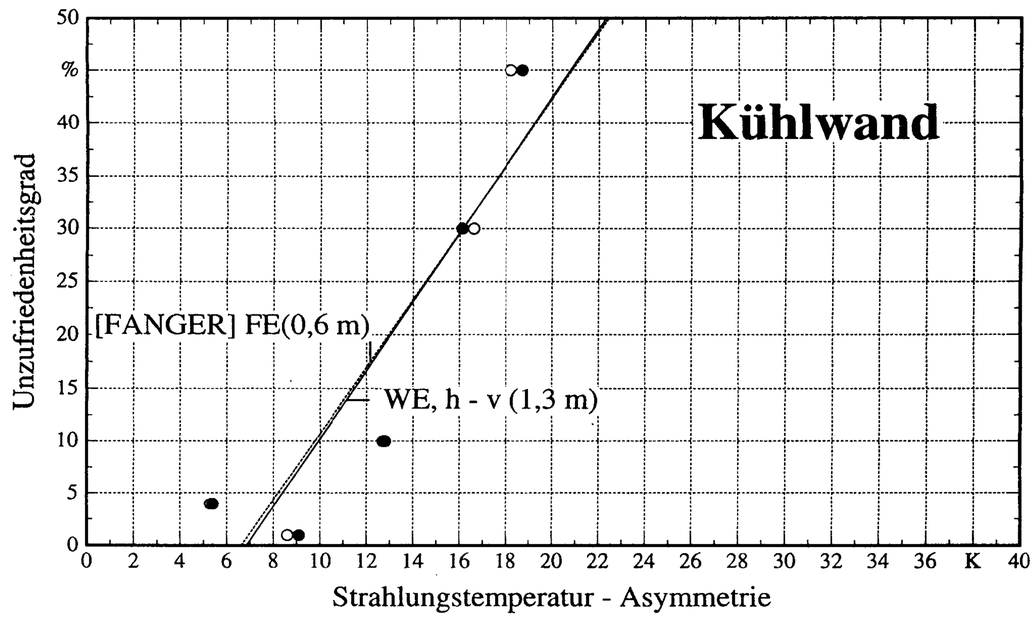

Bild 12. Unzufriedenheitsgrad in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für Kühlwände. Die Regressionsgraden sind aus Versuchsergebnissen (*Tab. 6*) ermittelt. Eintragungen der Befragungswerte (Kreise gehören zur punktierten Linie, Punkte zur Vollinie) zeigen die Streuung.

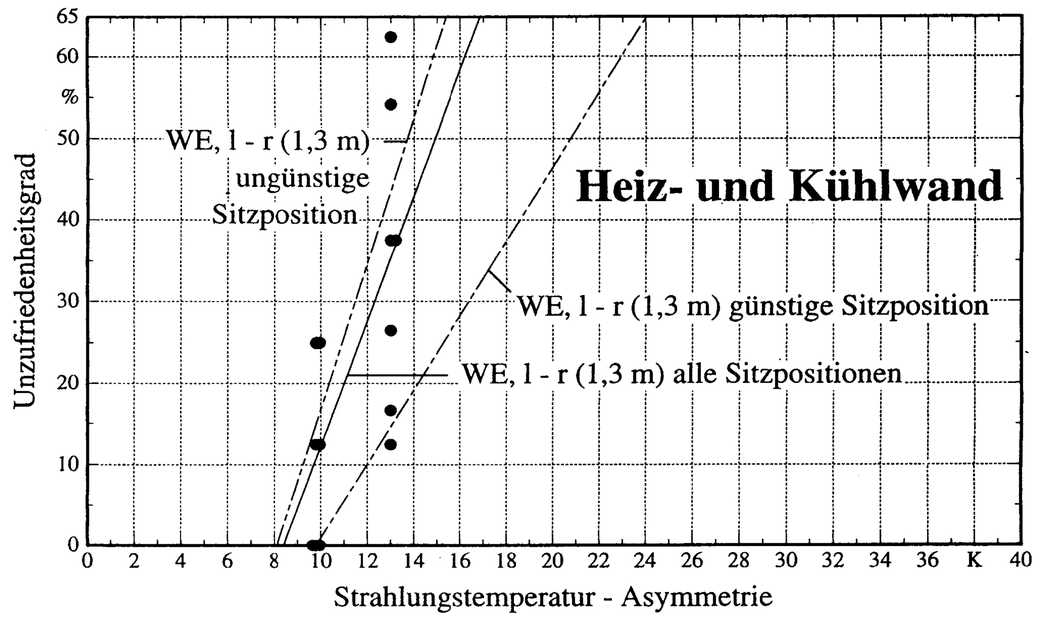

Bild 13. Unzufriedenheitsgrad in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie in einem Raum mit einer Heiz- und einer gegenüberliegenden Kühlwand. Die Regressionsgraden sind aus Versuchsergebnissen (*Tab. 1*) ermittelt. Die eingetragenen Punkte gehören zur Vollinie und zeigen die starke Streuung.

