

Heizen und Kühlen über Wand- und Deckenflächen

Strahlungstemperatur-Verteilungen und Strahlungstemperatur-Asymmetrien in Büroräumen mit thermisch aktiven Wand- und Deckenflächen



Zur Senkung des Installationsaufwandes wird angestrebt, thermisch aktive Wand- und Deckenflächen sowohl zum Kühlen als auch zum Heizen zu verwenden. Wegen des beachtlichen Strahlungsanteils und der großen Flächenwirkung nehmen die Kühl- bzw. Heizflächen maßgeblichen Einfluß auf die thermische Behaglichkeit des Menschen.

Nach [1] sind die Strahlungstemperatur und die Strahlungstemperatur-Asymmetrie von besonderem Interesse.

Dr. sc. techn., Dr.-Ing. **Bernd Glück**, Hamburg

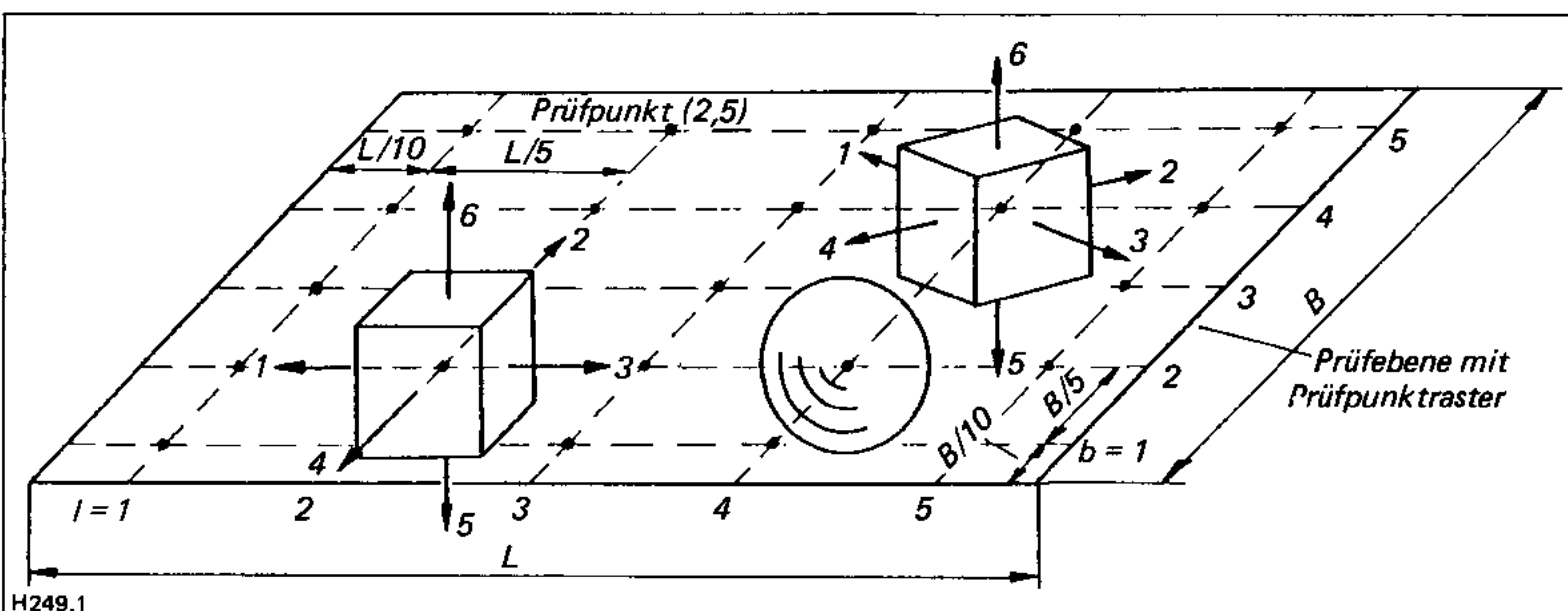
Prüfmethode

Die Strahlungstemperatur der Umfassungen und einer angenommenen Möblierungsebene $t_{U,P}$ wird auf ein Kugelelement an der Stelle P bezogen. Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie ist als größte Differenz zwischen den Strahlungstemperaturen $t_{S,i,P}$, die bezogen auf jede der $i = 1$ bis 6 Flächen eines Würfelementes am Standort P berechnet werden, definiert. Um spezielle Raumgeometrien zu erfassen, finden Würfelemente, die parallel zu den Umfassungen und um 45° gedreht sind, Verwendung. Die Konstellationen und Algorithmen wurden in [1, Bild 3] ausführlich vorgestellt. Die Prüfkörper (Kugel- und Würfelemente) sind entlang eines symmetrischen Grundflächenrasters von 25 Punkten in einer Höhe PH über den Fußboden platziert (Bild 1).

Schätzung der Oberflächentemperaturen des Raumes

In [2, Bild 2] ist eine reale Möblierung eines Drei-Personen-Büros in eine homogene Flächenverteilung in einer sogenannten Möblierungs- oder Wärmelastebene überführt. Der Flächenanteil beträgt in diesem Beispiel $v = 0,4$, d.h. 40% der Fußbodenfläche.

Bei Kühlbetrieb werden die inneren Wärmelasten (Personen, Bürogeräte, Beleuchtung) und die äußeren Wärmelasten (Fenster: direkte Besonnung 400 W/m^2 ; Schattenlage bzw. Sonnenschutz 160 W/m^2 ; Außenwand: 15 W/m^2) unter Abzug des durch den hygienisch bedingten Luftwechsel abführbaren Wärmestromes bilanziert. Eine detaillierte Aufstellung findet sich im nachfolgenden Beispiel.



502 Bild 1: Prüfpunktraster über dem Raumgrundriß und Form der Prüfkörper

Bei Heizbetrieb bleiben die inneren Wärmeentwicklungen unbeachtet. Der Transmissionswärmebedarf wird relativ hoch angesetzt (Fenster: 87 W/m^2 ; Außenwand: 28 W/m^2). Der Lüftungswärmebedarf berechnet sich auf der Grundlage eines 0,5fachen Außenluftwechsels. Eine weitere Luftzufuhr erfolgt bei innerer Raumwärmeentwicklung über die Lüftung und bleibt unbeachtet. Somit wird der ungünstigste Heizbetrieb bei schwach besetztem Büro erfaßt. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (Fenster: $k = 2,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$; Außenwand: $k = 0,8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$) sind relativ hoch gewählt. Dies gestattet bei den Modellrechnungen somit auch Aussagen für ältere Bürogebäude mit Klimaanlage großer Luftvolumenströme, die mit thermisch aktiven Flächen umgerüstet werden sollen. Außerdem verdeutlichen größere Lastanteile die auftretenden Probleme und zeigen die Anwendungsgrenzen der vorgeschlagenen technischen Lösungen.

Die Oberflächentemperaturen der thermisch aktiven Raumumfassungen und der Möblierungsebene werden mit konventionell gebräuchlichen Wärmeübergangskoeffizienten ($\alpha = 7,7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$) aus den Wärmestromdichten für stationäre Bedingungen ermittelt. Diese Werte haben sich bei der Wärmebedarfsberechnung statistisch bewährt. Einige spezielle Temperaturen, so beispielsweise die der Deckeninnenfläche bei Randzonenheizung, sind an Hand von Erfahrungswerten geschätzt. Die Oberflächentemperaturen der thermisch aktiven Flächen werden mit Hilfe der in [2] vorgestellten Basiskennlinie bestimmt. Den Berechnungen liegen folgende Raumtemperaturen zugrunde:

Sommerbetrieb $t_i = 24^\circ \text{C}$,

Winterbetrieb $t_i = 20^\circ \text{C}$.

Beispiel

Bezugnehmend auf den später im Bild 2 vorgestellten Raum, sind die Oberflächentemperaturen bei Anordnung einer Kühldecke und einer Mindestlüftung mittels Überschlagsrechnungen zu schätzen.

Es gelten:

Fenster: $A_F = 4,81 \text{ m}^2$; eingestrahlte Energiedichte $\dot{q}_F = 400 \text{ W/m}^2$

Außenwand: $A_A = 6,44 \text{ m}^2$; Energiestromdichte $\dot{q}_A = 15 \text{ W/m}^2$

Fußboden: $A_B = 32,4 \text{ m}^2$; Kühldecke: $A_D = 32,4 \text{ m}^2$; Innenwände: $A_I = 47,25 \text{ m}^2$

Möblierungsebene: $A_M = 12,96 \text{ m}^2$ ($v = 0,4$)

Personen: drei; Luftvolumenstrom $50 \text{ m}^3/(\text{h Person})$; $t_Z = 18^\circ \text{C}$;

$t_A = 25^\circ \text{C}$

Bürogeräte: drei Personal-Computer.

Lösung

Ausgehend vom Abluftzustand ($t_A = 25^\circ \text{C}$; $\phi_A = 50\%$; $x_A = 9,88 \text{ g}_W/\text{kg t.L.}$; $h_A = 50,4 \text{ kJ/kg t.L.}$; $v = 0,858 \text{ m}^3/\text{kg t.L.}$) und der Feuchteentwicklung ($\dot{m}_W = 3 \cdot 60 \text{ g}_W/\text{h} = 180 \text{ g}_W/\text{h}$) folgen:

Luftmassenstrom

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{V}_L}{v} = \frac{3 \cdot 50}{0,858} \text{ kg t.L./h} = 174,8 \text{ kg t.L./h}$$

Feuchtebeladung

$$\Delta x = \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_L} = \frac{180}{174,8} \text{ g}_W/\text{kg t.L.} = 1,03 \text{ g}_W/\text{kg t.L.}$$

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten Berechnungsergebnisse der Varianten 1 bis 4

Variante	Spezifikation thermisch aktive Flächen	Kühlung			Heizung		
		Δt_U in K	$\Delta t_{S,max}$ in K	$\Delta t_{S,min}$ in K	Δt_U in K	$\Delta t_{S,max}$ in K	$\Delta t_{S,min}$ in K
1.	Außenwand (1) mit Fenster ¹⁾ , 3 Innenwände						
1.1.	Decke	1,9	8,5 E 9,5 H	5,5	2,0	6,8 V 4,1 H	2,4
1.2.	Decke, Wand (1)	1,1	6,2 E 8,4 H	3,7	1,3	4,5 V 3,0 H	1,7
1.3.	Decke, Wand (1) nur Brüstung	1,2	6,2 E 8,8 H	3,9	1,4	4,8 V 3,3 H	2,0
1.4.	Decke, Wand (1) nur Sturz	1,7	9,3 H	5,3	1,9	6,7 E 3,8 H	2,2
1.5.	Wand (1)				1,1	3,2 V 3,1 H ²⁾	0,3
1.6.	Decke, nur Randzonen				1,8	6,9 E 3,8 H	2,6
1.7.	Wand (1), nur Brüstung				1,0	7,0 H ²⁾	0,3
1.8.	Luftheizung				1,8	5,5 V	0,3
2.	Außenwand (1) mit Fenster ¹⁾ , Außenwand (2), 2 Innenwände						
2.1.	Decke	2,0	8,9 E 10,1 H	5,7	2,8	8,2 E 6,1 H	3,6
2.2.	Decke, Wand (1)	1,1	6,4 E 8,8 H	3,9	1,6	5,5 E 4,3 H	2,5
2.3.	Decke, Wand (1), Wand (2)	2,7	5,9 V 7,0 H	3,0	1,9	4,8 V 2,1 H	1,2
2.4.	Decke, nur Randzonen				2,3	7,9 E 5,2 H	3,1
2.5.	Wand (1),				3,1	6,7 V	0,7
2.6.	Wand (1), nur Brüstung				3,1	9,6 H ²⁾	0,6
3.	Außenwand (2) mit 2 Glasflächen, 3 Innenwände						
3.1.	Decke	1,1	5,9 E 8,0 H	4,6	2,7	9,2 V 5,7 H	3,4
3.2.	Decke, Wand (2)	2,0	4,9 E 6,8 H	3,9	3,1	8,2 V 3,8 H	2,2
3.3.	Wand (2)				6,0	11,3 V	0,3
3.4.	Decke, nur Randzonen				3,4	14,8 E 14,1 H	8,3
4.	Außenwand (1) mit Fenster, Außenwand (2) mit 2 Glasflächen, 2 Innenwände						
4.1.	Decke	1,2	10,6 H	5,9	3,1	10,3 E 7,4 H	4,6
4.2.	Decke, Wand (1), Wand (2)	2,9	5,3 E 8,2 H	4,1	3,1	8,4 V 4,3 H	2,5
4.3.	Wand (1), Wand (2)	4,1	9,5 V	1,0	5,9	9,8 V 2,6 H ²⁾	0,4
4.4.	Decke, nur Randzone				2,5	10,6 E 6,5 H	4,2
4.5.	Wand (1), nur Brüstung				3,4	7,4 V 7,1 H ²⁾	0,8

1) Fenster ohne Verschattung

2) Die Strahlungstemperatur des unteren Halbraumes ist größer als die des oberen Halbraumes. Es gelten somit die zulässigen Grenzwerte für Kühldecken.

