Gesundheits Ingenieur

Haustechnik · Bauphysik · Umwelttechnik

Herausgegeben von K. W. USEMANN 112. Jahrgang 1991 · Heft 2 · Seite 65–116

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

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

Bewertungsmaßstab zur optimalen Anordnung von Heiz- und Kühlflächen im Raum

Bernd Glück

Thermisch aktive Raumumfassungen spielten in der Heizungstechnik schon immer eine besondere Rolle. Ihr Einsatz hatte stets etwas Extravagantes an sich. Dies galt für die römische Hypokaustenheizung, die Einführung der Deckenheizung und die Wiederentdeckung der Fußbodenheizung ebenso wie für die Aufgabenerweiterung der thermisch aktiven Flächen zur Wärmelastabführung z. B. für Kühldecken.

Die in die Umfassung integrierten Heiz- und Kühlflächen erfüllen hohe ästetische Ansprüche und sind somit bei Bauherren und Architekten gleichermaßen beliebt. Aus energetischer Sicht sind thermisch aktive Raumumfassungen ebenfalls vorteilhaft, da man mit Heiz- bzw. Kühlmedientemperaturen auskommt, die sich weniger von den Raumtemperaturen unterscheiden als bei kompakten Heizkörpern und Luftkühlern.

Die thermisch aktiven Großflächen zeichnen sich durch einen relativ hohen Strahlungsanteil aus. Dies gestattet einerseits eine freizügige Anordnung, da der Strahlungswärmeaustausch unabhängig von Schwerkraft, Strömungsgesetzen usw. wirkt, andererseits erfordert dies aber detaillierte Untersuchungen der auftretenden Strahlungsasymmetrie, die thermisch unbehaglich sein kann.

In diese Untersuchungen sind natürlich alle Raumumfassungen (aktive und passive) einzubeziehen. Bedeutenden Einfluß nehmen dabei Fenster- oder vollverglaste Außenwandflächen.

Dr. sc. techn. Dr.-Ing. Bernd Glück, c/o Rud. Otto Meyer.

1. Notwendige Bedingung für die thermische Behaglichkeit

Ausgehend von der *FANGER*schen Behaglichkeitsgleichung können bei Strahlungsheizungen und -kühlungen einige Einflußgrößen durch praktische Mittelwerte ersetzt werden. So liegen die thermisch bedingten Raumluftströmungen unter dem Grenzwert von 0,1 m/s, der Einfluß der Raumluftfeuchte ist von untergeordneter Bedeutung und die Aktivitätsstufen sowie der Wärmeleitwiderstand der Bekleidung der Personen in Wohn- und Büroräumen variieren nur in engen Grenzen.

Damit kann als Raumtemperatur t_i ($\equiv$ Empfindungstemperatur t_E) am Standort P

$$t_{i,P} \equiv t_{E,P} = 0{,}5(t_{L,P} + t_{U,P}) \tag{1}$$

mit

t_L Lufttemperatur
t_U Strahlungstemperatur der Umgebung, bezogen auf den Menschen

definiert werden. Ihre Größe darf außentemperaturabhängig in den Grenzen von 20 °C bis 26 °C schwanken. Die Strahlungstemperatur t_U berechnet sich unter der Voraussetzung, daß die Emissionskoeffizienten ε der einzelnen Umfassungsflächen nahezu gleich sind, zu

$$t_U = \left[\sum_{k=1}^{n} \Phi_{M,k} (t_k + 273{,}15\,\mathrm{K})^4 \right]^{0,25} - 273{,}15\,\mathrm{K}\,. \tag{2}$$

Die Einstrahlzahlen $\Phi_{M,k}$ von sitzenden, stehenden und sich um ihre Achse drehenden Menschen auf horizontale und vertikale Rechteckflächen k sind in [1] diagrammatisch angegeben. Da für $\Phi_{M,k}$ keine analytischen Beziehungen existieren, die Bezugsrechteckflächen die realen Geometrien nicht ausreichend wiedergeben und die jeweilige Körperposition ohnehin unbekannt ist, wird anstelle von $\Phi_{M,k}$ die Einstrahlzahl einer infinitesimalen Kugel $\varphi^{\circ}_{P,k}$ am Standort P auf die Umfassungsflächen k verwendet. *Windisch* wies in [2] nach, daß die Unterschiede zwischen φ° und Φ im praktischen Bereich unter Berücksichtigung der möglichen Variationen akzeptierbar sind. Damit berechnet sich die Strahlungstemperatur der Umgebung, bezogen auf den Punkt P, zu

$$t_{U,P} = \left[\sum_{k=1}^{n} \varphi^{\circ}_{P,k} (t_k + 273{,}15\,K)^4 \right]^{0,25} - 273{,}15\,K. \quad (3)$$

Es sei noch angemerkt, daß nach [3] die Einstrahlzahlen von infinitesimalen Kugeln und von graustrahlenden, endlich großen Kugeln auf die jeweils betrachteten Bezugsflächen gleich sind, wenn ihre Mittelpunkte übereinstimmen.

2. Hinreichende Bedingung für die thermische Behaglichkeit

Besondere Bedeutung unter den partikulären Kriterien hat bei Flächenheiz- und -kühlsystemen die Strahlungsasymmetrie.

2.1 Bisherige Definition der Strahlungsasymmetrie

In [4] wurden die im *Bild 1* gezeigten Zuordnungen von Strahlungsasymmetrie und Unzufriedenheitsgrad experimentell ermittelt. Die Strahlungsasymmetrie ist gemäß [4] definiert als die Differenz der Strahlungstemperaturen, die bezogen auf die 2 Seiten eines Flächenelementes gebildet werden. Das Flächenelement soll dabei in einer Höhe von 0,6 m über dem Fußboden angeordnet sein und parallel zu den Oberflächen mit den größten Temperaturunterschieden liegen. Das heißt, bei Heiz- oder Kühldecken wäre das Flächenelement waagerecht, bei Heiz- oder Kühlwänden senkrecht zu orientieren.