rechte Fläche

$$t_{Str,r} = [0{,}326\,(28 - \Delta t_{EW} + 273)^4 + \\ + 0{,}674\,(28 + 273)^4]^{0{,}25} - 273. \qquad (28)$$

Dabei wurde als behagliche Empfindungstemperatur für den nahezu unbekleideten Menschen 28 °C gewählt. Im realen Versuchsablauf war dieser Wert vor Einstellung einer Strahlungsasymmetrie individuell wählbar. Gl. (9) liefert – aus Gln. (27) und (28) folgend – die Strahlungstemperatur-Asymmetrien $\Delta t_{S,WE,l\text{-}r}$ (*Tab. 1*).

Wertet man die ungünstigen Sitzpositionen (kalt: links, rechts oder hinten), die günstigen Sitzpositionen (kalt: vorn) sowie alle Sitzpositionen gemeinsam mit den Angaben nach *Tab. 1* aus, so folgen die Regressionsgeraden:

$$UZG_{WE,l\text{-}r(1,3\,m),u} = -72{,}7 + 8{,}950\,\Delta t_{S,WE,l\text{-}r} \\ \text{in } \% \quad (R^2 = 0{,}617) \qquad (29)$$

$$UZG_{WE,l\text{-}r(1,3\,m),g} = -44{,}7 + 4{,}563\,\Delta t_{S,WE,l\text{-}r} \\ \text{in } \% \quad (R^2 = 0{,}960) \qquad (30)$$

$$UZG_{WE,l\text{-}r(1,3\,m),a} = -64{,}7 + 7{,}696\,\Delta t_{S,WE,l\text{-}r} \\ \text{in } \% \quad (R^2 = 0{,}430). \qquad (31)$$

Die Verläufe sind aus *Bild 13* ersichtlich.

Zusammenfassung der Einzelkurven

Die Übertragung der neu gewonnenen Einzelkurven in ein gemeinsames Diagramm mit logarithmisch geteilter Ordinate (*Bild 14*) zeigt nachfolgende Besonderheiten.

Heizdecke und Kühlwand weisen fast identische Kurvenverläufe $UZG = f(\Delta t_{S,WE})$ auf. Die Kurvenzüge für die Kühldecke und die Heizwand kommen sich ebenfalls nahe, wobei nochmals die relativ schlechte Korrelation für die Heizwand angemerkt sei.

Der Bereich für die als zulässig ermittelten Strahlungstemperatur-Asymmetrien beim kombinierten Heiz-Kühlwand-Versuch ist weitgehend deckungsgleich mit der Grenzkurve für die Kühlwand. Dies erscheint logisch, da die zulässige Temperatursymmetrie für die Kühlwand bedeutend niedriger als für die Heizwand ist.

Für den interessierenden Behaglichkeitsbereich mit einem Unzufriedenheitsgrad von 5 bis 10 % ergeben sich endgültig die in *Bild 15* gezeigten Zusammenhänge. Obwohl die gleichen Versuchsdaten zugrunde liegen, unterscheiden sich die *Bilder 7* und *15* in einigen Positionen beträchtlich. Es seien die zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrien bei einem Unzufriedenheitsgrad von 5 % gegenübergestellt:

	$\Delta t_{S,zul,bisher}$ K	$\Delta t_{S,zul,neu}$ K
Heizdecke	4	8,1
Kühldecke	14	14,3
Heizwand	23	11,1
Kühlwand	10	8,4

Versuch einer Deutung

Es wird davon ausgegangen, daß der Mensch nicht die Strahlungstemperatur-Asymmetrie direkt empfindet – zumindest nicht im Komfortbereich –, sondern daß ursächlich der Wärmestrom von der Haut an die Umgebung maßgebend ist. Die Größe des Wärmestromes bewirkt eine Änderung der Hauttemperatur, wodurch dann die Thermorezeptoren differenziert ansprechen. Der Wärmestrom $\dot{q}_H$, der von der Haut abgegeben wird, setzt sich aus Konvektion und Strahlung zusammen, so daß gilt

$$\dot{q}_H = \alpha_K\,(t_K - t_L) + \sigma\varepsilon\,[(t_K + 273)^4 - \\ - (t_{Str} + 273)^4] \qquad (32)$$

mit

α_K Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion
σ Strahlungskonstante ($\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴)
ε Emissionskoeffizient ($\varepsilon \approx 0{,}92$)