Zuluftzustand

$t_z = 18\text{ °C}; \quad x_z = 8,85\text{ g}_W/\text{kg t.L.}; \quad h_z = 40,6\text{ kJ/kg t.L.}$

Wärmeabfuhr durch Lüftung

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L (h_A - h_z) = \frac{174,8}{3\,600} (50,4 - 40,6) 1\,000\text{ W} = 476\text{ W}.$$

Im weiteren werden folgende Aufteilungen getroffen:

Beleuchtungsenergie (15 W/m ² _{Boden})	40% Möblierungsebene	(6 W/m ² _B)
	60% Fußboden	(9 W/m ² _B)
Sonneneinstrahlung durch Fenster (400 W/m ² _{Fenster})	17% Fensterinnenfläche	(70 W/m ² _F)
	25% Möblierungsebene	(100 W/m ² _F)
	33% Fußboden	(130 W/m ² _F)
	25% Innenwände	(100 W/m ² _F)

Damit ergaben sich die Zuordnungen:

Möblierungsebene	
Personen	3 · 115 W = 345 W
Bürogeräte	3 · 150 W = 450 W
Beleuchtung	32,4 · 6 W = 194 W
Sonneneinstrahlung	4,81 · 100 W = 481 W
Lüftung	= -476 W
	994 W
Annahme: nach oben wirksam	795 W
nach unten wirksam	199 W
Fußboden	
Beleuchtung	32,4 · 9 W = 292 W
Sonneneinstrahlung	4,81 · 130 W = 625 W
	917 W
Außenwand	6,44 · 15 W = 97 W
Innenwand	4,81 · 100 W = 481 W
Fenster	4,81 · 70 W = 337 W

Damit beträgt die gesamte, durch die Kühldecke abzuführende Belastung $\dot{Q}_D = 2\,826\text{ W}$. Unter Verwendung der Basiskennlinie $\dot{q}_D = 8,92 (t_i - t_D)^{1,1}$ in W/m² folgt die theoretische Deckentemperatur zu

$$t_D = t_i - \left(\frac{\dot{q}_D}{8,92} \right)^{1/1,1} = 24\text{ °C} - \left(\frac{2\,826/32,4}{8,92} \right)^{1/1,1} \text{ K} = 16,1\text{ °C}.$$

Die übrigen Temperaturen folgen zu

$t_x = t_i + \frac{\dot{q}_x}{\alpha} = 24\text{ °C} + \frac{\dot{Q}_x/A_x}{7,7} \text{ K}$	
Möblierungsebene oben	$t_{M,o} = 32,0\text{ °C}$
Möblierungsebene unten	$t_{M,u} = 26,0\text{ °C}$
Fußboden	$t_B = 27,7\text{ °C}$
Außenwand	$t_A = 26,0\text{ °C}$
Innenwände	$t_I = 25,3\text{ °C}$
Fenster	$t_F = 33,0\text{ °C}$

Selbstverständlich sind die zahlreichen Annahmen nicht unstrittig, die Ergebnisse stimmen aber mit den praktischen Erfahrungen überein.

Modellvarianten

In den Bildern 2 bis 4 sind Modellräume mit gleicher Geometrie dargestellt. Die Anzahl der Außenwände und ihr transparenter Anteil werden ebenso variiert, wie die Anordnung der thermisch aktiven Kühl- bzw. Heizflächen. Insgesamt sind in den Bildern 35 Varianten vermerkt. Die Ermittlung der jeweils zugehörigen Oberflächentemperaturen erfolgt nach dem im vorstehenden Beispiel gezeigten Verfahren. Die Höhe der Möblierungsebene ist mit $HH = 0,85\text{ m}$ und die Höhe der Prüfebene mit $HP = 1,1\text{ m}$ aufgenommen.

Im Bild 5 sind die zur Variante 1.1.K gehörigen Eingabedaten für das in [1] vorgestellte Rechenprogramm vermerkt. In der linken vorderen Raumecke liegt der Ursprung des kartesischen x, y, z -Koordinatensystems. Jede Raumumfassung kann in maximal fünf

Rechteckflächen unterteilt sein. Die linke Wand – in den Bildern 2 bis 4 mit (1) bezeichnet – ist beispielsweise in die Einzelflächen $i = 1$ Brüstung, $i = 2$ Fenster, $i = 3$ Sturz, $i = 4$ und $i = 5$ Wandstreifen seitlich des Fensters gegliedert. Das Fenster ($i = 2$) wird durch die Koordinaten $y_{\min} = 0,4 \text{ m}$; $y_{\max} = 4,1 \text{ m}$; $z_{\min} = 0,8 \text{ m}$; $z_{\max} = 2,1 \text{ m}$ (Eingabewerte) begrenzt. Die zugehörige Fläche $A_i = 4,81 \text{ m}^2$ wird aus den Koordinaten errechnet; die Temperatur $t_i = 33^\circ\text{C}$ ist wiederum ein Eingabewert.

Für die Möblierungsebene entfällt eine Koordinateneingabe. Die Fläche wird aus $v \cdot A_B$ gebildet. Die Oberseite trägt die Nummer $i = 31$, die Unterseite $i = 32$.

Im Bild 6 sind die Ergebnisse verzeichnet. Es bedeuten:

$P(l, b)$ Standort des Prüfpunktes nach Bild 1
 $t_{S_{\max}}$ maximale und minimale Strahlungstemperaturen auf die Flächen des parallel- und querstehenden Würfelementes
 $t_{S_{\min}}$

$i_{S_{\max}}$ Flächenzahl des parallel- und querstehenden Würfelementes nach Bild 1 für die $t_{S_{\max}}$ bis $t_{S_{\min}}$ gelten
 $i_{S_{\min}}$
 $t_{U(P)}$ Strahlungstemperatur, bezogen auf Kugelelement
 t_{S1}, t_{S2} mittlere Strahlungstemperatur, bezogen auf parallel- bzw. querstehendes Würfelement (Mittelwert über jeweils sechs Flächen).

Ergebnisse und Diskussion

Die wichtigsten Ergebnisse der berechneten 35 Varianten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Es handelt sich um die Größen:

Δt_U maximaler Unterschied der Strahlungstemperaturen $t_{U,P}$

$\Delta t_{S_{\max}}$ maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie, die am
 $\Delta t_{S_{\min}}$ minimale parallel- und am querstehenden Würfel auftritt.

Die Extremwertuntersuchung wird jeweils über alle $P = 1$ bis 25 Standorte geführt.

In [1] wurde die Definition der Strahlungsasymmetrie nach Fanger eingehend erörtert. Das Problem besteht darin, daß Grenzwerte für die zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie nur für horizontal (H) und vertikal (V) platzierte Flächenteilchen angegeben werden. Für den praxisrelevanten Fall einer maßgeblichen Strahlungsasymmetrie rechtwinklig zueinander liegender „Eck“-Flächen (E) fehlen entsprechende Werte.

In Tabelle 1 sind die aus den Ergebnisausdrücken (vgl. Bild 6) gewinnbaren Aussagen, ob es sich bei $\Delta t_{S_{\max}}$ um H-, V- oder E-Anordnungen handelt, zusätzlich vermerkt.

Nach [3] gelten bei einem Unzufriedenheitsgrad von 5%:

Anordnung	Zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie	
	Kühlung	Heizung
H	14 K	4 K
V	10 K	23 K

Bei den Fangerschen Angaben für (H) handelt es sich um Kühl- bzw. Heizdecken.

Aus den Ergebnissen und den Grundsätzen zur thermischen Behaglichkeit leiten sich folgende Feststellungen ab:

F 1.

Die Strahlungstemperatur, bezogen auf ein Kugelelement, ist praktisch gleich dem Mittelwert der Strahlungstemperaturen, bezogen auf die Flächen eines parallel- oder querstehenden Würfelementes.

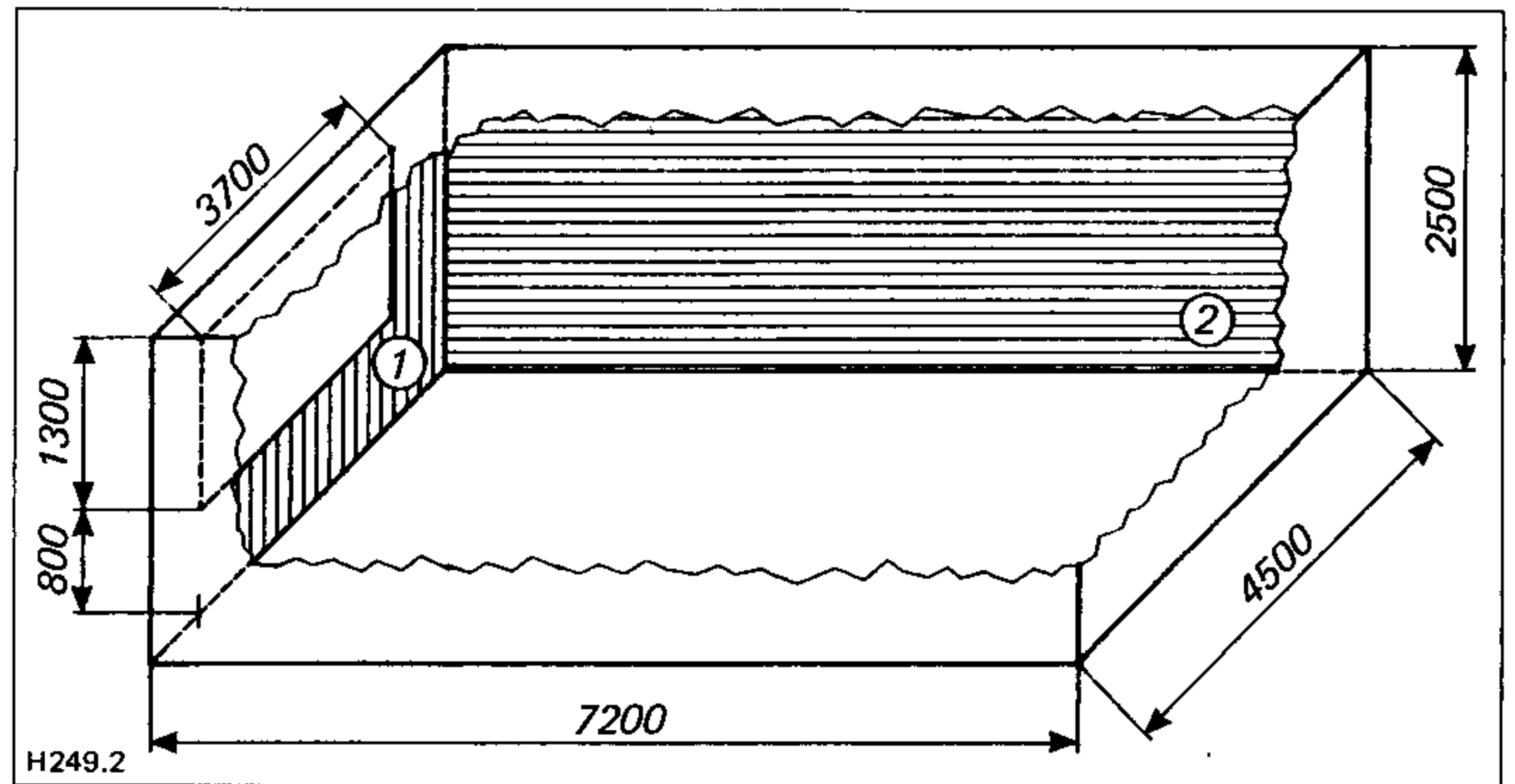


Bild 2: Modellraum – Variante 1 und 2
 Variante Spezifikation

1. Außenwand (1) mit Fenster, 3 Innenwände

- 1.1.K Kühldecke
- 1.2.K Kühldecke, Kühlwand (1)
- 1.3.K Kühldecke, Kühlwand (1) nur Brüstung
- 1.4.K Kühldecke, Kühlwand (1) nur Sturz
- 1.1.H Heizdecke
- 1.2.H Heizdecke, Heizwand (1)
- 1.3.H Heizdecke, Heizwand (1) nur Brüstung
- 1.4.H Heizdecke, Heizwand (1) nur Sturz
- 1.5.H Heizwand (1)
- 1.6.H Heizdecke nur Randzonen
- 1.7.H Heizwand (1) nur Brüstung
- 1.8.H Luftheizung

2. Außenwand (1) mit Fenster, Außenwand (2), 2 Innenwände

- 2.1.K Kühldecke
- 2.2.K Kühldecke, Kühlwand (1)
- 2.3.K Kühldecke, Kühlwand (1), Kühlwand (2)
- 2.1.H Heizdecke
- 2.2.H Heizdecke, Heizwand (1)
- 2.3.H Heizdecke, Heizwand (1), Heizwand (2)
- 2.4.H Heizdecke nur Randzonen
- 2.5.H Heizwand (1)
- 2.6.H Heizwand (1) nur Brüstung

