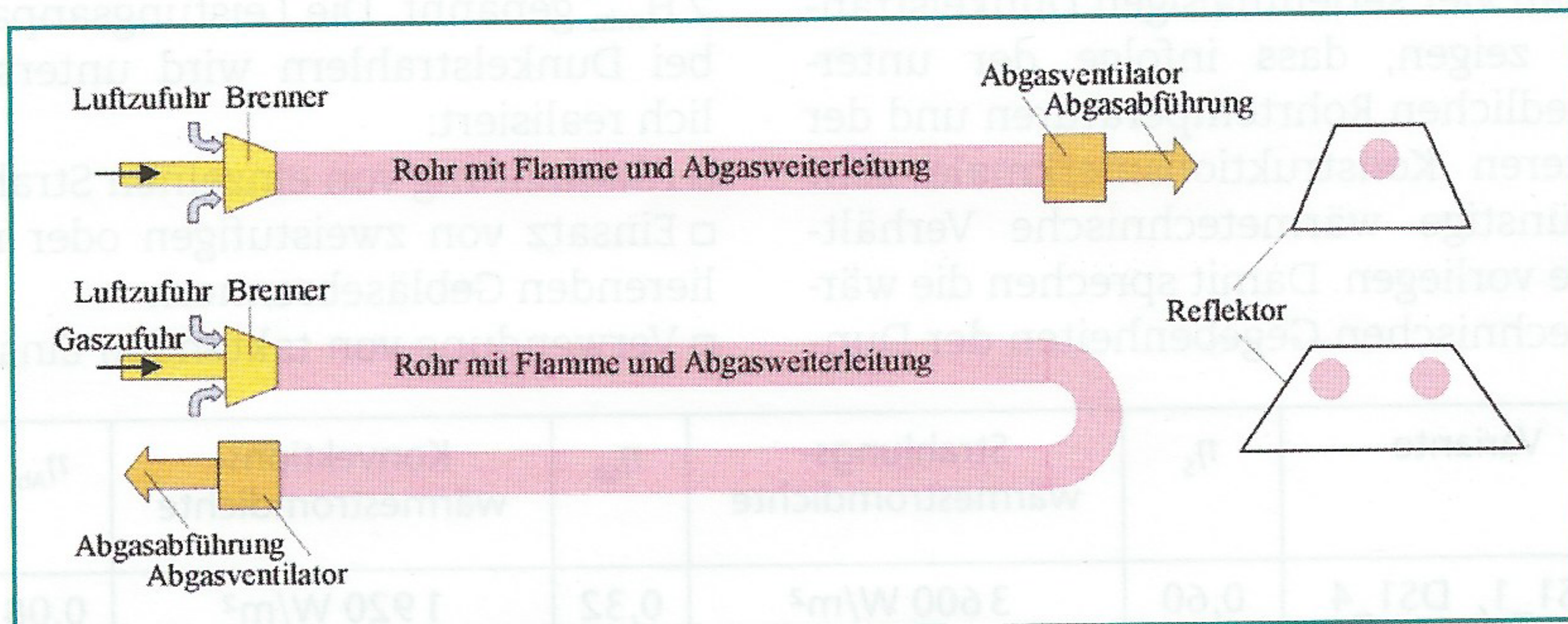


Vergleich von Strahlplatten-, Gasinfrarot- und Luftheizungen in Großräumen - Teil 3

Bernd Glück, Jößnitz (Plauen)

Vergleiche zwischen Strahlungs- und Luftheizungen in Großräumen wurden in der Vergangenheit vielfältig geführt. Im Vordergrund standen in der Regel Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. Betrachtet man die chronologische Reihenfolge, so wird der Fortschritt der Simulationstechniken sehr deutlich. Dieser ist in erster Linie an die verfügbare Rechentechnik und an die wärmetechnischen und wärmephysiologischen Erkenntnisse gebunden. Damit begründet sich auch die Sinnfälligkeit der wiederholenden Untersuchungen. Während früher die Unterschiede der Luft- und der Strahlungsheizungen im Vordergrund standen, sind nun aufgrund der detaillierteren Modellierungen auch die Unterschiede zwischen den verschiedenen Strahlungsheizungen – den wasserbeaufschlagten Strahlplattensystemen und den Gashell- sowie Gasdunkelstrahlersystemen – ausführlich darstellbar.

Im ersten Teil dieses Beitrages¹⁾ wurde das für Luftheizung und Gasstrahlerheizungen speziell erweiterte Raummodell vorgestellt und am Beispiel einer Modellhalle die unterschiedlichen Bauvarianten und die Arten der Außenluftzufuhr in Kombination erläutert. Lufterhitzer im Umlaufbetrieb wurden modelliert und die Ergebnisse dargestellt. Im zweiten Teil des Beitrages²⁾ erfolgte diese Untersuchung mit Strahlplatten- und Gashellstrahlerheizungen. Der folgende dritte und letzte Beitrags-Teil setzt die Untersuchung mit Gasdunkelstrahlerheizungen fort und gibt eine abschließende Gesamtbewertung.