Diese Regelung, die auch in die DIN 1946 Teil 2 aufgenommen werden soll, entspricht jedoch in den meisten Fällen *nicht* den realen Gegebenheiten, denn die häufigste Zuordnung der Flächen mit den Temperaturextremen ist rechtwinklig. Dies gilt beispielsweise für die Fälle: Heizdecke – kalte Außenwand mit Fenster; Kühldecke – sonnenbestrahlte Außenwand mit Fenster. Demgegenüber dürften beheizte Innenwände, die Außenwänden gegenüber liegen, keine praktische Bedeutung haben. Eckräume mit zwei Außenwänden, die wärmephysiologisch besonders intensiv zu unterscheiden wären, entziehen sich bei der zugrunde liegenden Definition einer exakten Betrachtung vollkommen.

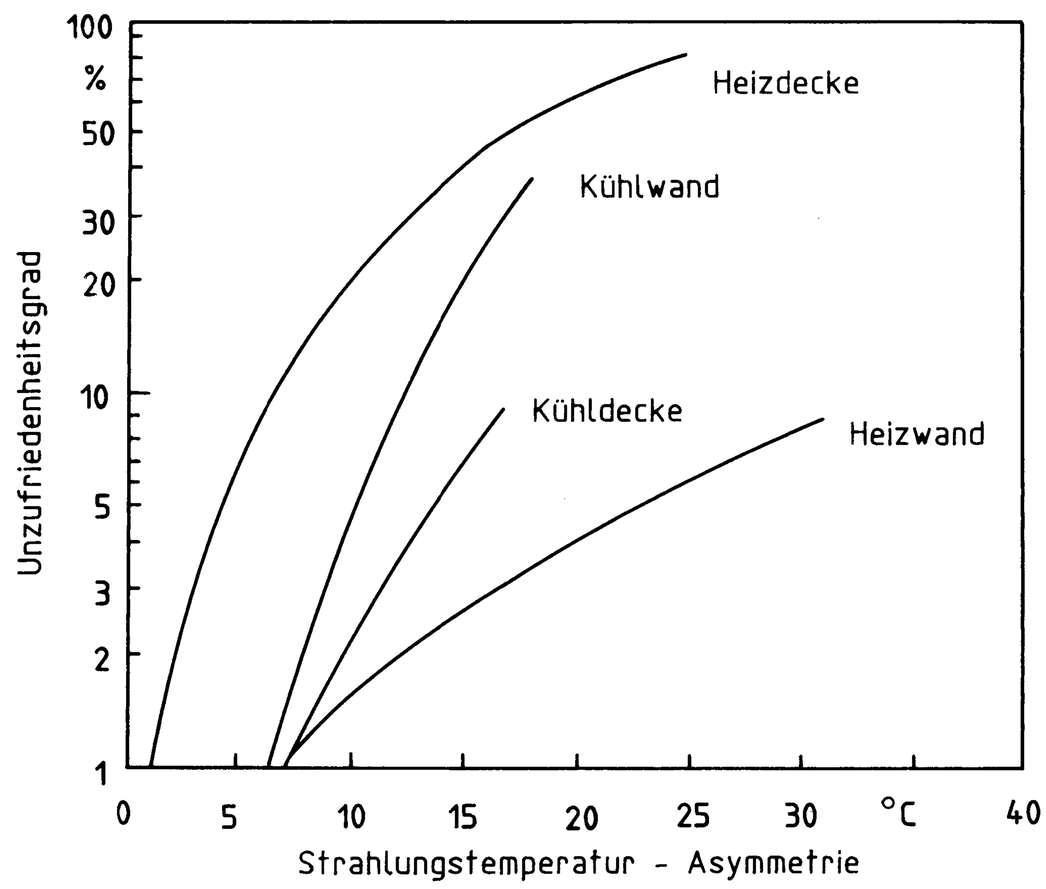

Bild 1. Unzufriedenheitsgrad in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie und der thermisch aktiven Umfassungsflächen.

Bemerkenswerte Strahlungsasymmetrien zwischen parallelen Flächen treten bei Kühldecken in Großraumbüros in Raummitte auf. Hierbei sind beachtliche Unterschiede zwischen der Kühldecke und der Tischebene – auf deren Höhe sich die Bürogeräte befinden – zu verzeichnen. Unter Beachten dieser Einflüsse sind dann auch Untersuchungen der Strahlungsasymmetrie in Kopfhöhe relevant, weniger die Orientierung auf eine Prüfhöhe von 0,6 m über Fußboden.

2.2 Vorschlag für eine neue Definition zur Strahlungsasymmetrie

Den Raumgeometrien, der Körperform des Menschen – vornehmlich des Kopfes – und den analytischen sowie meßtechnischen Ermittlungsmöglichkeiten Rechnung tragend, wird ein Würfel – bestehend aus 6 Flächenelementen – als Prüfkörper vorgeschlagen.

Die Strahlungstemperaturen werden rechnerisch, bezogen auf jede Fläche des Würfelelementes, ermittelt ($t_{S,1}, \ldots, t_{S,6}$) und die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Strahlungstemperatur als Strahlungstemperatur-Asymmetrie Δt_S am Standort des Würfelelementes P bezeichnet. Es gilt somit

$$\Delta t_{S,P} = [\mathrm{MAX}(t_{S,1}, \ldots, t_{S,6}) - \mathrm{MIN}(t_{S,1}, \ldots, t_{S,6})]_P\,. \quad (4)$$

Um die Einflüsse von thermisch aktiven Fußböden und Decken auf den Menschen vollumfänglich zu erfassen, sind 2 Würfelflächen parallel dazu anzuordnen. Die Würfelstellung in der Horizontalen sollte einmal flächenparallel zu den Wänden – mit dem in Gl. (4) dargestellten Ergebnis – und in einer zweiten Variante um 45° gedreht sein. Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie ergibt sich bei Querstellung zu

$$\Delta t_{Sq,P} = [\mathrm{MAX}(t_{Sq,1}, \ldots, t_{Sq,6}) - \mathrm{MIN}(t_{Sq,1}, \ldots, t_{Sq,6})]_P\,. \quad (5)$$

Mit diesen beiden Anordnungsvarianten des Würfelelementes ist es möglich, die Strahlungsverhältnisse bei Räumen mit 1 und 2 Außenwänden, 1 und 2 Heiz- bzw. Kühlwänden usw. wirklichkeitsnah zu erfassen. Die Strahlungstemperatur, bezogen auf 1 Würfelseite i am Prüfpunkt P, berechnet sich für einen Würfel in

Parallelstellung

$$t_{S,i,P} = \left[\sum_{k=1}^{n} \varphi_{i,P,k} (t_k + 273{,}15\ \mathrm{K})^4 \right]^{0,25} - 273{,}15\ \mathrm{K}\,. \quad (6)$$

Querstellung

$$t_{Sq,i,P} = \left[\sum_{k=1}^{n} \varphi q_{i,P,k} (t_k + 273{,}15\ \mathrm{K})^4 \right]^{0,25} - 273{,}15\,\mathrm{K}. \quad (7)$$

Die Strahlungstemperaturen, bezogen auf die Würfelgrund- und -deckflächen, sind bei beiden Varianten gleich.