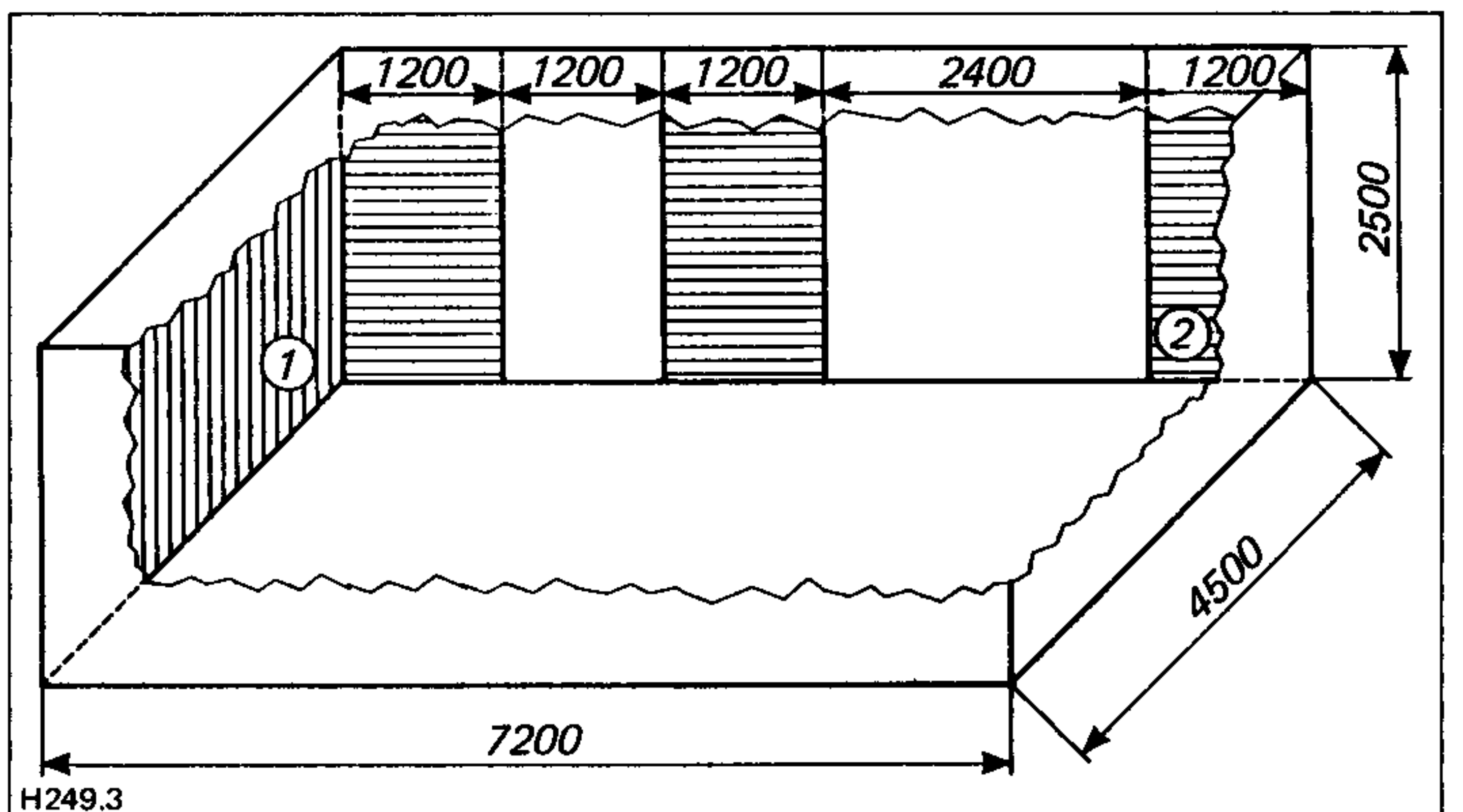


Bild 3: Modellraum – Variante 3
 Variante Spezifikation

3. Außenwand (2) mit zwei Glasflächen, 3 Innenwände

- 3.1.K Kühldecke
- 3.2.K Kühldecke, Kühlwand (2)
- 3.1.H Heizdecke

- 3.2.H Heizdecke, Heizwand (2)
- 3.3.H Heizwand (2)
- 3.4.H Heizdecke nur Randzonen

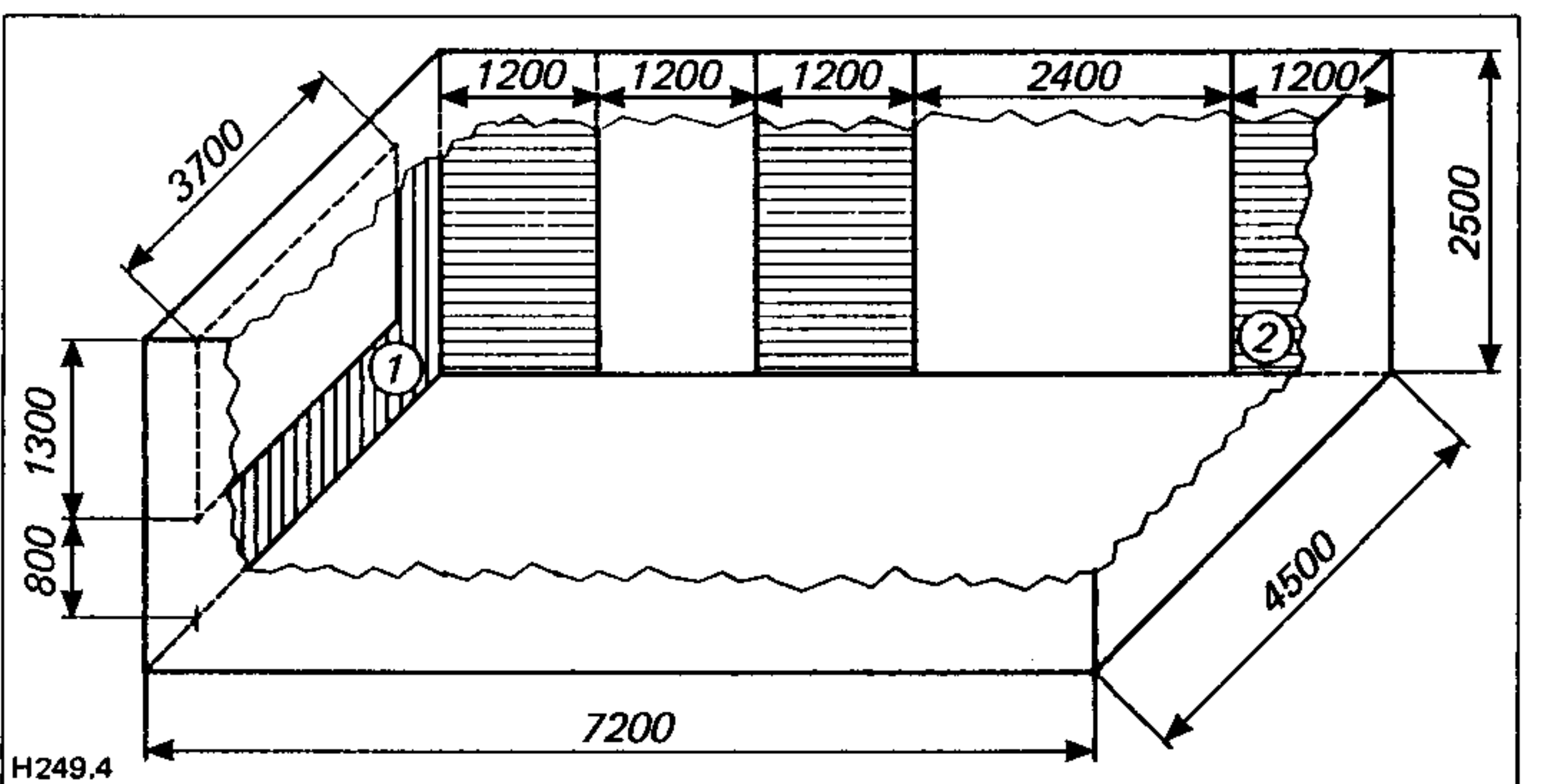


Bild 4: Modellraum – Variante 4
 Variante Spezifikation

4. Außenwand (1) mit Fenster, Außenwand (2) mit zwei Glasflächen, 2 Innenwände

- 4.1.K Kühldecke
- 4.2.K Kühldecke, Kühlwand (1), Kühlwand (2)
- 4.3.K Kühlwand (1), Kühlwand (2)
- 4.1.H Heizdecke

- 4.2.H Heizdecke, Heizwand (1), Heizwand (2)
- 4.3.H Heizwand (1), Heizwand (2)
- 4.4.H Heizdecke nur Randzonen
- 4.5.H Heizwand (1) nur Brüstung

Die Werte $t_{U(P)}$, t_{S1} und t_{S2} unterscheiden sich um maximal 0,1 K (vgl. Bild 6). Dies bestätigt die Richtigkeit der Orientierung des Wüfelementes mit Parallelfächen zur Decke und zum Boden.

F 2.

Die Verteilung der Strahlungstemperatur $t_{U,P}$ und der maximalen Strahlungstemperatur-Asymmetrie $\Delta t_{S,P}$ bzw. $\Delta t_{Sq,P}$ über den Raumgrundriß sind die entscheidenden Kriterien, die Anordnung thermisch aktiver Flächen zu bewerten.

Für eine Schnellbeurteilung sind der maximale Strahlungstemperatur-Unterschied Δt_U und die maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie $\Delta t_{S,max}$ verwendbar.

Die mit den Flächen gewichtete, mittlere Umfassungstemperatur hat keine Aussagekraft.

F 3.

Thermisch ideal wären konstante Luft- und Strahlungstemperaturen $t_{L,P}$ und $t_{U,P}$ an jedem Kontrollpunkt P des Raumes. Es würde dann für die Differenz $\Delta t_U = 0$ gelten.

Eine weitere Idealforderung wären allseitig gleiche Strahlungstemperaturen, dies bedeutete $\Delta t_{S,max} = 0$.

Je nach Raumluftrömung weichen in Wirklichkeit die örtlichen Lufttemperaturen vom Raummittelwert ab. Die Strahlungstemperaturen sollen dies durch gegensätzliche, aber betragsmäßig gleiche Änderungen kompensieren. So sind in der Nähe von kalten Außenwänden auch niedrigere Lufttemperaturen zu erwarten; erhöhte Strahlungstemperaturen wären in dieser Umgebung vorteilhaft.

Eine genaue Quantifizierung dieser Größen ist jedoch nicht möglich, da die Lufttemperaturprofile derzeit noch nicht exakt voraus-sagbar sind.

F 4.

Werden thermisch belastete Flächen durch gegenüberliegende Flächen gegensätzlicher Temperatur kompensiert, so ist das Strahlungstemperatur-Profil ausgleichbar.

Bei veränderten Lastbedingungen ergeben sich mitunter sehr ungünstige Temperaturverteilungen.

So wirken Kühldecken den hohen Temperaturen der Möblierungsebene – vor allem im Rauminneren – wirkungsvoll entgegen (Bild 7, Variante 1.1.K). Die erhöhte Temperatur der Außenwand wird jedoch ungenügend kompensiert. Im Heizfall (Variante 1.1.H) ergeben sich zu hohe Strahlungstemperaturen in Raummitte und zu niedrige in Nähe der Außenwand, wenn von einer gleichmäßigen Deckentemperatur ausgegangen wird.

F 5.

Die thermische Kompensation der Strahlungstemperatur mittels gegenüberliegender Flächen bewirkt große Strahlungsasymmetrien.

Bei Kühldeckenbetrieb (Bild 8, Variante 1.1.K) wird in Raummitte $\Delta t_{S,max} = 9,5$ K durch die Gegenüberstellung von Kühldecke und Möblierungsebene bei Horizontallage (H) der Prüfflächen erreicht. Dieser Wert liegt noch im zulässigen Bereich.

Bemerkenswert ist, daß aus Sicht der Strahlungstemperatur-Asymmetrie auch die Heizdecke noch akzeptiert werden kann. Dem für Horizontallage (H) zulässigen Wert 4 K stehen vorhandene 4,1 K gegenüber. Höhere Werte treten in Außenwandnähe auf, hervorgerufen durch deren Temperatur und die Deckentemperatur. Es handelt sich somit um eine Ecklage (E), für die wärme-physiologische Grenzwerte fehlen.

F 6.

Eine Kompensation der niedrig- oder hochtemperierten Flächen kann bei geringster Strahlungsasymmetrie wirkungsvoll nur durch eine gleichorientierte Fläche gegensätzlicher Temperatur erfolgen.