Gasdunkelstrahlerheizung

Modellierung

Das erzeugte Gas-Luft-Gemisch wird durch eine spezielle Brennerkonstruktion geleitet und entzündet, um anschließend mit weicher, sehr langer Flamme in einem Rohr zu verbrennen. Das Rohr ist in der Regel U-förmig gebogen. Am Ende wird das Abgas durch einen Ventilator abgesaugt oder in ein Abgasunterdrucksystem eingeleitet. Die Temperatur des Rohres ändert sich mit der Länge. Nach dem Brenner steigt sie im Hauptbrennbereich an und nachfolgend sinkt sie stetig ab (Temperaturunterschiede bis 100 K). Dadurch wird längs des Rohres eine ungleiche Wärmestromdichte realisiert, so dass auch bei paralleler Rückführung des Rohres sowohl längs des Dunkelstrahlers als auch quer zu seiner Achse ganz ungleiche Strahlungsverteilungen auftreten. Die Temperaturen der Rohroberflächen schwanken je

Bild 26

Schematische Darstellung zweier Standardkonstruktionen von Dunkelstrahlern in linearer und U-förmiger Ausbildung im Längs- und Querschnitt
Der Reflektor kann auch mit einer Wärmedämmung ausgeführt sein

nach Auslegung zwischen 150 °C bis ca. 700 °C. Die Rohre werden durch unterschiedlichste Reflektorkonstruktionen abgedeckt (Bild 26). Die im Raum freigesetzte Energie wird hauptsächlich durch Strahlung in den unteren Halbraum übertragen. Der Rest erwärmt die Raumluft konvektiv und wirkt zu einem klei-

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, betreibt ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig.

¹⁾ Teil 1 dieses Beitrages ist erschienen in HLH Bd. 55 (2004) Nr. 6, S. 49–56.

²⁾ Teil 2 dieses Beitrages ist erschienen in HLH Bd. 55 (2004) Nr. 7, S. 63–70.

nen Teil als Strahlung nach oben. Für Dunkelstrahler gelten mit den Größen Strahlungswirkungsgrad η_s (messtechnisch ermittelt mit der bereits im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Absorbermethode oder Radiometermethode), dem Strahlerwirkungsgrad nach oben (konvektive Wärmeströme und Strahlungswärmestrom nach oben), Abgaswärmeverlust η_{Ab} und Nennwärmeleistung des Gasstrahlers Q_{Gas} : Strahlungswärmestrom nach unten in den Aufenthaltsbereich

$\dot{Q}_S = \eta_s \dot{Q}_{Gas}$ (9)

Gesamtkonvektionswärmestrom plus Strahlungswärmestrom nach oben

$\dot{Q}_K = \eta_{so} \dot{Q}_{Gas}$ (10)

Abgaswärmeverlust

$\dot{Q}_{Ab} = \eta_{Ab} \dot{Q}_{Gas}$ (11)

Die in [4]³⁾ veröffentlichten Messungen an vier serienmäßigen Dunkelstrahlern zeigen, dass infolge der unterschiedlichen Rohrtemperaturen und der weiteren Konstruktionsmerkmale sehr ungünstige wärmetechnische Verhältnisse vorliegen. Damit sprechen die wärmetechnischen Gegebenheiten der Dun-