Generell könnte man den Größtwert von $\Delta t_{S,P}$ und $\Delta t_{Sq,P}$ als die endgültige Strahlungstemperatur-Asymmetrie be-

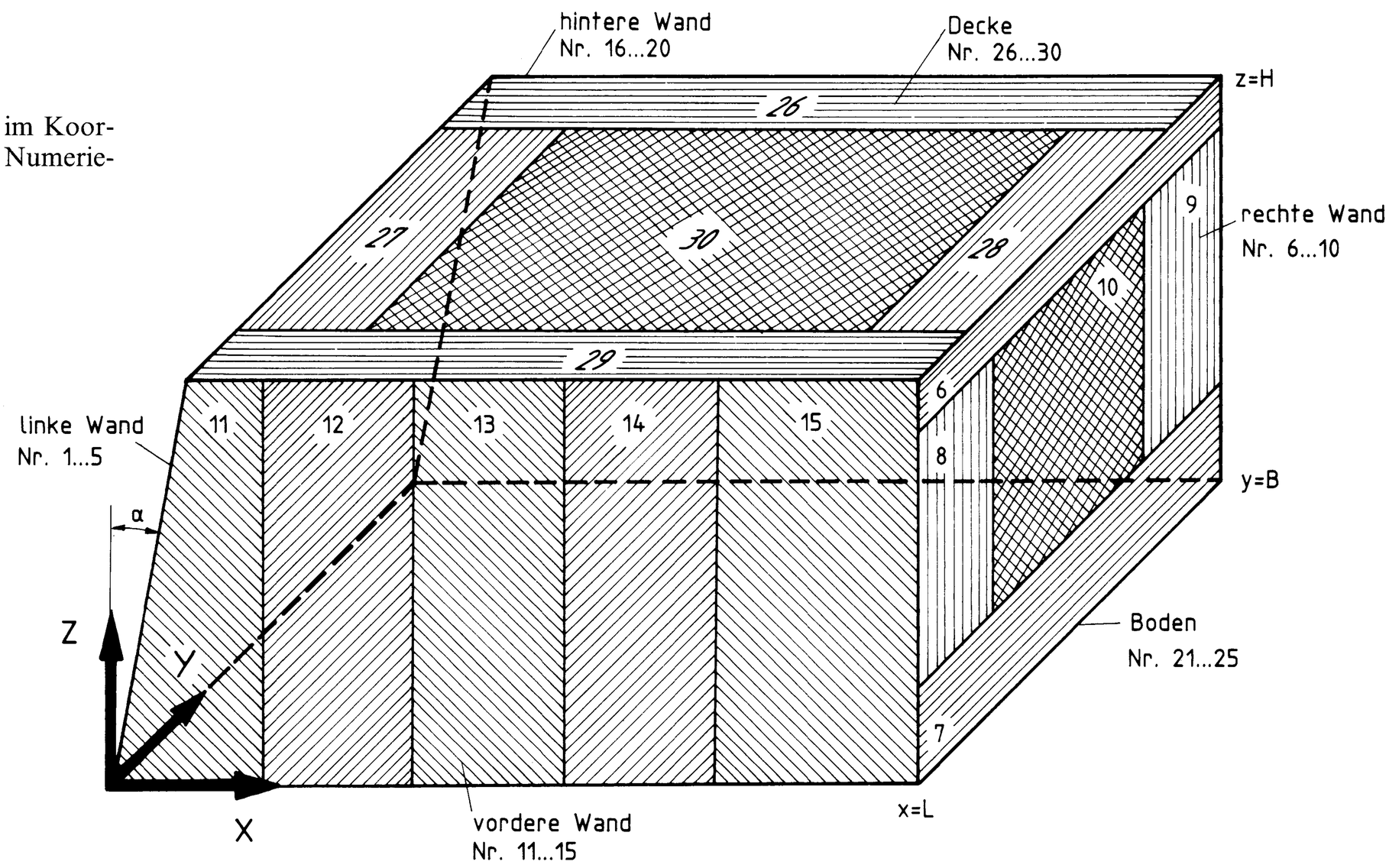

Bild 2. Modellraum im Koordinatensystem und Numerierung der Flächen.