Dies bestätigen die Varianten 1.1 bis 1.4 anschaulich:

Eingabewerte

Raumlänge L = 7.20 m Möblierungsebene
Raumbreite B = 4.50 m Höhe HH = 0.85 m
Raumhöhe H = 2.50 m Flächenanteil v = 0.40

Neigungswinkel linke Wand $\alpha = 0.0^\circ$ Prüfebene Höhe PH = 1.10 m

Linke Wand i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)	t(i)
1	0.00	0.00	0.00	4.50	0.00	0.80	3.60	26.0
2	0.00	0.00	0.40	4.10	0.80	2.10	4.81	33.0
3	0.00	0.00	0.00	4.50	2.10	2.50	1.80	26.0
4	0.00	0.00	0.00	0.40	0.80	2.10	0.52	26.0
5	0.00	0.00	4.10	4.50	0.80	2.10	0.52	26.0

Rechte Wand i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)	t(i)
6	7.20	7.20	0.00	2.25	0.00	2.50	5.63	25.3
7	7.20	7.20	2.25	4.50	0.00	2.50	5.63	25.3
8	7.20	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
9	7.20	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
10	7.20	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0

Vordere Wand i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)	t(i)
11	0.00	3.60	0.00	0.00	0.00	2.50	9.00	25.3
12	3.60	7.20	0.00	0.00	0.00	2.50	9.00	25.3
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0

Hintere Wand i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)	t(i)
16	0.00	1.20	4.50	4.50	0.00	2.50	3.00	25.3
17	1.20	2.40	4.50	4.50	0.00	2.50	3.00	25.3
18	2.40	3.60	4.50	4.50	0.00	2.50	3.00	25.3
19	3.60	6.00	4.50	4.50	0.00	2.50	6.00	25.3
20	6.00	7.20	4.50	4.50	0.00	2.50	3.00	25.3

Boden i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)	t(i)
21	0.00	3.60	0.00	4.50	0.00	0.00	16.20	27.7
22	3.60	7.20	0.00	4.50	0.00	0.00	16.20	27.7
23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0

Decke i	xmin	xmax	ymin	ymax	zmin	zmax	A(i)	t(i)
26	0.00	0.60	0.00	4.50	2.50	2.50	2.70	16.1
27	6.60	7.20	0.00	4.50	2.50	2.50	2.70	16.1
28	0.60	6.60	3.90	4.50	2.50	2.50	3.60	16.1
29	0.60	6.60	0.00	0.60	2.50	2.50	3.60	16.1
30	0.60	6.60	0.60	3.90	2.50	2.50	19.80	16.1

Möblierungsebene i	A(i)	t(i)
31	12.96	32.0
32	12.96	26.0

Koordinaten in m; Flächen in m²; Temperaturen in °C
H249.5

Bild 5: Eingabedaten zur Variante 1.1.K

Strahlungstemperaturen und Strahlungstemperatur - Asymmetrien

P l b	tSmax	tSmin	tSqmax	tSqmin	dtS	dtSq	iSmax/ iSmin	iSqmax/ iSqmin	tU(P)	tS1/tS2
1 1	27.9	22.1	27.8	22.1	5.8	5.7	1/6	1/6	25.3	25.3 25.3
1 2	29.6	21.5	28.4	21.5	8.1	6.9	1/6	1/6	25.6	25.6 25.5
1 3	29.8	21.3	28.4	21.3	8.5	7.1	1/6	1/6	25.6	25.6 25.5
1 4	29.6	21.5	28.4	21.5	8.1	6.9	1/6	4/6	25.6	25.6 25.5
1 5	27.9	22.1	27.8	22.1	5.8	5.7	1/6	4/6	25.3	25.3 25.3
2 1	26.9	20.2	26.9	20.2	6.7	6.7	5/6	5/6	24.4	24.4 24.3
2 2	27.3	18.7	27.3	18.7	8.6	8.6	5/6	5/6	24.2	24.1 24.1
2 3	27.4	18.4	27.4	18.4	9.1	9.1	5/6	5/6	24.1	24.0 24.0
2 4	27.3	18.7	27.3	18.7	8.6	8.6	5/6	5/6	24.2	24.1 24.1
2 5	26.9	20.2	26.9	20.2	6.7	6.7	5/6	5/6	24.4	24.4 24.3
3 1	26.9	19.9	26.9	19.9	7.0	7.0	5/6	5/6	24.2	24.1 24.1
3 2	27.3	18.3	27.3	18.3	9.0	9.0	5/6	5/6	23.9	23.7 23.8
3 3	27.4	17.9	27.4	17.9	9.5	9.5	5/6	5/6	23.8	23.6 23.7
3 4	27.3	18.3	27.3	18.3	9.0	9.0	5/6	5/6	23.9	23.7 23.8
3 5	26.9	19.9	26.9	19.9	7.0	7.0	5/6	5/6	24.2	24.1 24.1
4 1	26.9	20.0	26.9	20.0	6.8	6.8	5/6	5/6	24.1	24.1 24.1
4 2	27.3	18.5	27.3	18.5	8.8	8.8	5/6	5/6	23.7	23.8 23.8
4 3	27.4	18.1	27.4	18.1	9.3	9.3	5/6	5/6	23.8	23.6 23.7
4 4	27.3	18.5	27.3	18.5	8.8	8.8	5/6	5/6	23.8	23.8 23.8
4 5	26.9	20.0	26.9	20.0	6.8	6.8	5/6	5/6	24.1	24.1 24.1
5 1	26.6	21.1	26.6	21.1	5.5	5.5	5/6	5/6	24.4	24.4 24.4
5 2	26.9	19.9	26.9	19.9	7.1	7.1	5/6	5/6	24.1	24.1 24.1
5 3	27.0	19.6	27.0	19.6	7.4	7.4	5/6	5/6	24.1	24.0 24.0
5 4	26.9	19.9	26.9	19.9	7.1	7.1	5/6	5/6	24.1	24.1 24.1
5 5	26.6	21.1	26.6	21.1	5.5	5.5	5/6	5/6	24.4	24.4 24.4

Temperaturen in °C; Temperaturdifferenzen in K

Maximaler Unterschied der Strahlungstemperaturen $t_U(P)$: 1.9 K

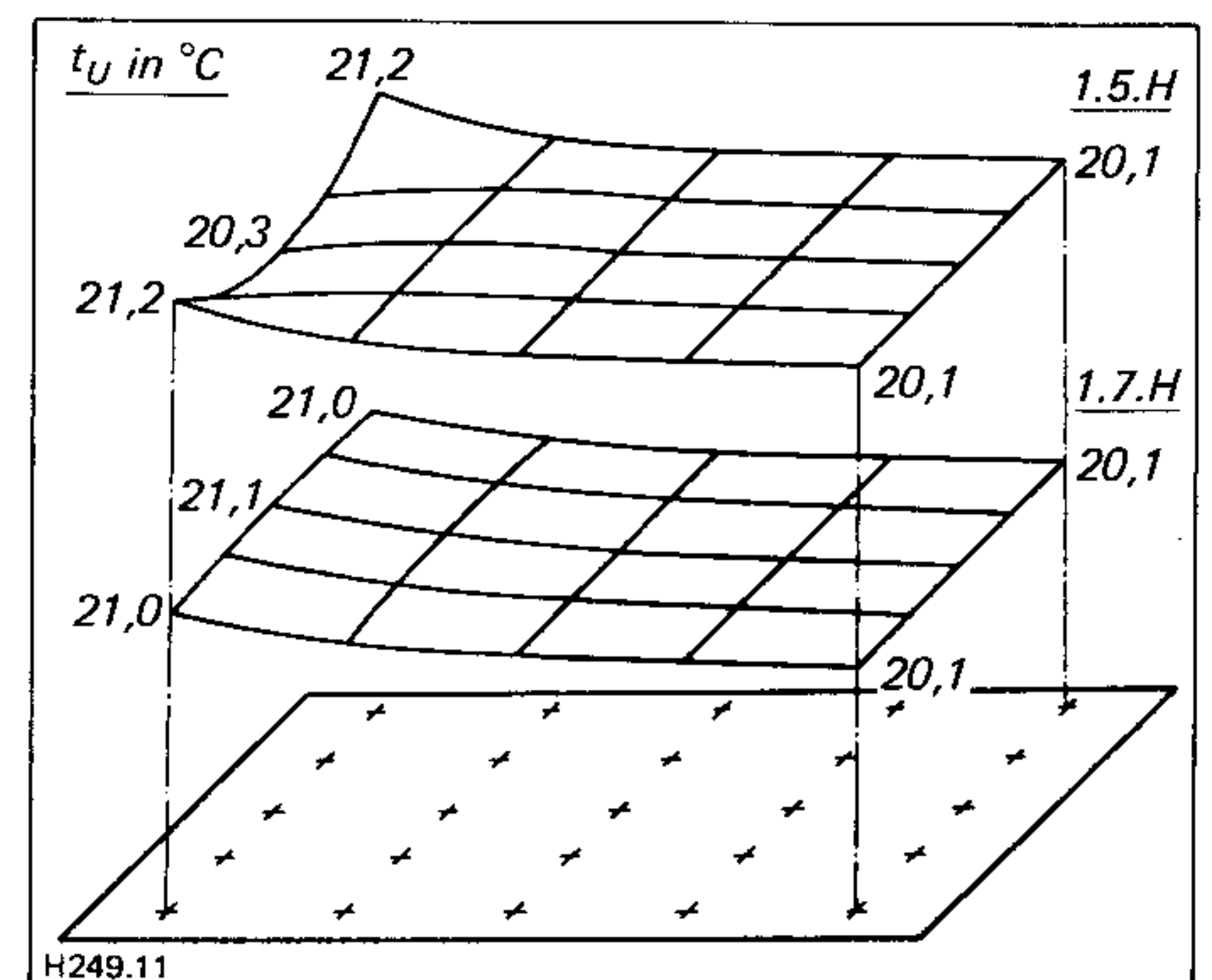
Maximale Asymmetrie : 9.5 K am Prüfungspunkt (3,3)

Minimale Asymmetrie : 5.5 K am Prüfungspunkt (5,1)

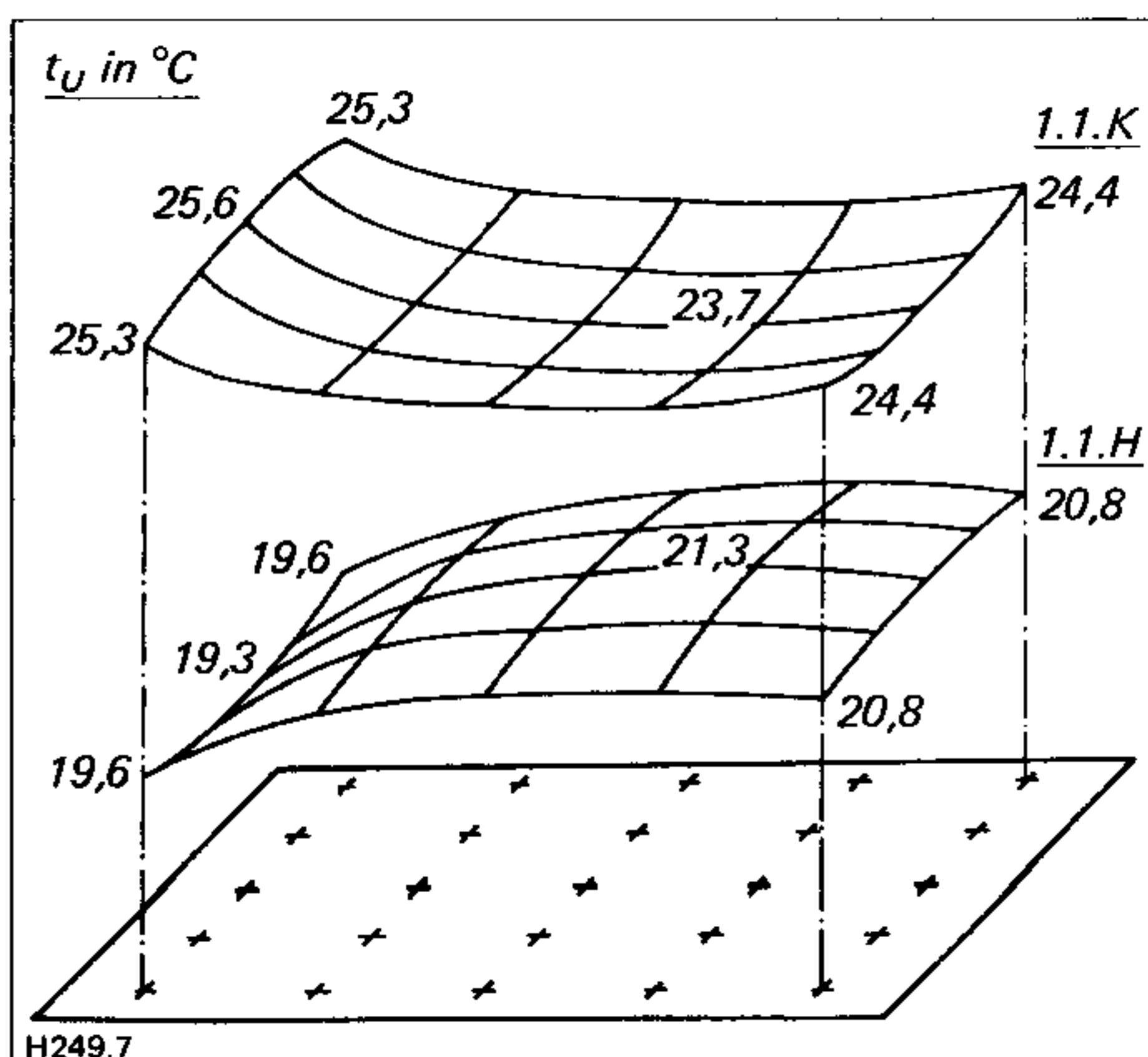
H249.6

Bild 6: Ausgabedaten zur Variante 1.1.K

Bild 11: Strahlungstemperaturen der Varianten 1.5.H und 1.7.H (eine Außenwand mit Fenster; Außenwandheizung bzw. Brüstungsheizung)