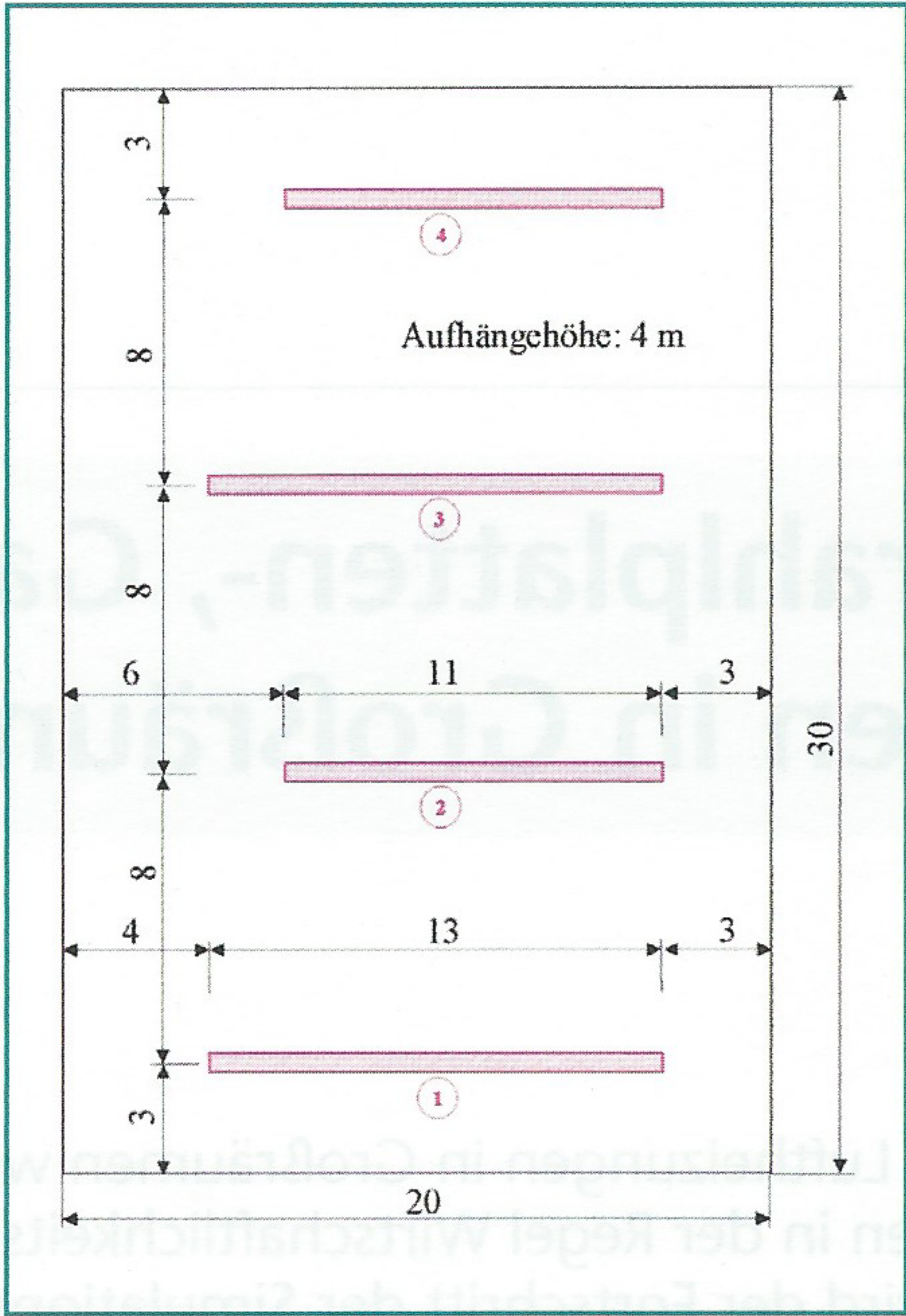


Bild 27
Dunkelstrahlerverteilung DSV1 für die Simulation der Grundvarianten 1 und 4 nach Tabelle 3 (Daten der Dunkelstrahler nach Tabelle 10) Der Außenluftwechsel beträgt 0,5 h⁻¹ bzw. 0,3 h⁻¹; die modellgemäße Luftzufuhr erfolgt in Zone 1. Strahlerverteilung DSV2 mit inaktiven Strahlern 2 und 4 für Zusatzuntersuchung bei Teillast (Außentemperatur: 2 °C)

kelstrahler leider nicht für eine gute wärmephysiologische Wirkung. Die Mindestaufhängehöhen H_{min} sind leistungsabhängig in G 638/II genannt. Sie beginnen bereits bei 3 m Höhe! Für die Abstände der Strahler untereinander werden in den Herstellerunterlagen $X_{min} = 2 H_{min}$ genannt. Die Leistungsanpassung bei Dunkelstrahlern wird unterschiedlich realisiert:

- Abschaltung von einzelnen Strahlern
- Einsatz von zweistufigen oder modulierenden Gebläsebrennern
- Verwendung von taktenden Einstufen-

brennern, wobei durch dickwandige Brennerrohre eine Wärmespeicherung ausgleichend wirken soll.

Die Modellierung der Dunkelstrahler im „Wärmetechnischen Raummodell“ nach [5] erfolgt aus Gründen der Vereinfachung sehr idealisiert:

- gleiche Wärmestromdichte längs des Strahlers
- Strahlungsverteilung quer zur Strahlerachse nach dem Kosinussgesetz
- kontinuierliche Regelung der Strahler
- Abschaltmöglichkeit von Einzelstrahlern.

Es gelte eine Aufteilung der Strahler DSV1 gemäß **Bild 27**. Die Dunkelstrahlermodellierung wird für Linearstrahler mit einer Leistungsdichte von nur 6 000

Variante	η_s	Strahlungswärmestromdichte	η_{so}	Konvektionswärmestromdichte	η_{Ab}	Abgasverlust	Gesamtleistung
DS1_1, DS1_4	0,60	3 600 W/m ²	0,32	1 920 W/m ²	0,08	480 W/m ²	6 000 W/m ²

Die Längen der Strahler betragen nach Bild 27 für je zwei Varianten 11 m bzw. 13 m. Die Breite ist einheitlich 0,32 m. Für die Gesamtfläche von 0,32 m × 48 m = 15,36 m² beträgt damit die installierte Leistung:

Variante	Strahlungswärmestrom	Konvektionswärmestrom	Abgasverlustwärmestrom	Gesamtleistung
DS1_1, DS1_4	55 296 W	29 491 W	7 373 W/m ²	92 160 W/m ²

Tabelle 10
Leistungsdaten des modellierten Dunkelstrahlers mit der Leistungsdichte 6 000 W/m²

Relevante Größen		Variante DS1_1	Variante DS1_4	Variante DS2_1_Teillast
mittlere Empfindungstemperatur	°C	18,0	18,0	18,0
mittlere Lufttemperatur	°C	14,3	15,5	15,4
mittlere Strahlungstemperatur	°C	23,5	21,8	21,9
vert. Lufttemperaturgradient (Aufenthaltsbereich)	K/m	1,5	1,2	1,0
maximaler Unterschied der Empfindungstemperatur	K	4,4	2,0	4,6
maximaler Unterschied der Strahlungstemperatur	K	11,0	5,0	11,5
maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie	K	37,8	18,6	39,7
Strahlertemperatur	°C	248,0	161,2	249,0
Leistungsfaktor des Strahlers	–	0,971	0,413	0,979
Transmissionsheizlast	W	58 262	20 156	31 553
Lüftungsheizlast	W	24 129	14 661	12 096
Heizlast	W	82 391	34 817	43 649
Faktor zur Vergleichsheizlast (Tabelle 4)	–	0,94	1,12	–

Tabelle 11
Dunkelstrahlerheizsysteme nach Bild 27 (DS1_1 schlechte Dämmung; DS2_4 gute Dämmung) sowie nach Bild 27 bei Teillast mit Strahler 1 und 3 (DS2_1_Teillast schlechte Dämmung)

3) Die Literaturhinweise sind im ersten Teil dieses Beitrages in HLH 6/04 auf S. 56 zu finden.