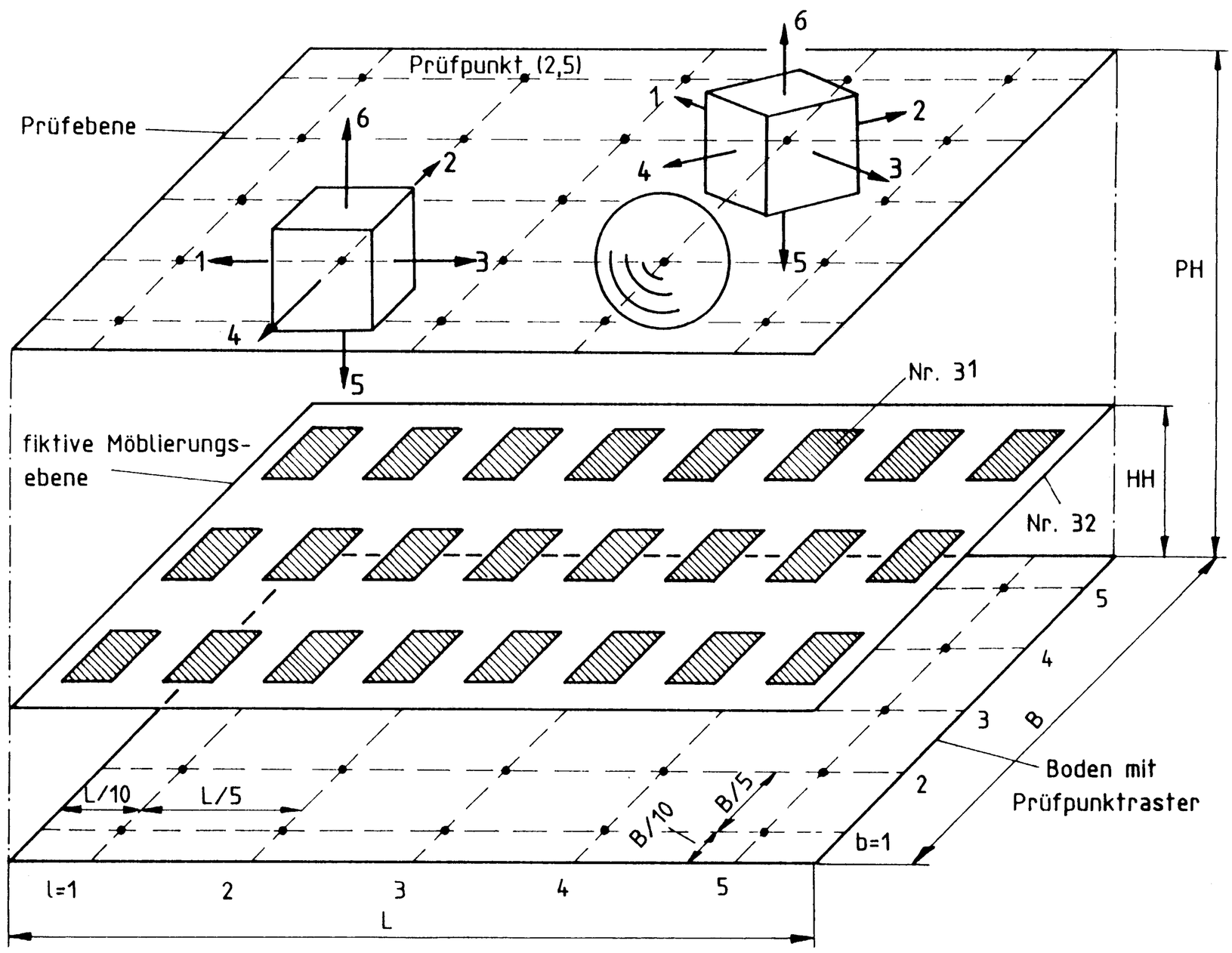

Bild 3. Grundfläche des Modellraumes mit Prüfpunktraster, darüber liegender fiktiver Möblierungsebene und Charakterisierung der für die Berechnung verwendeten Prüfkörper.

zeichnen. Sind der Möblierungsplan und damit die Sitzpositionen der Personen noch frei wählbar, so wäre auch die Wahl des Kleinstwertes von beiden Größen legitim.

Gemäß *Bild 1* kann die Strahlungstemperatur-Asymmetrie je nach Orientierung der Flächen und nach thermischem Vorgang unter Annahme von 5% Unzufriedenen zwischen 4 K und 23 K zugelassen werden. Im Hinblick auf die verwendete, nicht praxisgerechte Definition und die in keiner Weise umrechenbaren Angaben sind im Moment keine begründeten Grenzwerte für die neue Definition angebbar, will man nicht den Kleinstwert 4 K fixieren. Eine Regelung ist von der Neufassung der DIN 1946 Teil 2 zu erwarten.

Bei Variantenuntersuchungen verschiedener Heiz- bzw. Kühlflächenanordnungen sind selbstverständlich die Lösungen mit der geringsten Strahlungstemperatur-Asymmetrie zu bevorzugen.

3. Mathematisches Modell

Die große Variantenvielfalt bezüglich Raumgeometrie, Möblierung, Heiz- bzw. Kühlflächenanordnungen und thermischer Belastungen erfordert eine sehr große Modellflexibilität, zwingt aber auch zu Abstraktionen.

3.1 Geometrisches Raummodell

In *Bild 2* ist ein Raum im x, y, z-Koordinatensystem dargestellt. Jede der 4 Wände, die Decke und der Boden können in 5 beliebige Rechtecke unterteilt werden. So sind beispielsweise – wie an der rechten Wand gezeigt – Fenster, Brüstungen, Stürze usw. modellierbar oder – wie an der Decke dargestellt – eine Aufteilung in beheizte Randzonen und in eine unbeheizte Innenfläche möglich. Die Flächen werden lediglich durch die Eingaben der minimalen und maximalen Werte, der in der betrachteten Ebene veränderlichen Koordinaten, charakterisiert. So werden beispielsweise für die rechte Wand (Flächennummern: 6 bis 10) jeweils y_{min}; y_{max}; z_{min}; z_{max} benannt. Sind weniger als 5 Flächen vorhanden, werden für die nicht existenten Flächen die Koordinaten Null gesetzt. Die linke Wand kann gegen die Vertikale um den Winkel α geneigt sein. Die mit der Höhe z veränderlichen x-Koordinaten der ebenen Wandflächen 1 bis 5 werden programmintern beachtet. Sie stellen keine Eingabewerte dar. Gleiches gilt für die Seitenwände, so z. B. für die Fläche 11.

Bild 3 gibt einen Einblick in das Innere des Modellraumes. In der Höhe HH über dem Boden befindet sich eine fiktive Möblierungsebene. Die tatsächlichen horizontalen Oberflächen der Tische, Stühle, Beistellschränke, Bürogeräte usw. sowie ein Teil der strahlungswirksamen Vertikalflächen dieser Gegenstände sind als homogen verteilte Fläche in der fiktiven Möblierungsebene angeordnet. Die Größe der Flächenbelegung wird als Anteil *v* von der Bodenfläche angegeben. Bei der mathematischen Model-

Variante I und Variante II

Raumlänge L =15.00 m
Raumbreite B =15.00 m
Raumhöhe H = 3.80 m

Neigungswinkel linke Wand α =13.50°

Prüfebene Höhe PH = 1.3 m

Linke Wand Al = 58.62 m²

i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)
1	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	3.80	11.72
2	0.00	0.00	3.00	6.00	0.00	3.80	11.72
3	0.00	0.00	6.00	9.00	0.00	3.80	11.72
4	0.00	0.00	9.00	12.00	0.00	3.80	11.72
5	0.00	0.00	12.00	15.00	0.00	3.80	11.72