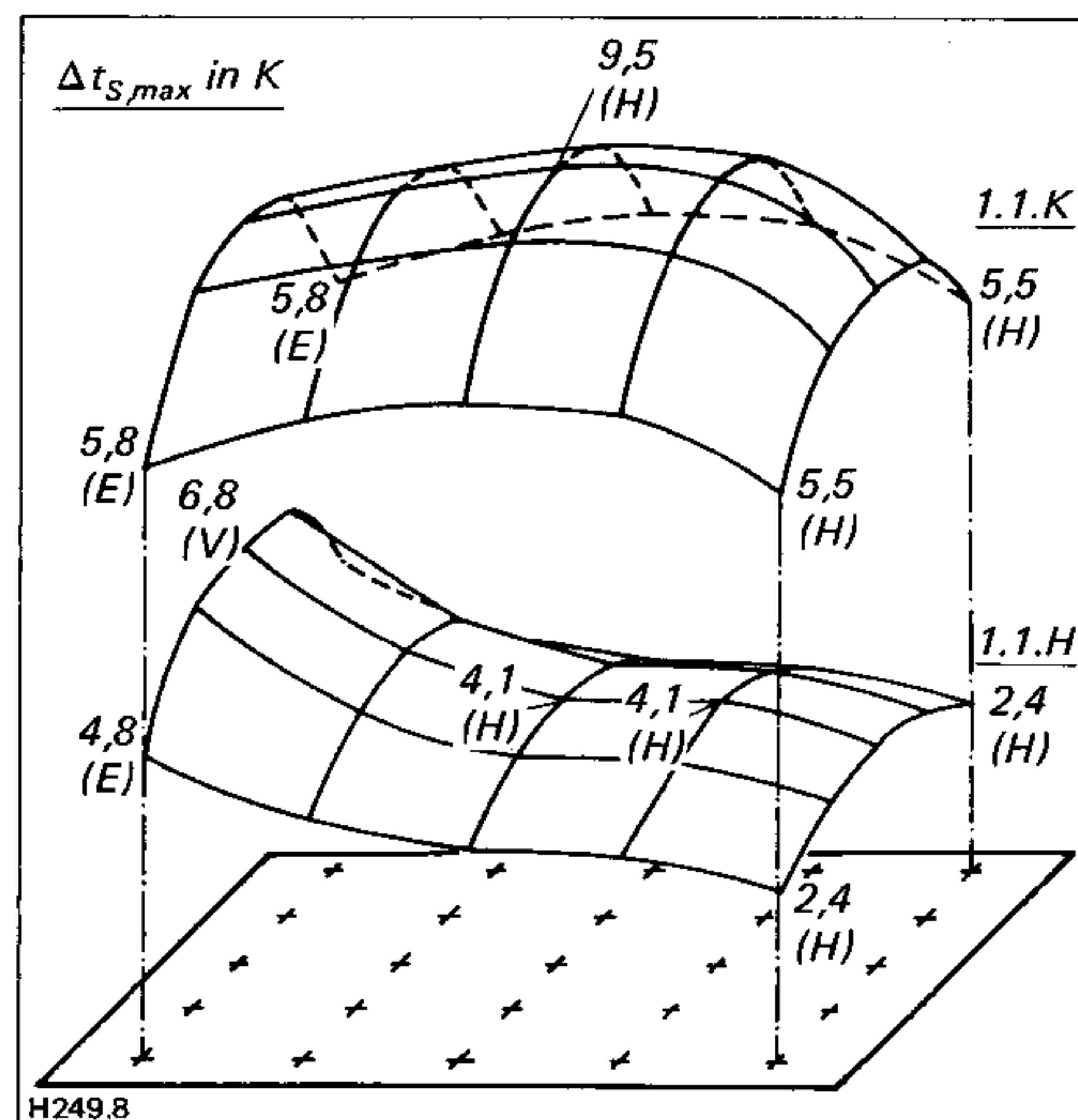


H249.11



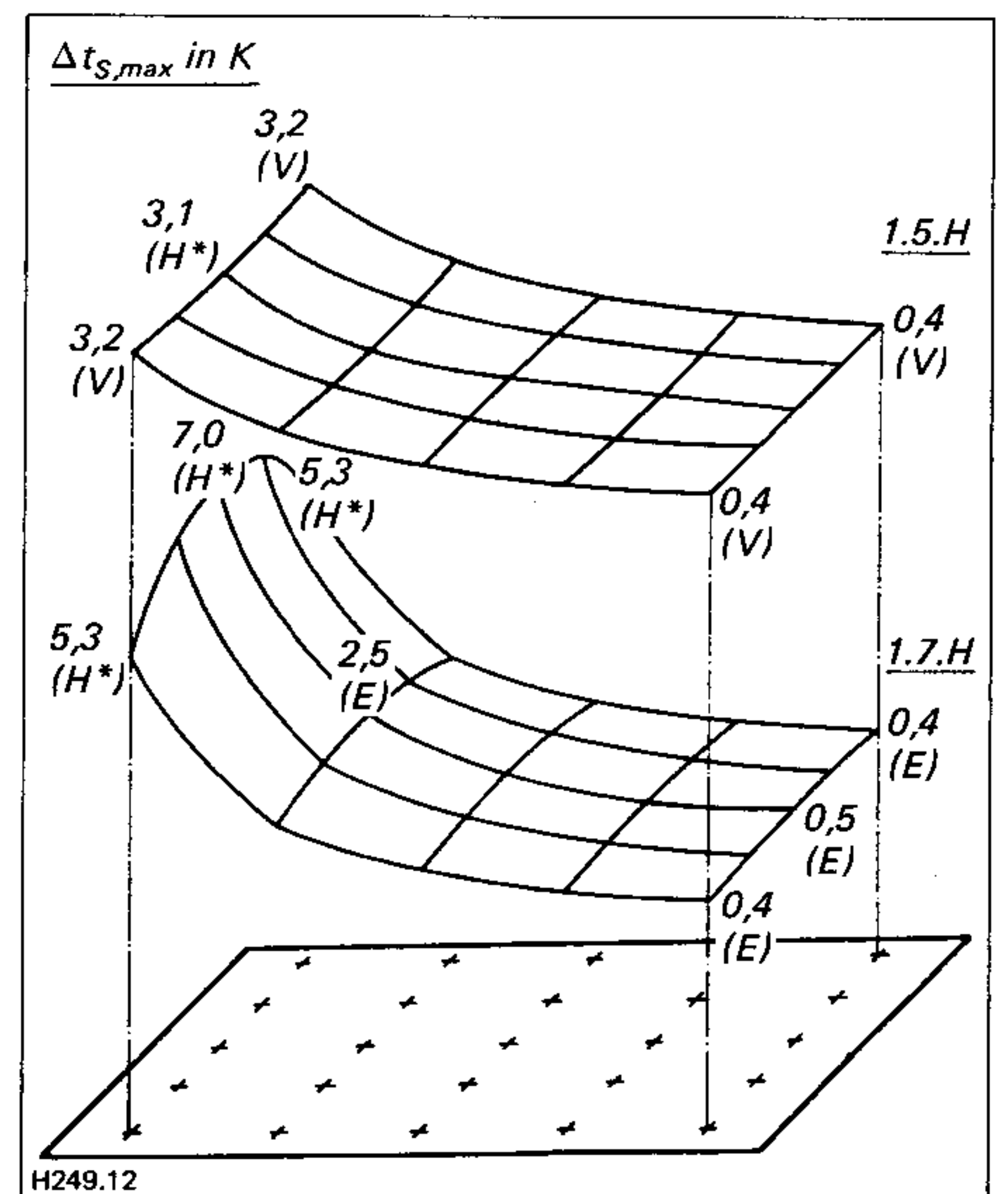
H249.7

Bild 7: Strahlungstemperaturen der Varianten 1.1.K und 1.1.H (eine Außenwand mit Fenster; Deckenkühlung bzw. Deckenheizung)



H249.8

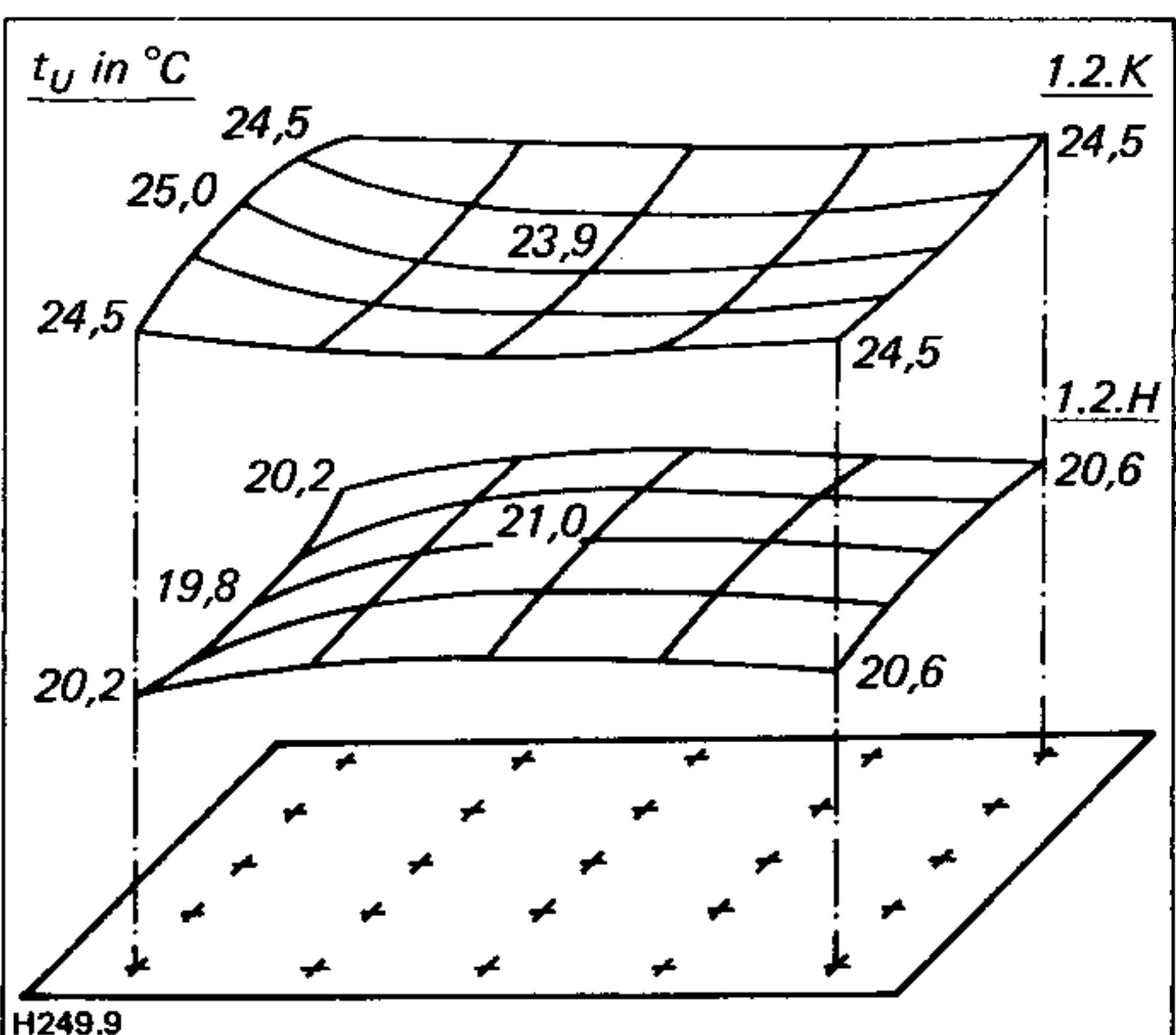
Bild 8: Strahlungstemperatur-Asymmetrien der Varianten 1.1.K und 1.1.H (eine Außenwand mit Fenster; Deckenkühlung bzw. Deckenheizung)