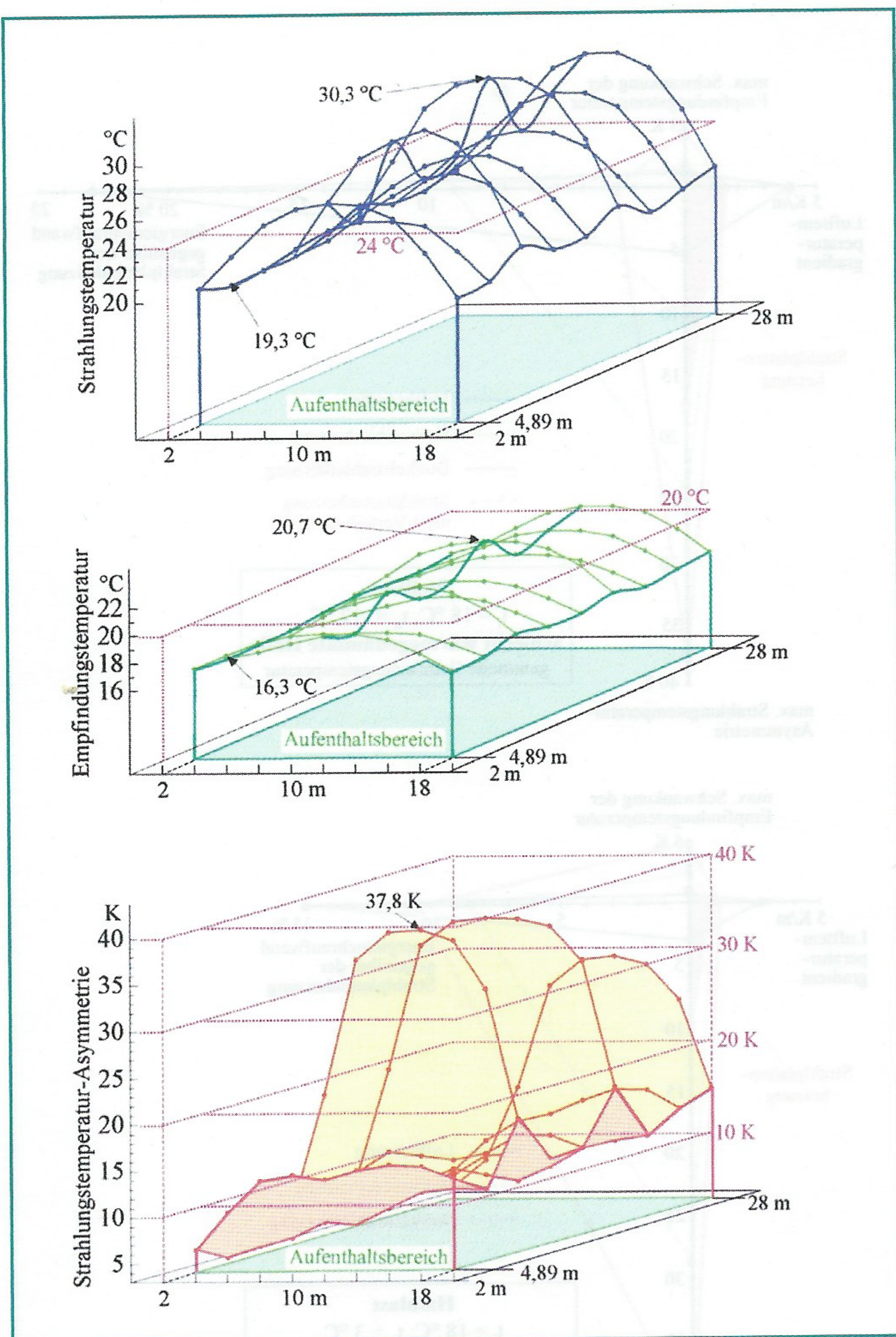


Bild 28

Strahlungstemperatur der Umgebung, Empfindungstemperatur und Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei der Dunkelstrahlerheizungsvariante DS1_1 (Grundvariante 1 nach Tabelle 3; Strahlerverteilung DSV1 nach Bild 27)