Rechte Wand Ar = 57.00 m²

i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)
6	15.00	15.00	0.00	3.00	0.00	3.80	11.40
7	15.00	15.00	3.00	6.00	0.00	3.80	11.40
8	15.00	15.00	6.00	9.00	0.00	3.80	11.40
9	15.00	15.00	9.00	12.00	0.00	3.80	11.40
10	15.00	15.00	12.00	15.00	0.00	3.80	11.40

Vordere Wand Av = 55.27 m²

i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)
11	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	3.80	9.67
12	3.00	6.00	0.00	0.00	0.00	3.80	11.40
13	6.00	9.00	0.00	0.00	0.00	3.80	11.40
14	9.00	12.00	0.00	0.00	0.00	3.80	11.40
15	12.00	15.00	0.00	0.00	0.00	3.80	11.40

Hintere Wand Ah = 55.27 m²

i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)
16	0.00	3.00	15.00	15.00	0.00	3.80	9.67
17	3.00	6.00	15.00	15.00	0.00	3.80	11.40
18	6.00	9.00	15.00	15.00	0.00	3.80	11.40
19	9.00	12.00	15.00	15.00	0.00	3.80	11.40
20	12.00	15.00	15.00	15.00	0.00	3.80	11.40

Boden Ab =225.00 m²

i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)
21	0.00	7.50	0.00	7.50	0.00	0.00	56.25
22	0.00	7.50	7.50	15.00	0.00	0.00	56.25
23	7.50	15.00	0.00	7.50	0.00	0.00	56.25
24	7.50	15.00	7.50	15.00	0.00	0.00	56.25
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Variante I

Decke Ad =211.32 m²

i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)
26	0.00	2.41	0.00	7.50	3.80	3.80	11.23
27	0.00	2.41	7.50	15.00	3.80	3.80	11.23
28	2.41	15.00	0.00	7.50	3.80	3.80	94.43
29	2.41	15.00	7.50	15.00	3.80	3.80	94.43
30	0.00	0.00	0.00	0.00	3.80	3.80	0.00

Variante II

Decke Ad =211.32 m²

i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)
26	0.00	1.91	0.00	15.00	3.80	3.80	14.97
27	1.91	3.41	0.00	7.50	3.80	3.80	11.25
28	1.91	3.41	7.50	15.00	3.80	3.80	11.25
29	3.41	15.00	0.00	7.50	3.80	3.80	86.93
30	3.41	15.00	7.50	15.00	3.80	3.80	86.93

Koordinaten in m; Flächen in m²

Bild 4. Flächeneinteilung des im Beispiel verwendeten Modellraumes.

lierung werden die einzelnen Flächenelemente als infinitesimal klein angesehen, d.h. quasi wie ein eben aufgespanntes Gazenetz behandelt. Die fiktive Möblierungsebene erfüllt zwei real vorhandene Aufgaben:

- pauschale Simulation der Schattenwirkung der Gegenstände im Raum bei der Berechnung des Strahlungsaustausches,
- Nachbildung der im Raum entstehenden bzw. wirksam werdenden Wärmelasten durch Bürogeräte, Beleuchtung, Menschen bzw. Sonneneinstrahlung in Form einer Wärmelastebene (Einzelheiten in [5]).

Der fiktiven Möblierungs- bzw. Wärmelastebene können auf der Ober- und Unterseite (Flächennummern: 31, 32) bei der späteren Berechnung entsprechende Temperaturen zugewiesen werden.

Im *Bild 3* ist weiterhin die Prüfebene charakterisiert. Ausgehend von einem auf dem Boden fixierten Prüfpunktraster mit 25 Punkten kann die Höhe der Prüfebene PH beliebig gewählt werden. Es sind Anordnungen unter oder über der Möblierungsebene möglich.

Als Prüfkörper kommen Kugelelemente (siehe Prüfpunkt (4,2)) zur Ermittlung der globalen Raumstrahlungstemperatur $t_{U,P}$ (auch Ganzraumstrahlungstemperatur genannt) gemäß Gl. (3) und parallel- bzw. unter 45° querstehende Würfelelemente (siehe Prüfpunkte (2,2) bzw. (4,4)) zur Berechnung der Strahlungstemperaturen, bezogen auf jede Würfelseite $t_{S,i}$ bzw. $t_{Sq,i}$ gemäß Gln. (6) und (7) zur Anwendung.

3.2 Modell zur Ermittlung der Einstrahlzahlen

Die Berechnung der Einstrahlzahlen erfolgt elementweise numerisch mit Hilfe der Vektorrechnung nach [2]. Das Rechenprogramm ist direkt auf das Raummodell zugeschnitten, wodurch programmintern alle erforderlichen Eingangsgrößen aus den zum Raummodell gehörigen Werten bestimmt werden. Ebenso sind die Normalenvektoren der Prüfflächenelemente fest im Programm verankert. Ihre Aktivierung erfolgt völlig automatisch.

Die Raumumfassungsflächen Nr. 1 bis 30 werden bei der numerischen Abarbeitung jeweils in 100 Elemente unterteilt. Mit zunehmender Elementgröße und kleiner werdendem Abstand zwischen den Umfassungselementen und dem Prüfkörper wachsen die Felder der numerischen Berechnung. Zur Kontrolle wird für jede Würfelfläche und für die Kugel an jedem Standort P die Summe der Einstrahlzahlen gebildet. Bei üblichen Geometrien betragen die Abweichungen maximal 1 %, in Sonderfällen sind bis 3 % aufgetreten. Um eine Fortpflanzung der Fehler bei der Berechnung der Strahlungstemperatur zu vermeiden, werden die einzelnen Einstrahlzahlen durch die Einstrahlzahlsumme dividiert.

3.3 Thermische Modellierung

Jeder der maximal 30 Raumumfassungsflächen und beiden Seiten der fiktiven Möblierungsebene sind die praktisch auftretenden Oberflächentemperaturen zuzuordnen. Sie gelten einheitlich für die jeweilige Fläche.