H249.12

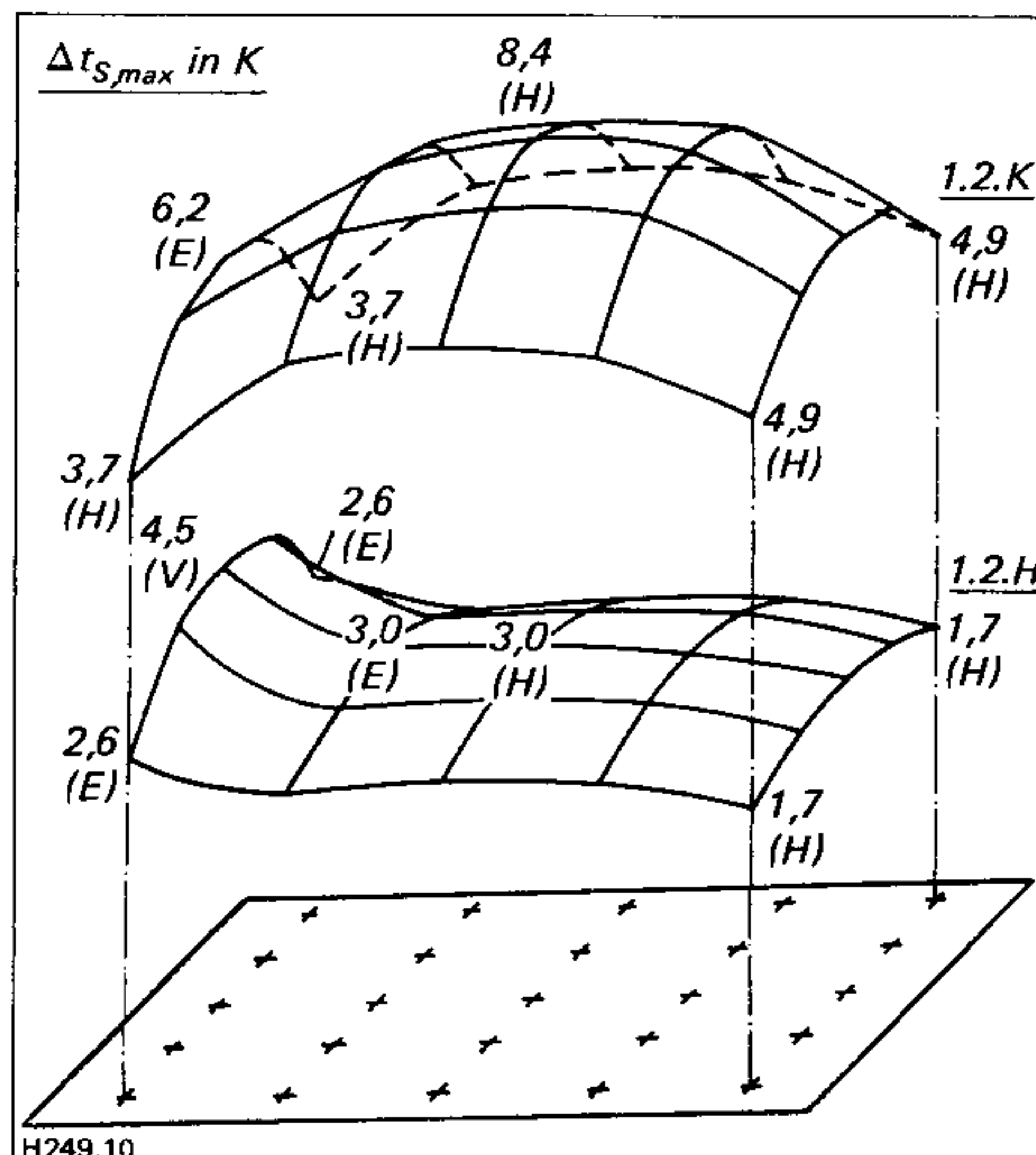
Bild 12: Strahlungstemperatur-Asymmetrien der Varianten 1.5.H und 1.7.H (eine Außenwand mit Fenster; Außenwandheizung bzw. Brüstungsheizung)

* Die Strahlungstemperatur des unteren Halbraumes ist größer als die des oberen Halbraumes. Es gelten somit die zulässigen Grenzwerte für Kühldecken



H249.9

Bild 9: Strahlungstemperaturen der Varianten 1.2.K und 1.2.H (eine Außenwand mit Fenster; Decken- und Außenwandkühlung bzw. Decken- und Außenwandheizung)



H249.10

Bild 10: Strahlungstemperatur-Asymmetrien der Varianten 1.2.K und 1.2.H (eine Außenwand mit Fenster; Decken- und Außenwandkühlung bzw. Decken- und Außenwandheizung)

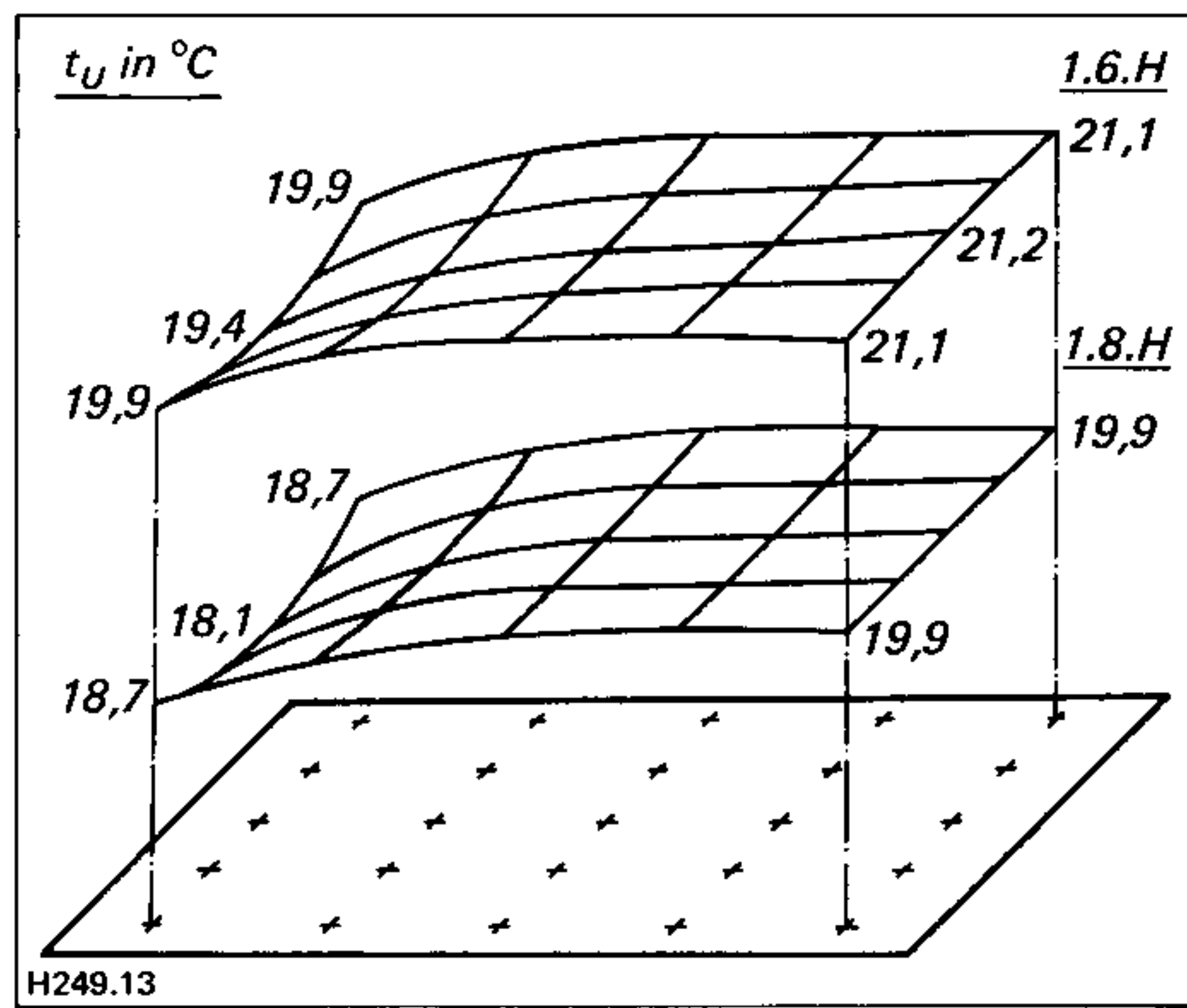


Bild 13: Strahlungstemperaturen der Varianten 1.6.H und 1.8.H (eine Außenwand mit Fenster; Decken-Randzonenheizung bzw. Luftheizung)

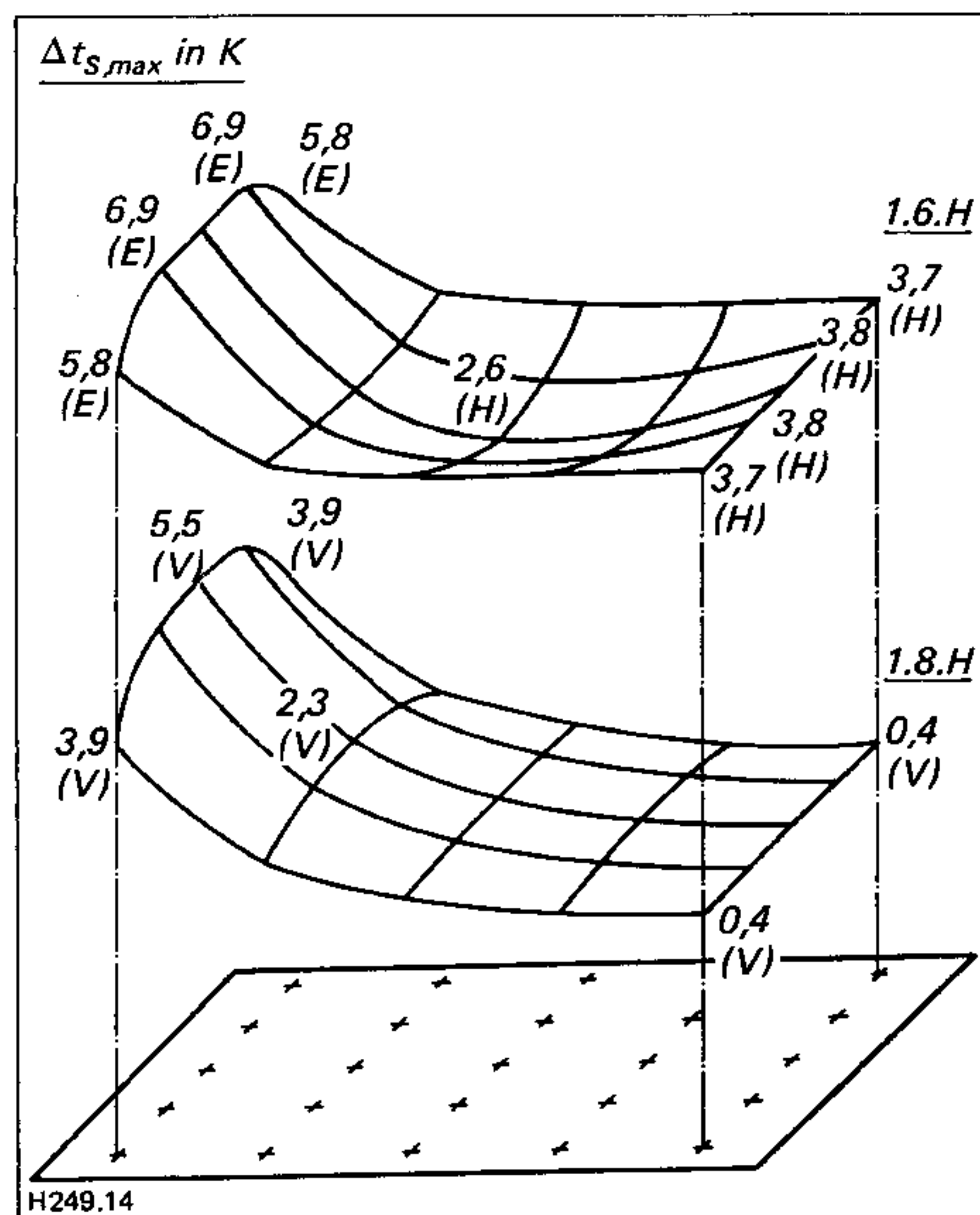


Bild 14: Strahlungstemperatur-Asymmetrien der Varianten 1.6.H und 1.8.H (eine Außenwand mit Fenster; Decken-Randzonenheizung bzw. Luftheizung)

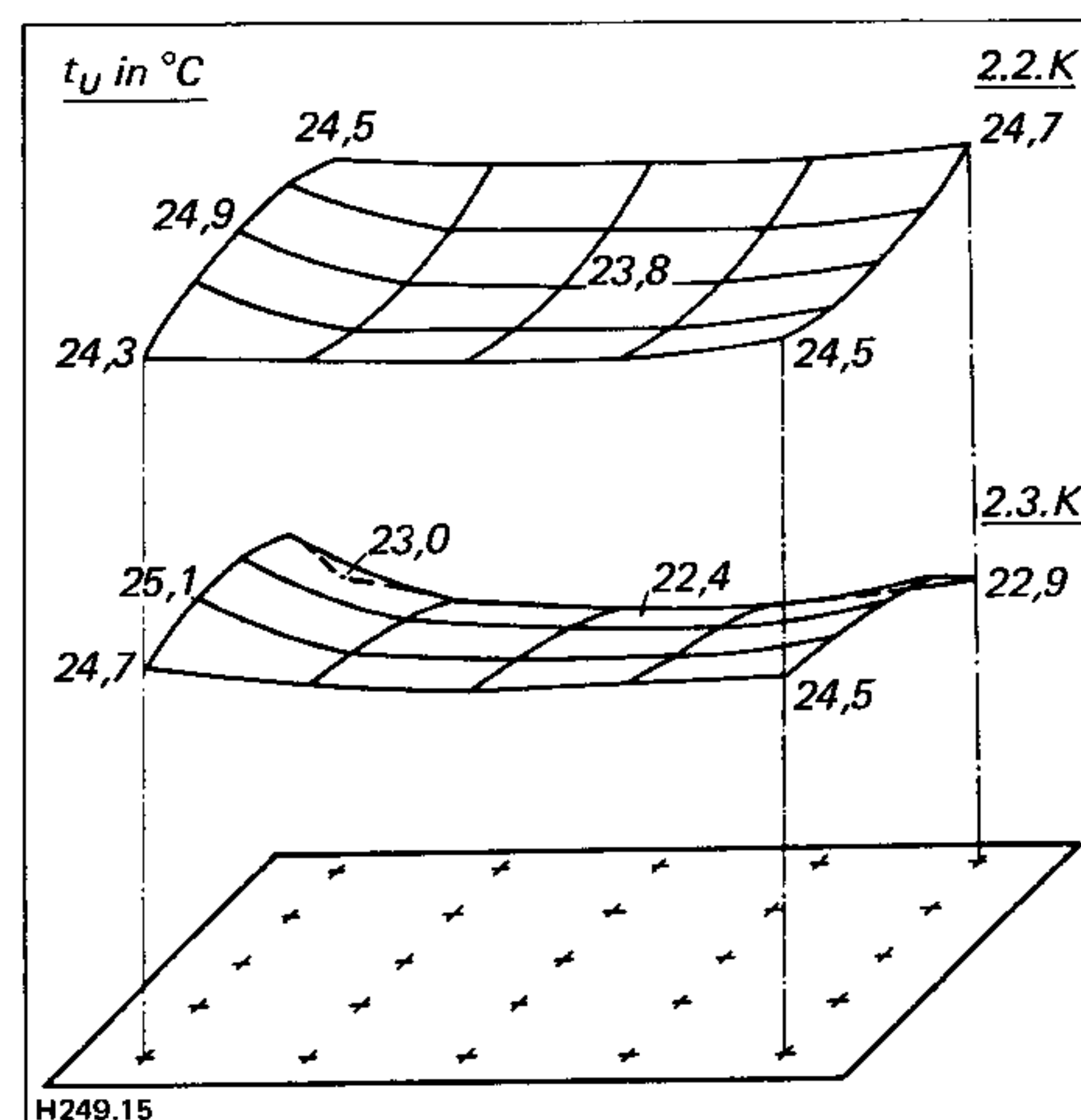


Bild 15: Strahlungstemperaturen der Varianten 2.2.K und 2.3.K (eine Außenwand mit Fenster und eine Außenwand ohne Fenster; Kühlung der Decke und der „Fenster“-Außenwand bzw. der Decke und bei der Außenwände)