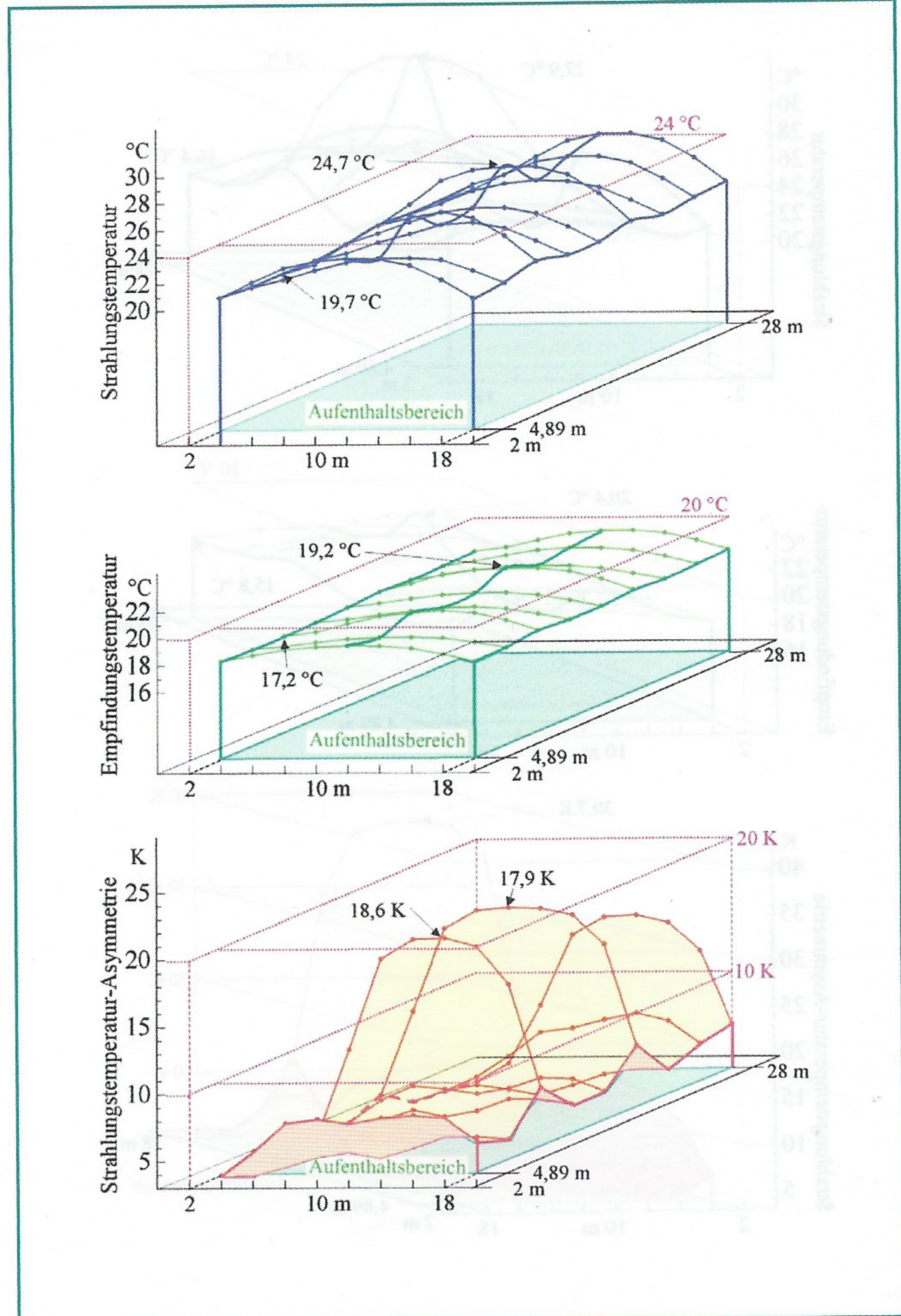


Bild 29

Strahlungstemperatur der Umgebung, Empfindungstemperatur und Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei der Dunkelstrahlerheizungsvariante DS1_4 (Grundvariante 4 nach Tabelle 3; Strahlerverteilung DSV1 nach Bild 27)

W/m^2 bezogen auf die Öffnungsfläche des Reflektors vorgenommen (Tabelle 10). Dies ist aus wärmephysiologischer Sicht sehr günstig! Im Weiteren werden die Varianten DS1_1 und DS1_4 entsprechend der Grundvarianten 1 und 4 nach Tabelle 3 zugrunde gelegt. Eine Zusatzuntersuchung DS1_1 Teillast erfolgt für die Grundvariante 1 bei Teillast (Außentemperatur: $2^\circ C$) unter Annahme der Verteilung DSV2 nach Bild 27. Es sei idealisiert eine kontinuierliche Leistungsregelung bei konstantem Wirkungsgrad angenommen. Das Simulationsverfahren für Dunkelstrahler wurde speziell angepasst. Die Ergebnisse werden in Tabelle 11 und den Bildern 28 bis 31 wiedergegeben.

Ergebnisse

Die Schwankungen der Empfindungstemperatur über dem Aufenthaltsbereich steigen auf Höchstwerte an, maximal 4,4 K. Damit werden die Raumtem-

peraturunterschiede standortabhängig sehr deutlich wahrgenommen. Die Temperaturverteilung ist nicht akzeptabel.

Die Schwankungen der Strahlungstemperatur der Umgebung sind dafür maßgebend. Ihr Maximalwert beträgt 11 K.

Die vertikalen Lufttemperaturgradienten (vgl. Bild 31) über die Aufenthaltshöhe sind relativ klein (maximal 1,5 K/m).

Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei der schlecht wärmegeämmten Halle liegt mit Spitzenwerten von 37,8 K außerhalb jeglicher Akzeptanz. Bei der gut wärmegeämmten Halle tritt aber auch noch ein sehr hoher Wert von 18,6 K auf.

Die Heizlast der schlecht gedämmten Halle zeigt im Vergleich zur Luftheizung einen um ca. 16 % niedrigeren Wert. Gegenüber der Strahlplattenheizung ergibt sich geringer Mehraufwand bis Gleichwertigkeit.