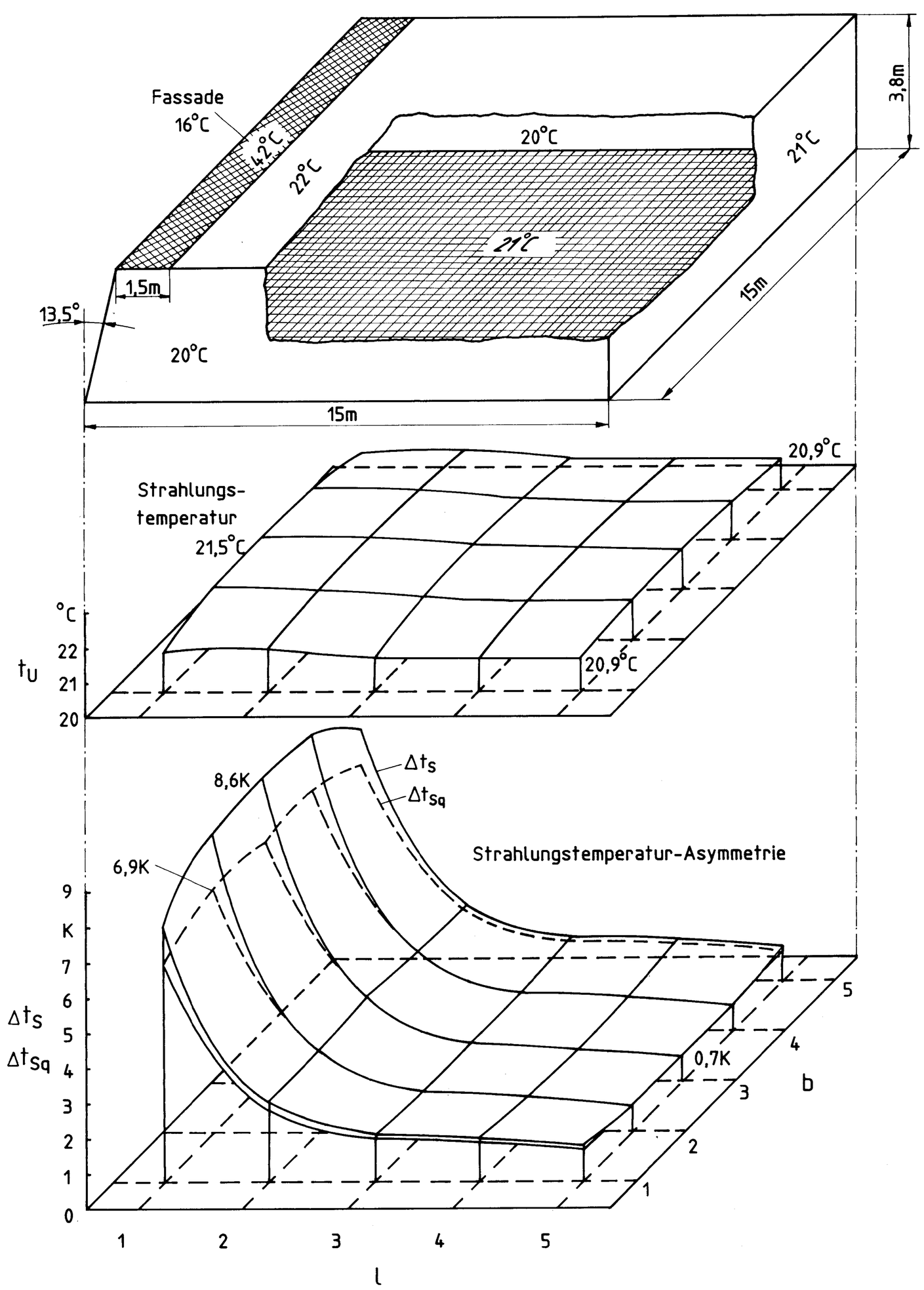

Bild 5. Modellraum mit Anordnung des Heizbandes nach *Variante I*, Verteilung der Strahlungstemperatur und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie.

Deshalb sollte die Einteilung der Wände, Decken usw. in die Einzelflächen vor allem nach Gesichtspunkten der Temperaturverteilung erfolgen. Sind die Flächen gleicher Temperatur so klein, daß eine exakte Modellierung nicht rationell erfolgen kann, so sind mittlere Temperaturen aus den Einzeltemperaturen – gewichtet mit den Flächen – zu bilden. Dies gilt beispielsweise für Glasfassaden mit beheizten Konstruktionselementen, Kühldecken mit integrierten Leuchten, schallabsorbierenden Lamellen u. a. m.

4. Beispiel

Ein Großraumbüro (L = 15 m, B = 15 m, H = 3,8 m) wird auf der Längsfront durch eine um 13,5° geneigte Glasfassade begrenzt. Es sind die ortsabhängigen Strahlungstemperaturen und die Strahlungstemperatur-Asymmetrien unter Variation der Lage eines Deckenstrahlbandes (Breite 1,5 m) zu untersuchen, wenn im Raum keine inneren Wärmequellen wirken und die Möblierung unbeachtet bleibt. Die Prüfebene soll sich in einer Höhe von 1,3 m über dem Fußboden befinden. Die raumseitigen Oberflächentemperaturen betragen:

linke Wand (Glasfassade)	16 °C,
rechte Wand und Boden	21 °C,
vordere und hintere Wand	20 °C,
Decke	22 °C,
Heizband	42 °C.

Das Deckenstrahlband ist parallel zur Glasfassade angeordnet. Bei Variante I schließt es direkt an die Fassade an, bei Variante II ist es um 1 m ins Rauminnere verschoben. Die Einflüsse auf die Strahlungstemperaturen sind darzustellen.

4.1 Lösung

Die getroffene Flächeneinteilung ist im *Bild 4* – in Verbindung mit der in *Bild 2* vorgestellten Koordinatenorientierung – dargelegt.

Die zusammengefaßten Ergebnisse finden sich in den *Bildern 5* und *6*.

Variante I zeichnet sich durch ein nahezu ausgeglichenes Strahlungstemperaturprofil aus. Der Maximalwert tritt an den Punkten (1,2) bis (1,4), d. h. in Nähe der Glasfassadenmitte, mit $t_{U,P}$ = 21,5 °C auf. Der Minimalwert liegt an den Punkten (3,1) bis (5,1) und (3,5) bis (5,5) mit $t_{U,P}$ = 20,9 °C an. Somit betragen die größten Unterschiede nur 0,6 K, wobei es vorteilhaft ist, daß die höchsten Strahlungstemperaturen in Fassadennähe auftreten. Da dort die niedrigsten Lufttemperaturen zu erwarten sind, wird die Empfindungstemperatur nach Gl. (1) über den gesamten Grundriß betrachtet nur sehr kleine Unterschiede aufweisen.