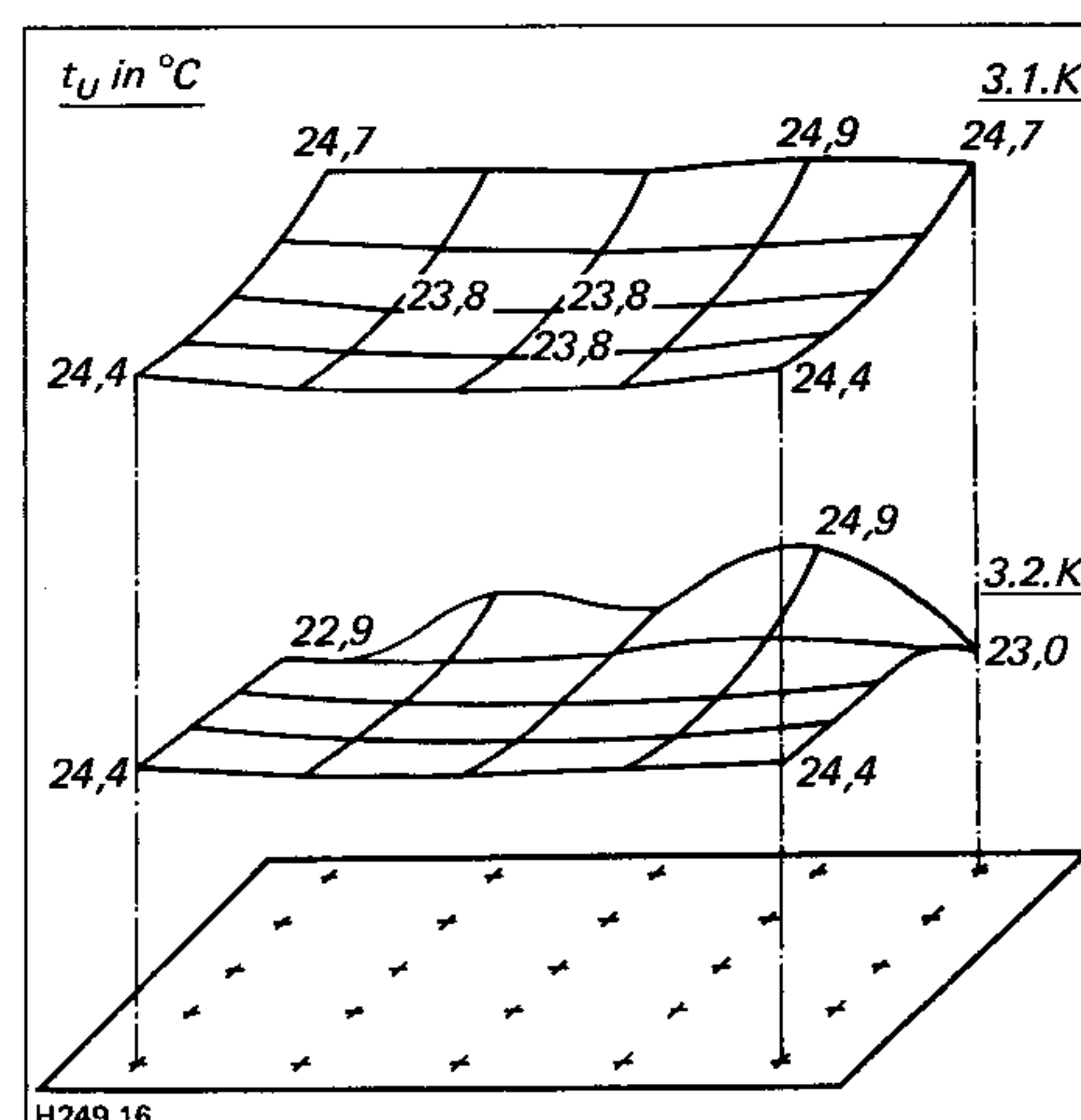


Bild 16: Strahlungstemperaturen der Varianten 3.1.K und 3.2.K (Außenwand mit zwei Glasflächen; Deckenkühlung bzw. Decken- und Außenwandkühlung)

Aktive Flächen	Kühlung			Heizung		
	$\bar{t}_W$ °C	Δt_U K	$\Delta t_{s,max}$ K	$\bar{t}_W$ °C	Δt_U K	$\Delta t_{s,max}$ K
Decke	29,0	1,9	9,5	14,5	2,0	6,8
Decke, Sturz	27,5	1,7	9,3	15,8	1,9	6,7
Decke, Brüstung	26,1	1,2	8,8	17,0	1,4	4,8
Decke, Wand	24,1	1,1	8,4	18,7	1,3	4,5

Je besser sich die mittlere Temperatur $\bar{t}_W$ der Außenwand einschließlich Fenster der gewünschten Raumtemperatur (24 °C bzw. 20 °C) annähert, um so geringer werden Δt_U und $\Delta t_{s,max}$.

Während der Verlauf der Strahlungstemperatur $t_{U,P}$ im Kühlfall (Bild 9, Variante 1.2.K) akzeptiert wird, bedarf der Heizfall (Variante 1.2.H) noch der Verbesserung.

Die in Bild 1 dargestellten Asymmetrien sind in beiden Fällen zulässig.

F 7.

Bei Heizbetrieb ist es vorteilhaft, wenn Teile der Außenwandflächen mit höherer Temperatur als die Deckenflächen betrieben werden. Evtl. sind Deckenelemente im Rauminneren abzuschalten.

Gemäß Bild 11 liefern alleinige Wandheizungen (Variante 1.5.H), vor allem jedoch Brüstungsheizungen (Variante 1.7.H), sehr gute Strahlungstemperaturverteilungen $t_{U,P}$.

Die Strahlungsasymmetrie (Bild 12) weist bei der Wandbeheizung bedeutend günstigere Werte als bei der Brüstungsheizung auf.

F 8.

Decken-Randzonenheizungen (Bild 13, Variante 1.6.H) und Luftheizungen (Variante 1.8.H) erfüllen die Forderungen an ein ausgeglichenes bzw. zur Außenwand hin steigendes Strahlungstemperaturfeld nicht. (Luftheizungen müssen die erwärmte Luft in Fensternähe einblasen!)

Die Strahlungsasymmetrie (Bild 14) wäre für beide Varianten akzeptabel.

F 9.

Wird ein Raum von zwei Außenwänden unterschiedlicher thermischer Belastung begrenzt, so sind die Kompensationsmaßnahmen zu differenzieren.

Bild 15 zeigt für Variante 2.2.K (Decke und Wand (1) gekühlt) eine bedeutend günstigere $t_{U,P}$ -Verteilung als für Variante 2.3.K (Decke, Wand (1) und Wand (2) gekühlt). Im letzten Fall entstand eine Überkompensation, da die Wand (2) keine transparenten Elemente enthält.

Soll keine Teilfläche von Wand (2) mit thermisch aktiven Paneelen belegt und nicht mit unterschiedlichen Verlauftemperaturen gefahren werden, so ist nach Tabelle 1 für den Kühl- und Heizfall die Variante 2.2 (aktive Flächen: Decke, Wand (1)) der technisch optimale Kompromiß.

F 10.

Außenwände mit großflächigen, über die gesamte Geschoßhöhe reichenden Glasflächen lassen sich im Kühlfall mit Kühldecken beherrschen, wenn die direkte Sonneneinstrahlung ausgeschlossen wird. Im Heizfall sind mit Wand- und Deckenstrahlungsflächen allein keine befriedigenden Lösungen erreichbar (siehe auch [4]).

Die in den Bildern 16 und 17 dargestellten Varianten 3.1.K, 3.2.K, 3.1.H sowie 3.2.H zeigen, daß ein Zusammenwirken von Decken- und Wandfläche (2) zu einer Überkompensation in Nähe der Außenwände führt. Eine separate Deckenkühlung bzw. -heizung liefert ein ausgeglicheneres Strahlungstemperaturprofil. Eine Ver-

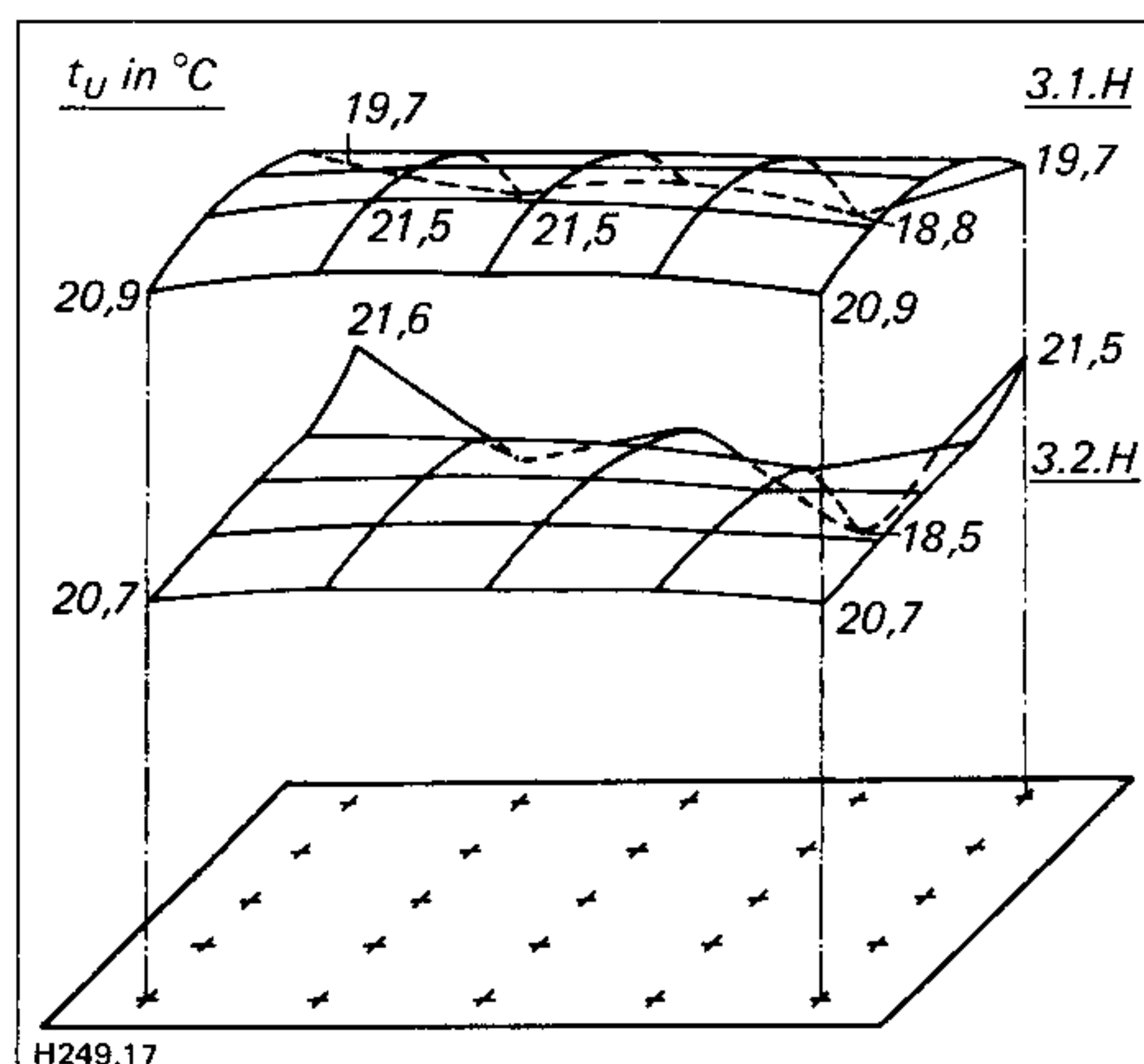


Bild 17: Strahlungstemperaturen der Varianten 3.1.H und 3.2.H (Außenwand mit zwei Glasflächen; Deckenheizung bzw. Decken- und Außenwandheizung)