Obwohl für die Auslegung der Dunkel-

strahler außerordentlich günstige Randbedingungen verwendet wurden:

- genaue Einhaltung der Installationsempfehlungen
 - ideale Leistungsverteilung längs und quer zur Strahlerachse
 - sehr niedrige Strahlerleistungen in den gut wärmegeämmten Räumen (nur $2\,500\,W/m^2$),
- sind die Schwankungen der Empfindungstemperatur und die Strahlungstemperatur-Asymmetrie unakzeptabel groß. Sie steigen im Teillastbetrieb (Bild 30) sogar noch an (Schwankungen der Empfindungstemperatur 4,6 K und der Strahlungstemperatur 11,5 K; maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie 39,7 K).

Thermisch-energetischer Gesamtvergleich

Die Heizlast wurde bisher stets der zugehörigen Vergleichsheizlast (Tabelle 4) gegenübergestellt. Dabei zeigte sich die

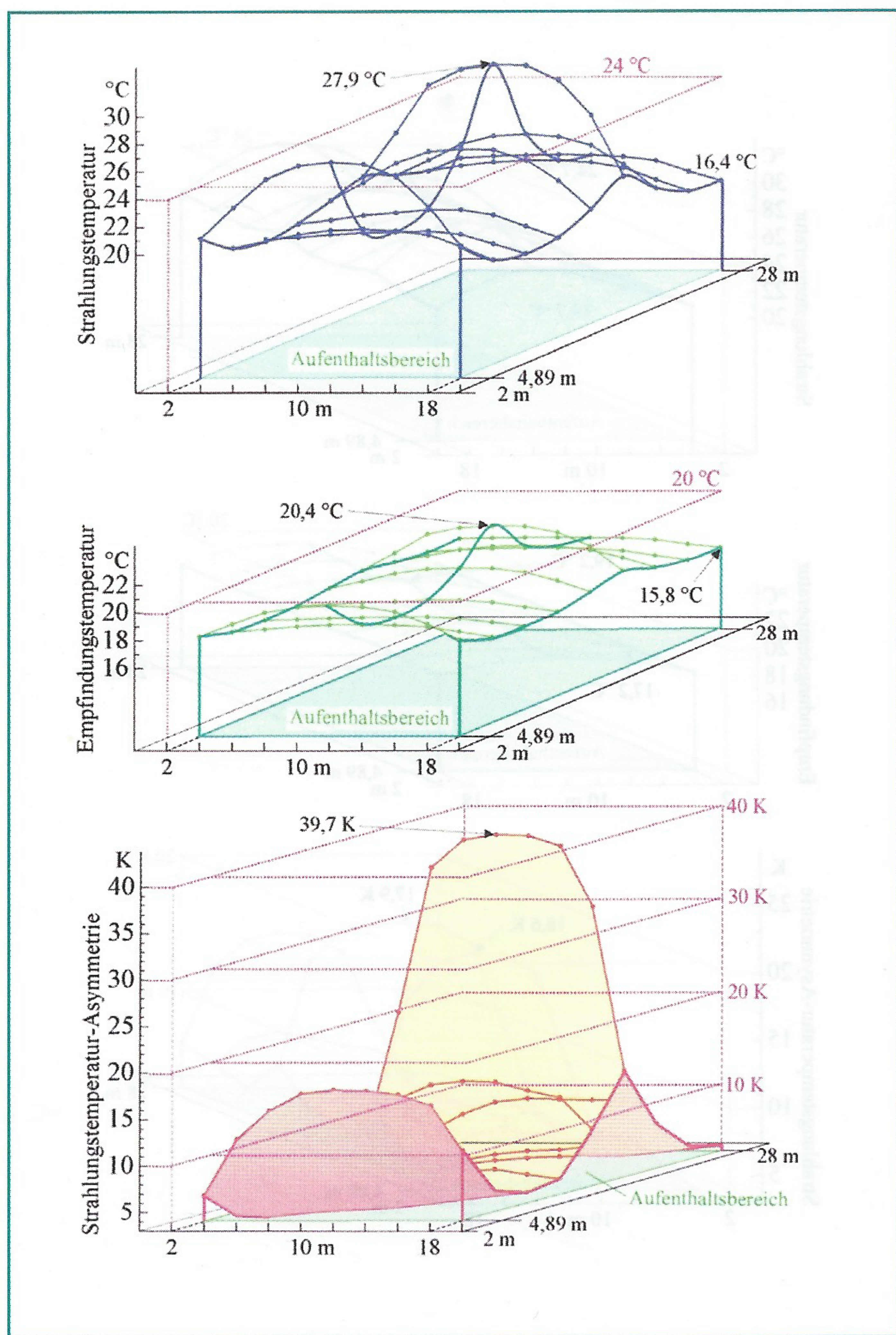


Bild 30

Strahlungstemperatur der Umgebung, Empfindungstemperatur und Strahlungstemperatur-Asymmetrie bei der Dunkelstrahlerheizungsvariante DS2_1 Teillast (Grundvariante 1 nach Tabelle 3 jedoch bei Teillast, Außentemperatur 2 °C) ; Strahlerverteilung DSV2 nach Bild 27)