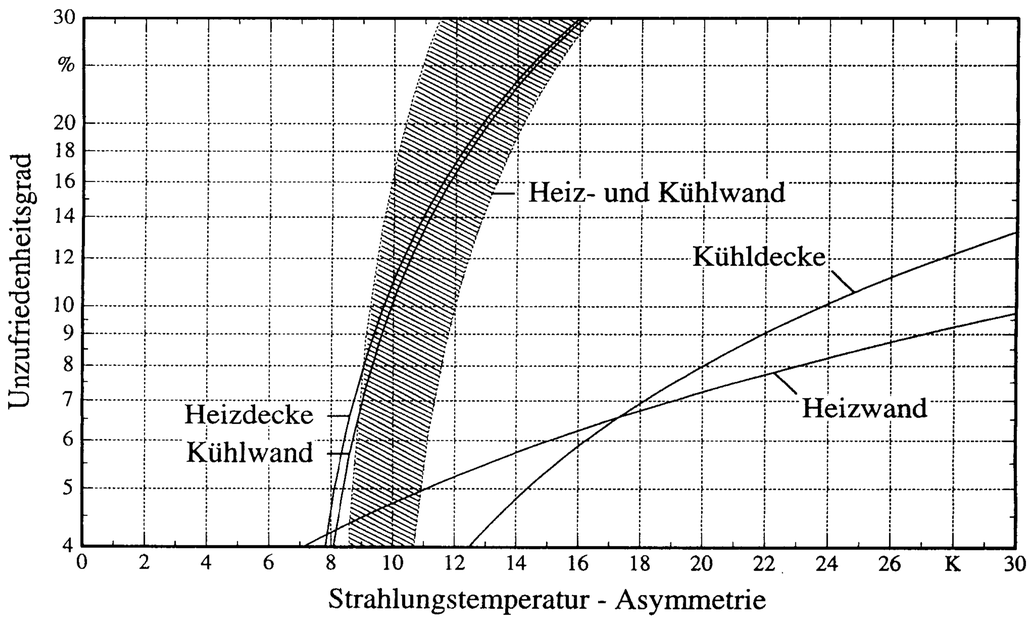

Bild 14. Zusammenfassung der aus den *Bildern 9* bis *12* ermittelten Grenzkurven (Vollinien-Geraden wurden übernommen) und des Gesamtbereiches aus *Bild 13*.

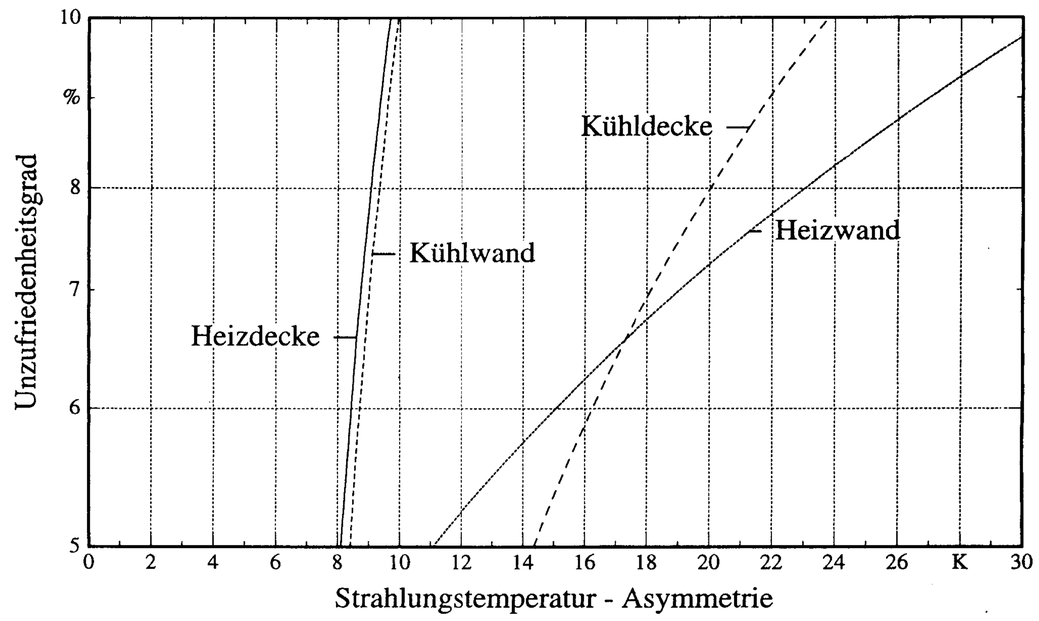

Bild 15. Endgültiger Vorschlag für die zulässigen Strahlungstemperatur-Asymmetrien für verschiedene thermisch-aktive Raumumfassungen.

t_K Temperatur des Kopfes (Stirntemperatur)
t_L Lufttemperatur
t_{Str} Strahlungstemperatur.