Demgegenüber ist die Strahlungstemperatur-Asymmetrie aber recht beachtlich. Sie nimmt im Fassadenbereich die Werte Δt_S = 8,6 K bzw. Δt_{Sq} = 6,9 K an.

Variante II zeigt bezüglich der Strahlungstemperatur einen ungünstigeren Verlauf. An den Punkten (2,2) bis (2,4) liegt der Maximalwert $t_{U,P}$ = 21,9 °C, und an den Punkten (1,1) bzw. (1,5) befindet sich der Minimalwert $t_{U,P}$ = 20,8 °C. Die größten Unterschiede betragen somit 1,1 K. Bei der Bildung der Empfindungstemperaturen überlagern in Fassadennähe sich ungünstigerweise die niedrigsten Strahlungstemperaturen mit den niedrigsten

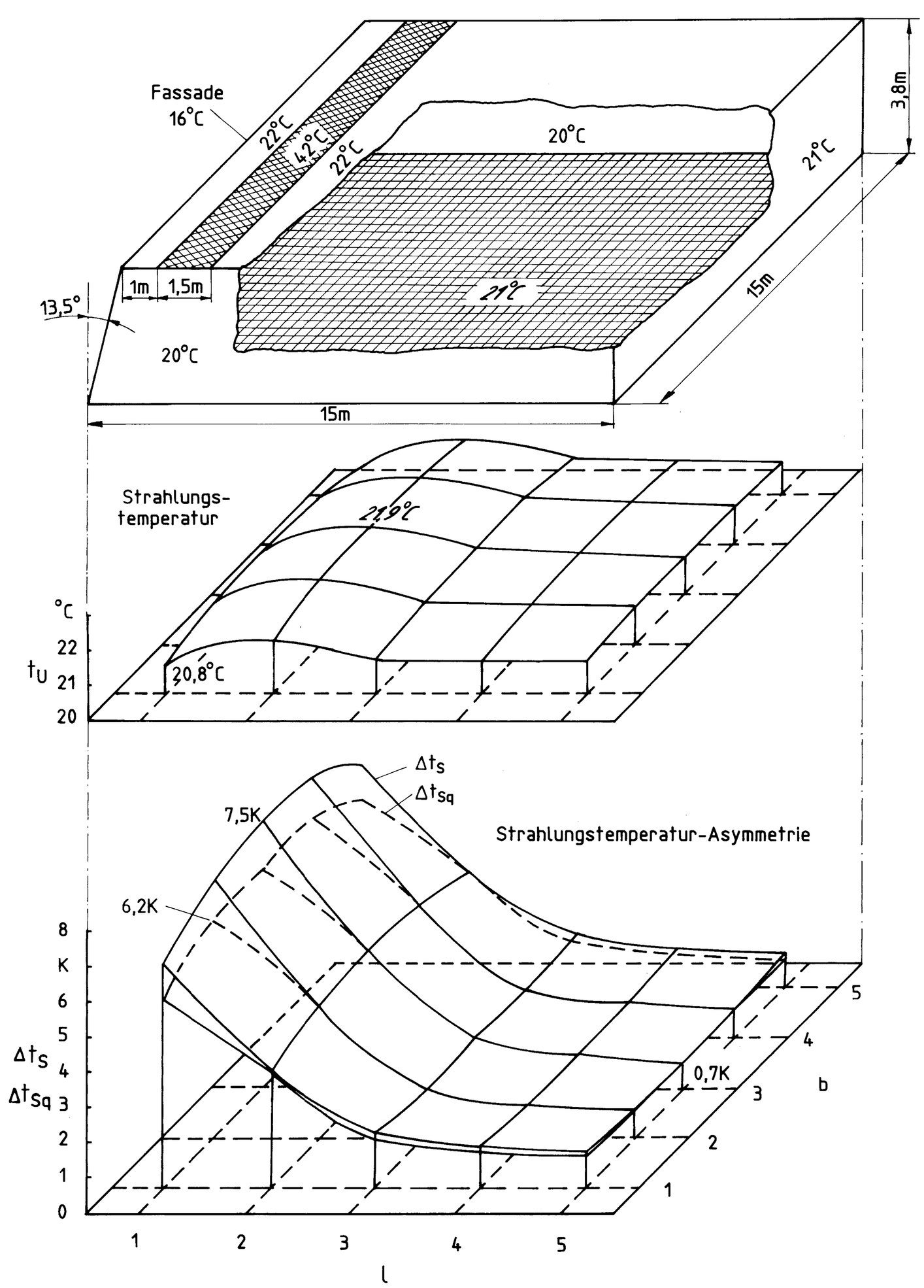

Bild 6. Modellraum mit Anordnung des Heizbandes nach *Variante II*, Verteilung der Strahlungstemperatur und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie.