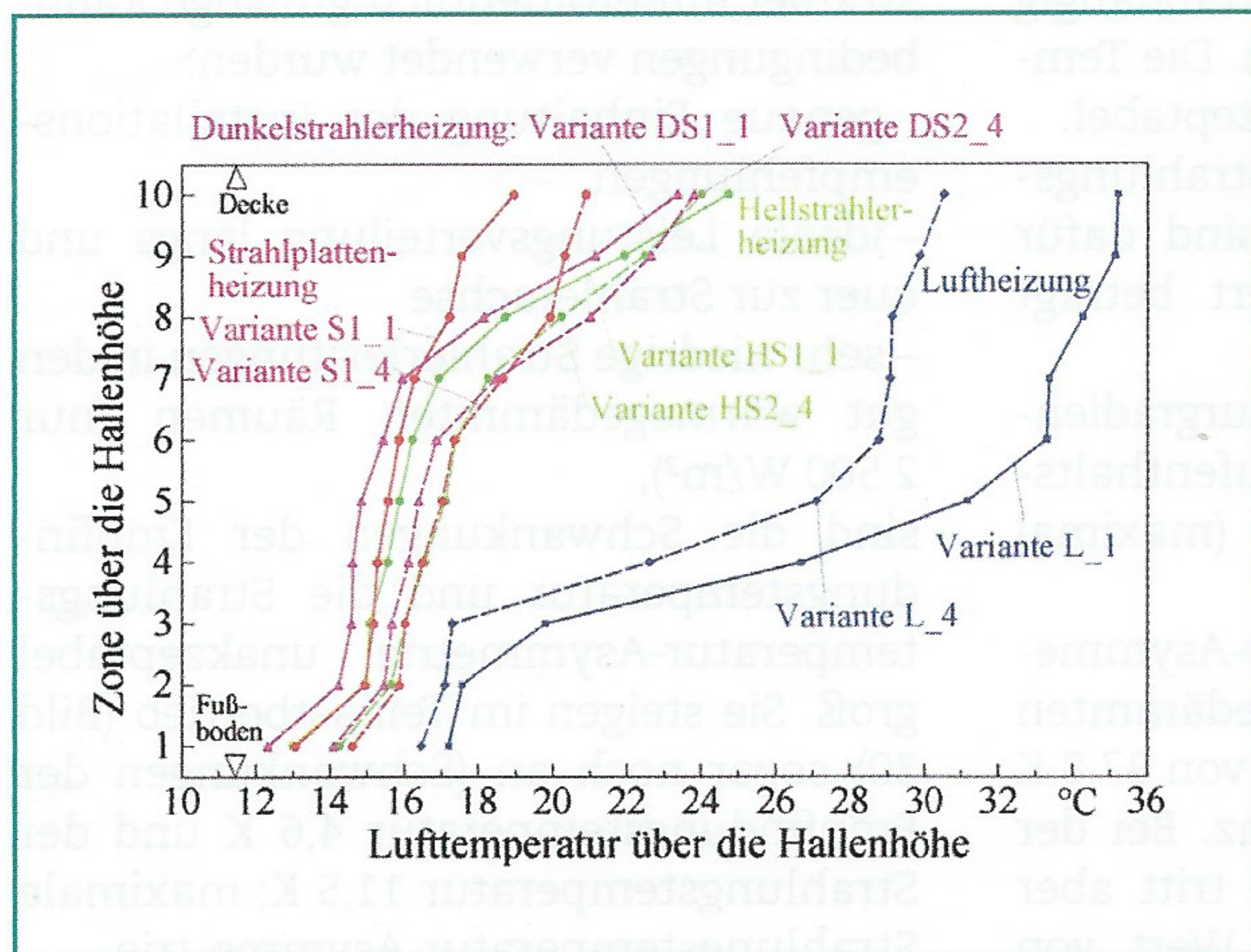


Bild 31

Vertikaler Lufttemperaturverlauf bei den Dunkelstrahlerheizungsvarianten DS1_1 und DS1_4 (Grundvarianten 1 bzw. 4 nach Tabelle 3; Strahleranordnung DSV1 gemäß Bild 27) im Vergleich zu den vorherigen Varianten