Im weiteren werden $t_K = 31{,}5\,°C$, $t_L = 20\,°C$ und $t_{Str} = 20\,°C \pm \Delta t_{S,WE}$ gesetzt und für die zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie $\Delta t_{S,WE}$ der zu UZG = 5% gehörige Wert gewählt. Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten am menschlichen Kopf werden entsprechend [10] für ruhende Luft entnommen. Für α_K in $W/(m^2K)$ gelten: Stirn 2,5; Schläfen 2,0; Nacken 3,5; Schädeldecke 1,0. Damit werden gesetzt:

$$\alpha_{K,vertikal} = 2{,}5\ W/(m^2K);$$
$$\alpha_{K,horizontal} = 1{,}0\ W/(m^2K).$$

Es folgen die Wärmeströme:

	Wärmeströme $\dot{q}_H$ in W/m^2 an den durch die Asymmetrie Δt_S beeinflußten Kopfflächen	
	Stirn, Nacken, Schläfen	Schädeldecke
Heizdecke		31
Kühldecke		145
Heizwand	31	
Kühlwand	135	
homogene Umgebung $\Delta t_S = 0$	93	75

Diese Zahlen beinhalten natürlich die Unsicherheiten der Wärmeübergangs- und Emissionskoeffizienten. Auch wäre es denkbar, die Lufttemperatur die den Kopf umströmt, höher als mit 20 °C anzusetzen, da sie an der Rumpfoberfläche schon vorgewärmt wurde. Dennoch ist sehr bemerkenswert, daß die Wärmeströme für Heizdecke und -wand sowie Kühldecke und -wand nahezu die gleiche Größe aufweisen. Dies bedeutet, daß im Komfortbereich die entscheidende wärmephysiologische Größe auch für partikuläre Körperflächen der *Wärmestrom des Menschen an die Umgebung* ist. Er läge nach vorstehender Berechnung bei ruhiger Luft zwischen 30 und 140 W/m^2. Die Messungen [1; 2] erfolgten bei Luftgeschwindigkeiten kleiner 0,1 m/s. Damit sind diese Werte auf moderne Raumlüftungssysteme übertragbar.

Wenn der zulässige Wärmestrombereich ($\dot{q}_{H,min} \cdots \dot{q}_{H,max}$) für partielle Körperoberflächen gesichert vorliegt, dann kann aus Gl. (32) die zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit und der Lufttemperatur bestimmt werden. Im umgekehrten Schluß könnten auch Aussagen zur zulässigen Luftgeschwindigkeit (Zuggrenze) als Funktion der Luft- und Strahlungstemperatur getroffen werden. Unter Einbeziehen von [11] sind weitreichende Auswertungen denkbar.

Literatur

[1] *Fanger, P.O., Ipsen, B.M., Langkilde, G., Olesen, B.W., Christensen, N.K.* and *Tanabe, S.:* Comfort Limits for Asymmetric Thermal Radiation. Energie and Buildings 8 (1985), S. 225–236.

[2] *Fanger, P.O., Bánhidi, L., Olesen, B.W.* and *Langkilde, G.:* Comfort Limits for Heated Ceilings. ASHRAE Trans. 86 (2) (1980), S. 141–156.

[3] *Kollmar, A.* und *Liese, W.:* Strahlungsheizung 4. Aufl. München, Wien: Verlag R. Oldenbourg 1957.

[4] *Macskásy, Á.:* Központi Fütés (Teil II). Budapest: Tankönyvkiadó 1978.

[5] *Glück, B.:* Strahlungsheizung – Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen; Karlsruhe: Verlag C.F. Müller 1982.

[6] *Olesen, S., Fanger, P.O., Jensen, P.B.* and *Nielsen, O.J.:* Comfort limits for Man exposed to Asymmetric Thermal Radiation. Symposium: Thermal Comfort and Moderate Heat Stress, Buildings Research Station, London. September 1972. Published by HMSO 1973, S. 133–148.

[7] *Griffiths, I.S.* and *McIntyre, D.A.:* Subjective response to overhead thermal radiation. Human Factors 16 (3) (1974), S. 415–422.

[8] *Fanger, P.O., Angelius, O.* and *Kjerulf-Jensen, P.:* Radiation Data for the Human Body. ASHRAE Trans. 76 (2) (1970) S. 338–373.

[9] *Glück, B.:* Bewertungsmaßstab zur optimalen Anordnung von Heiz- und Kühlflächen im Raum. Gesundheits-Ingenieur 112 (1991) H. 2, S. 65–71.

[10] *Mayer, E.:* Eine neue Bewertungsgröße für Luftbewegung im Raum. Klima-Kälte-Heizung (1992) H. 5, S. 165–168.

[11] *Glück, B.:* Empfindungstemperatur und ihre Meßbarkeit. Gesundheits-Ingenieur 114 (1993) H. 3, S. 134–142.