P l	P b	tSmax	tSmin	tSqmax	tSqmin	ΔtS	ΔtSq	iSmax/ iSmin	iSqmax/ iSqmin	tU(P)
1	1	24.7	17.5	24.7	18.6	7.2	6.2	6/1	6/4	21.1
1	2	25.8	17.3	25.8	18.9	8.5	6.9	6/1	6/4	21.5
1	3	25.9	17.3	25.9	19.1	8.6	6.8	6/1	6/1	21.5
1	4	25.8	17.3	25.8	18.9	8.5	6.9	6/1	6/1	21.5
1	5	24.7	17.5	24.7	18.6	7.2	6.2	6/1	6/1	21.1
2	1	22.6	20.4	22.6	20.6	2.2	2.0	6/4	6/3	21.2
2	2	23.2	20.9	23.2	20.9	2.3	2.3	6/5	6/5	21.4
2	3	23.3	20.9	23.3	20.9	2.4	2.4	6/5	6/5	21.5
2	4	23.2	20.9	23.2	20.9	2.3	2.3	6/5	6/5	21.4
2	5	22.6	20.4	22.6	20.6	2.2	2.0	6/2	6/2	21.2
3	1	21.6	20.3	21.6	20.5	1.3	1.2	6/4	6/4	20.9
3	2	22.0	20.9	22.0	20.9	1.1	1.2	6/4	6/4	21.2
3	3	22.1	21.0	22.1	21.0	1.1	1.1	6/5	6/5	21.2
3	4	22.0	20.9	22.0	20.9	1.1	1.2	6/2	6/1	21.2
3	5	21.6	20.3	21.6	20.5	1.3	1.2	6/2	6/1	20.9
4	1	21.5	20.3	21.5	20.5	1.2	1.1	6/4	6/4	20.9
4	2	21.9	20.9	21.9	20.9	1.0	1.0	6/4	6/4	21.1
4	3	21.9	21.0	21.9	21.0	0.9	0.9	6/1	6/5	21.2
4	4	21.9	20.9	21.9	20.9	1.0	1.0	6/2	6/1	21.1
4	5	21.5	20.3	21.5	20.5	1.2	1.1	6/2	6/1	20.9
5	1	21.4	20.4	21.4	20.5	1.0	0.9	6/4	6/4	20.9
5	2	21.7	20.9	21.7	20.9	0.7	0.8	6/4	6/4	21.1
5	3	21.7	21.0	21.7	21.0	0.7	0.7	6/5	6/5	21.1
5	4	21.7	20.9	21.7	20.9	0.7	0.8	6/2	6/1	21.1
5	5	21.4	20.4	21.4	20.5	1.0	0.9	6/2	6/1	20.9

Temperaturen in °C; Temperaturdifferenzen in K

Maximaler Unterschied der Strahlungstemperaturen tU(P) : 0.6 K

Maximale Asymmetrie : 8.6 K am Prüfungspunkt (1,3)

Minimale Asymmetrie : 0.7 K am Prüfungspunkt (5,3)

Bild 7. Einzelergebnisse zu *Variante I.*

Lufttemperaturen. Die Empfindungstemperaturen über den Grundriß werden sehr ungleich verteilt sein.

Die Strahlungstemperatur-Asymmetrien haben sich gegenüber Variante I auf $\Delta t_S = 7{,}5$ K bzw. $\Delta t_{Sq} = 6{,}2$ K verringert.

Wegen der ungünstigen Strahlungstemperaturverteilung bei Variante II gilt der Heizflächenanordnung nach Variante I der Vorzug.

Im *Bild 7* sind die Einzelergebnisse der *Variante I* dargestellt. Die Flächen i des Probewürfels – für die die größten und kleinsten Strahlungstemperaturen gelten – sind im tabellarischen Ausdruck als iSmax/iSmin vermerkt. So bedeutet am Punkt (1,3) die Aussage iSmax/iSmin = 6/1, daß die Deckfläche (6) des Würfels die höchste und die zur Fassade zeigende Würfelseite (1) die kleinste Strahlungstemperatur repräsentiert. Die Angaben der Wertepaare zeigen den Wechsel der Bezugsflächen in Abhängigkeit des Prüfpunktes. So gelten beispielsweise:

P(l,b)	iSmax/iSmin
1,3	6/1
2,1	6/4
2,3	6/5.

Durch den standortbedingten Wechsel erklären sich auch die in den Kurvennetzen Δt_S und Δt_{Sq} (*Bilder 5* und *6*) auftretenden signifikanten Punkte.

5. Schlußfolgerung

Zur optimalen Anordnung von Heiz- und Kühlflächen, die in die Umfassung integriert werden, sind als Bewertungsmaßstab die *Empfindungstemperatur* und die *Strahlungstemperatur-Asymmetrie* relevant.

Zur Vorausermittlung dieser Werte dienen die Strahlungstemperaturen aller Umfassungen und evtl. einer fiktiven Möblierungsebene, bezogen auf 1 Kugelelement und bezogen auf die 6 Flächen eines Würfelelementes (vgl. *Bild 3*).

Während die Strahlungstemperatur auf das Kugelelement t_U direkt zur Bildung der Empfindungstemperatur gemäß Gl. (1) herangezogen werden kann, sollten aus den Strahlungstemperaturen auf die Würfelelementflächen $t_{S,1}$ bis $t_{S,6}$ die maximale Differenz gebildet und diese als Strahlungstemperatur-Asymmetrie ausgewiesen werden.

Die verschiedenartigen Umfassungsgeometrien und die inneren Raumoberflächentemperaturen finden bei der vorgenommenen Modellierung umfassende Beachtung. Die Ergebnisse sind bezüglich der kausalen Zusammenhänge, d. h. der „Verursacher", eindeutig interpretierbar.

Das bisher verwendete Flächenelement-Modell mit Gegenüberstellung der auf jede Seite bezogenen Strahlungstemperatur als Strahlungstemperatur-Asymmetrie ist nicht praktikabel. Eine Orientierung des Flächenelementes parallel der Umfassungen hoher und niedriger Temperatur ist nicht immer gegeben, da diese Flächen in praxi meistens rechtwinklig zueinander stehen. Die bisherige Methode versagt auch, wenn mehrere Umfassungsflächen Außenwände, Heiz- oder Kühlflächen sind.

Die zulässigen Grenzwerte für die Strahlungstemperatur-Asymmetrie müssen neu festgelegt werden. Bei vergleichenden Untersuchungen sind die Varianten mit den geringsten Strahlungstemperatur-Asymmetrien zu bevorzugen.

Literatur

[1] *Fanger/Angelius/Kjerulf-Jensen:* Radiation Data for the Human Body. ASHRAE Annual Meeting, Kansas City 1970.

[2] *Glück, B.:* Strahlungsheizung – Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen und Karlsruhe: Verlag C. F. Müller 1981.

[3] *Glück, B.:* Einstrahlzahlen von „Punkten", infinitesimalen Kugeln und endlichen Kugeln auf Flächen. Stadt- und Gebäudetechnik (1984) H. 3, S. 35–37.

[4] *Fanger/Ipsen/Langkilde/Olesen/Christensen/Tanabe:* Comfort Limits for Asymmetrie Thermal Radiation. Energy and Buildings (1985) 8.

[5] *Glück, B.:* Leistung von Kühldecken. Diskussionsbeitrag auf der Informations- und Diskussionsveranstaltung des Fachinstitutes Gebäude-Klima e. V. zum Thema „Kühldecke und Raumlüftung" am 12. 9. 1990 in Stuttgart. HLH (1991) H. 3, S. 213–215.