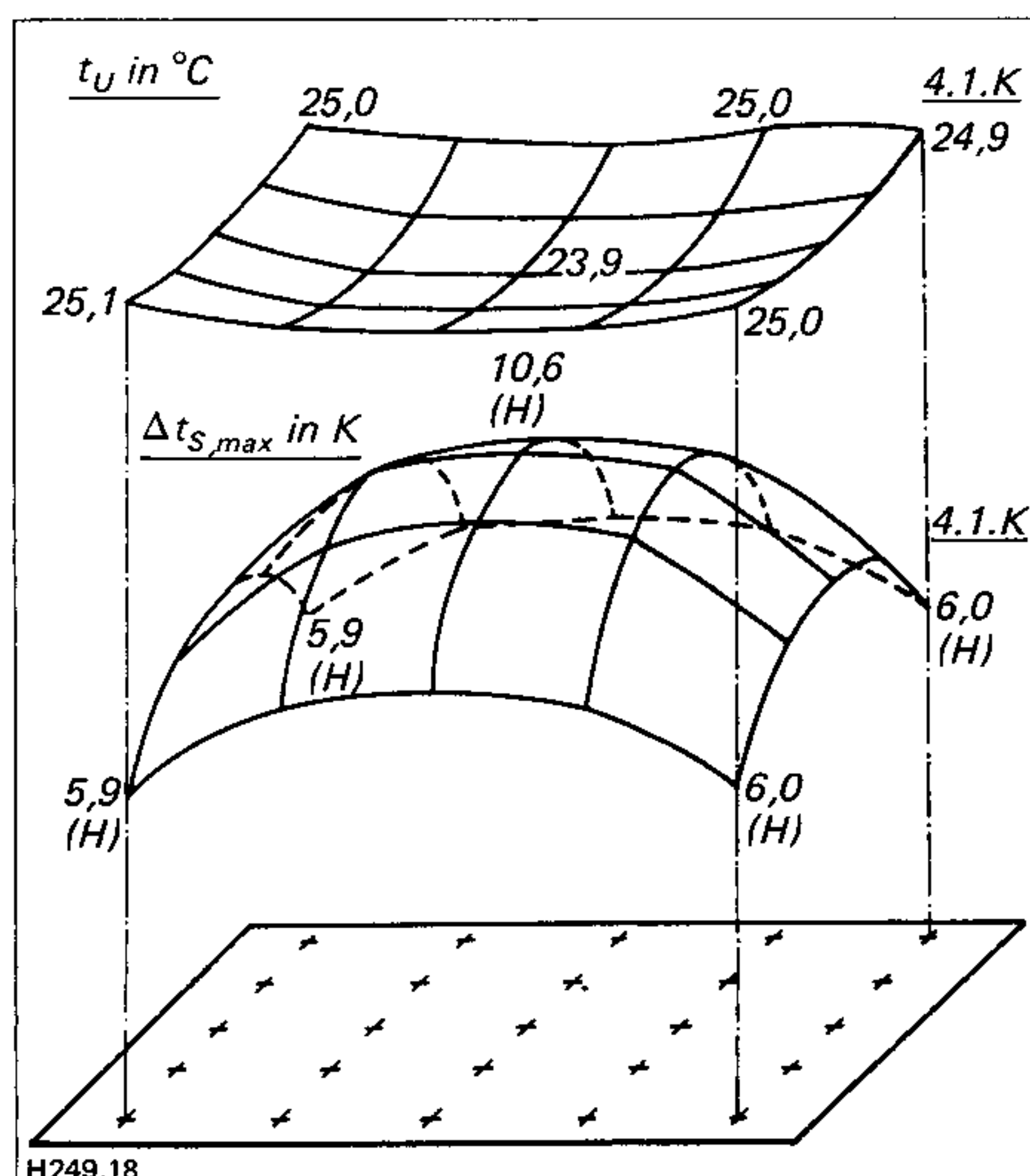


Bild 18: Strahlungstemperaturen und Strahlungstemperatur-Asymmetrien der Variante 4.1.K (Außenwand mit Fenster und Außenwand mit zwei Glasflächen; Deckenkühlung)

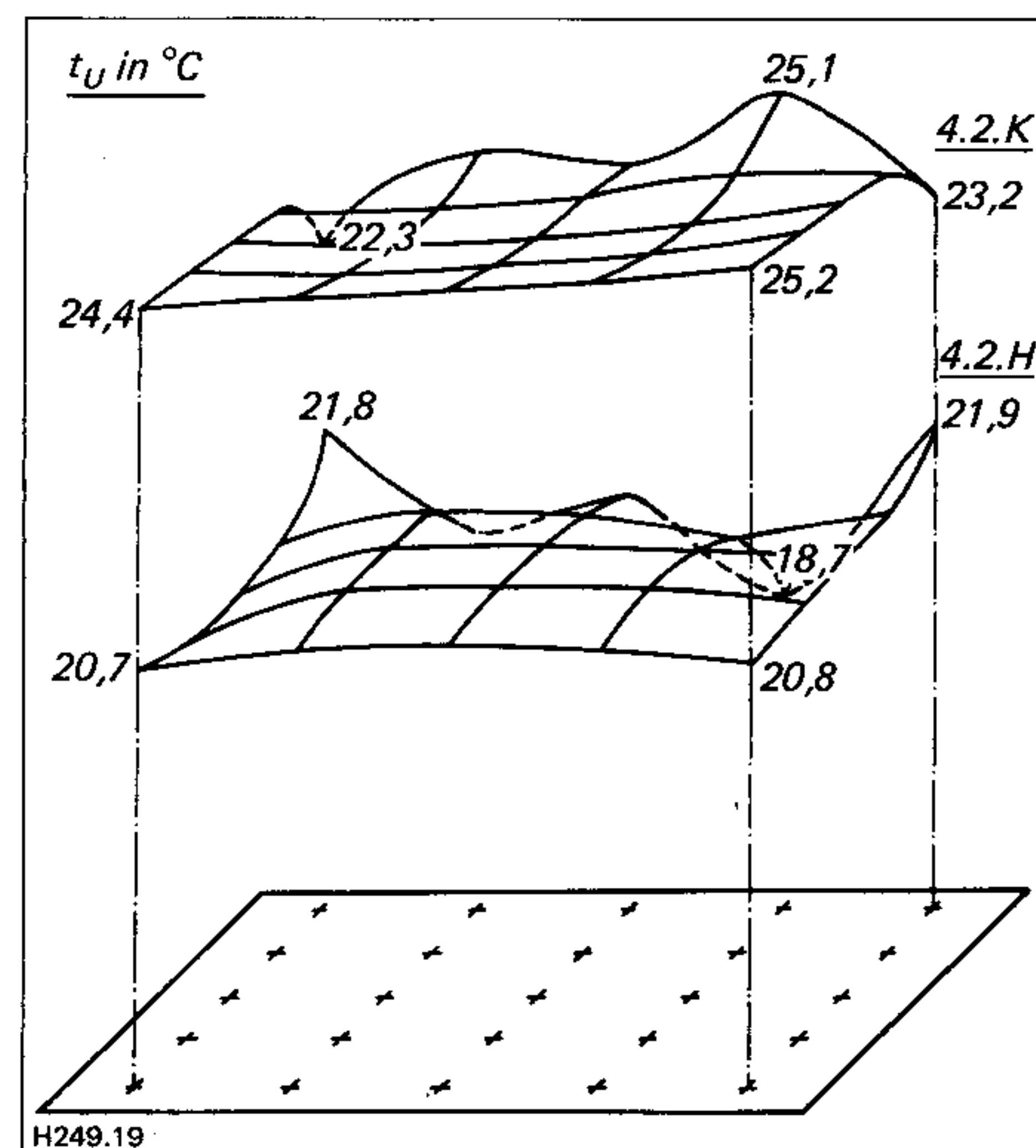


Bild 19: Strahlungstemperaturen der Varianten 4.2.K und 4.2.H (eine Außenwand mit Fenster und eine Außenwand mit zwei Glasflächen; Kühlung bzw. Beheizung der Decke und beider Außenwände)

besserung ist denkbar, wenn spezielle Teile der Außenwand – beispielsweise ohne Eckbereiche – aktiviert werden.

F 11.

Für Eckaußenwände mit stark unterschiedlichem, verschatteten Fensteranteil und hohen inneren Wärmelasten sind Kühldecken trotz großer Strahlungsasymmetrien geeignete Lösungen. Für den Heizfall gilt Aussage F 10.

Aktive Flächen	$\nu = 0,4$					
	$PH = 0,9 \text{ m}$		$PH = 1,1 \text{ m}$		$PH = 1,5 \text{ m}$	
	Δt_U K	$\Delta t_{S,max}$ K	Δt_U K	$\Delta t_{S,max}$ K	Δt_U K	$\Delta t_{S,max}$ K
Decke	1,7	9,2	1,9	9,5	2,1	10,3
Decke, Wand	0,7	8,1	1,1	8,4	1,4	8,8

Aktive Flächen	$\nu = 0,4$		$\nu = 0,2$	
	$PH = 0,5 \text{ m}$		$PH = 1,1 \text{ m}$	
	Δt_U K	$\Delta t_{S,max}$ K	Δt_U K	$\Delta t_{S,max}$ K
Decke	1,1	8,4	1,8	10,7
Decke, Wand	0,6	7,6	1,0	9,5

Das Bild 18 zeigt die Strahlungstemperaturverteilung der Kühldeckenvariante 4.1.K. Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie ist mit $\Delta t_{S,max} = 10,6 \text{ K}$ sehr groß, aber gerade noch vertretbar.

Das komplette Einbeziehen der beiden Wandflächen (Bild 19, Varianten 4.2.K und 4.2.H) liefert unakzeptable Lösungen.

F 12.

Veränderte Flächenanteile der Möblierungsebene sowie die Variation der Prüfhöhen ergeben keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse zur Anordnung thermisch aktiver Wand- und Deckenflächen.

Dies bestätigen zusätzliche geometrische Umstellungen der Varianten 1.1.K und 1.2.K:

Mit zunehmender Prüfhöhe werden bei Einsatz von Kühldecken die Unterschiede in den Temperaturprofilen größer. In diesen Trend passen sogar Prüfanordnungen unterhalb der Möblierungsebene.

Schlußfolgerung

Ganzheitliche Installationssysteme zur Kühlung und Heizung von Büroräumen werden aus wirtschaftlichen, gestalterischen und betriebstechnischen Gründen gefordert. Der Einsatz von Decken- und Wandpaneelen bietet sich an. Als Bewertungsmaßstab zur wärmephysiologisch optimalen Anordnung von Kühl- und Heizflächen im Raum dienen die Verteilungen der Strahlungstemperaturen und der Strahlungstemperatur-Asymmetrien im Raumnutzungsbereich.

Die betrachteten Normalvarianten mit einer Außenwand und Fenster ergeben, daß die Kombination von thermisch aktiven Decken- und Wandelementen gute Behaglichkeit bei Kühl- und Heizbedarf gewährleistet. Die Untergliederung der einzelnen Flächen in abschaltbare Stromkreise gestattet eine spezielle Anpassung bei reinem Heizbetrieb und in der Übergangsperiode. So kann es wärmephysiologisch beispielsweise günstiger sein, in der Heizphase nur die Wandpaneele zu betreiben.

Varianten mit mehreren Außenwänden und teilweiser, geschoßhoher Verglasung lassen bei vorgesehenen Verschattungseinrichtungen mit Kühldecken behagliche Bedingungen erwarten. Problematisch – jedoch oft unterschätzt – ist der Heizfall. Es sollten stets thermisch aktive Flächen in die Außenwand integriert werden, die im gleichgerichteten Strahlungswärmeaustausch wie die Glasflächen bezogen auf den Raumnutzer stehen und somit thermisch kompensierend wirken.

Detaillierte Untersuchungen mit dem in [1] vorgestellten Rechenprogramm sind zu empfehlen. Nach Eingabe der geometrischen Flächenstruktur und automatischer Berechnung aller Einstrahlzahlen (Rechenzeit: ca. 30 bis 40 min) lassen sich in schneller Folge die verschiedensten Temperaturzuordnungen prüfen.

[H 249]

Literaturangaben

- [1] Glück, B.: Bewertungsmaßstab zur optimalen Anordnung von Heiz- und Kühlflächen im Raum. Gesundheits-Ingenieur (1991) Heft 2, S. 65 bis 71.
- [2] Glück, B.: Leistungen von Kühldecken. HLH 42 (1991) Nr. 3, S. 213/15.
- [3] Fanger, P.; Angelus, J.; Kjerulf-Jensen: Radiation Data for the Human Body. ASHRAE Annual Meeting, Kansas-City 1970.
- [4] Glück, B.: Erhöhung der inneren Fenstertemperatur durch Anordnung von Strahlungsheizflächen. Gesundheits-Ingenieur (1991) Heft 3.