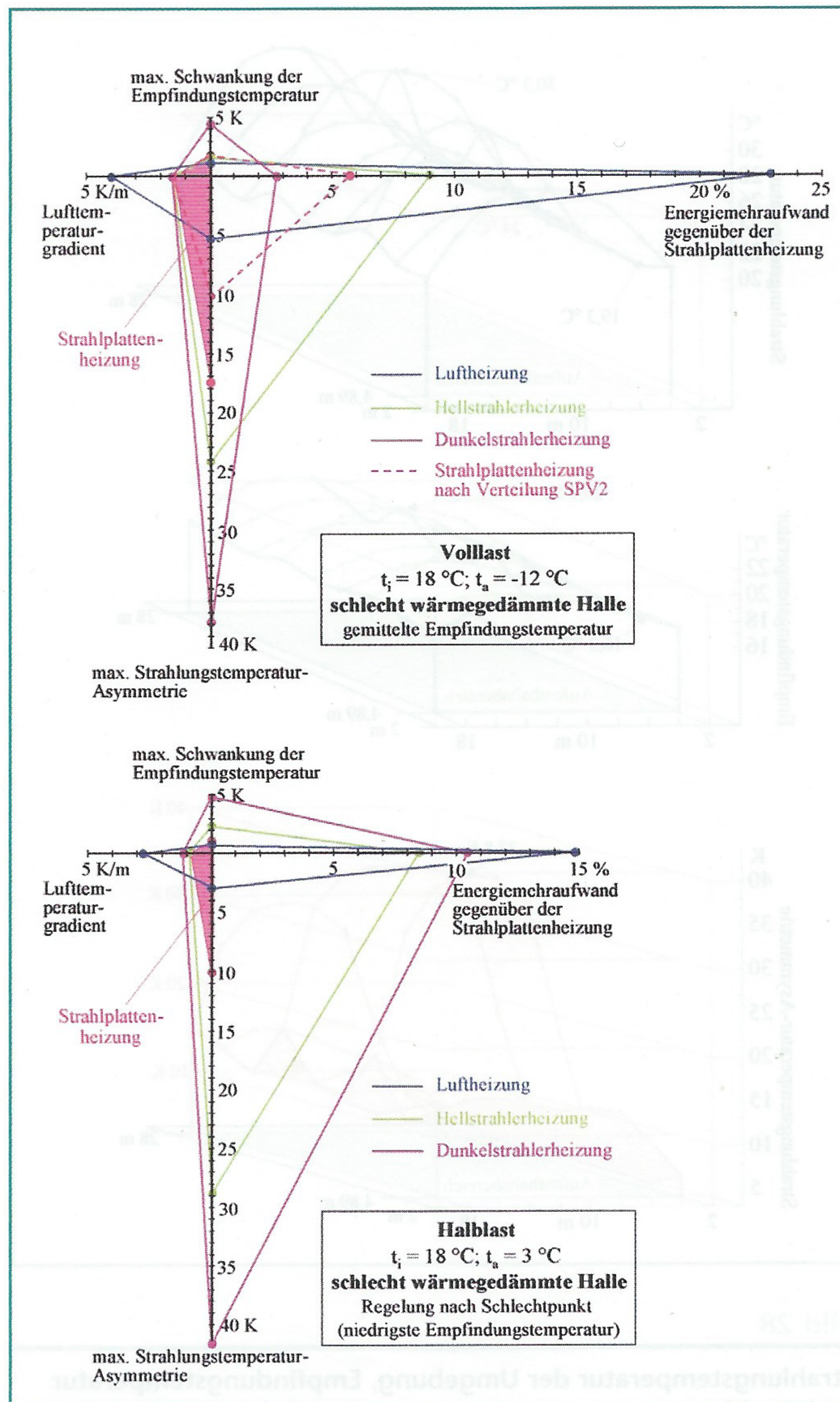


Bild 32

Kombinierter Vergleich der thermisch-energetischen Verhältnisse für die Modellhalle mit schlechter Wärmedämmung: Schwankungsbereich der Empfindungstemperatur sowie maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie über dem Aufenthaltsbereich, vertikaler Lufttemperaturgradient und Energiemehrverbrauch gegenüber der Strahlplattenheizung (Verteilung nach Bild 13)

Strahlplattenheizung als vorteilhaft. Die Betrachtungen bezogen sich jedoch nur auf den Auslegungsfall ($t_a = -12\text{ °C}$). Entsprechend des Hauptnutzungsbereiches sind die vorgestellten Untersuchungen für die Außentemperatur 3 °C (ca. Halblast) wiederholt worden. Die berechnete Heizlast wird nunmehr direkt auf den für die Strahlplattenheizung geltenden Wert bezogen. Weiterhin zeigten die Betrachtungen, dass systembedingt große Unterschiede der Empfindungstemperatur über den Hallengrundriss auftreten. Um im praktischen Betrieb Beschwerden vorzubeugen, wird die Anlage nach dem Punkt mit der niedrigsten Empfindungstemperatur geregelt (Schlechtpunktregelung).

Ohne die Einzelwerte wiederzugeben, sind alle Ergebnisse in den **Bildern 32 und 33** zusammengefasst. Es handelt sich um die Parameter:

- Schwankungsbereich der Empfindungstemperatur über dem Aufenthaltsbereich
- maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie über dem Aufenthaltsbereich

- vertikaler Lufttemperaturgradient zwischen den Höhen von 0,3 m und 1,8 m
- Energiemehrverbrauch gegenüber der Strahlplattenheizung (Verteilung SPV1 nach Bild 13).

Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

- Die maximalen Schwankungen der Empfindungstemperatur ergaben bei Gasdunkelstrahlern Höchstwerte, die mit nahezu 5 K unakzeptabel sind. Hellstrahlersysteme stellen sich diesbezüglich günstiger dar, da diese eine flexible Aufteilung als die kompakten Dunkelstrahler zulassen. Luftheizungen und Strahlplattenheizungen zeigen in allen Fällen moderate Werte.
- Die maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie ist bei Luftheizungen stets am kleinsten (< 5 K). Die Gasstrahlerlösungen weisen in allen Fällen viel zu hohe Strahlungsasymmetrien auf, die vielfach bei Teillast noch ansteigen. Bei Strahlplattenheizungen in schlecht wärmedämmten Räumen kann die Strahlungsasymmetrie auch hoch sein. Sie baut sich bei Teillast aber rasch ab. Weiterhin sind bei sorgfältiger Strahlplattenverteilung über den Grundriss stets Möglichkeiten gegeben, verbesserte wärmephysiologische Lösungen zu finden. Im Bild 32 wird dies durch eine zweite Strahlplattenanordnung SPV2 gemäß Bild 16 demonstriert. Diese Aufteilung reduziert die Strahlungstemperatur-Asymmetrie beträchtlich, erhöht jedoch die erforderliche Heizlast. Die Entscheidung – welche Variante vorteilhaft einzusetzen ist – kann fallweise getroffen werden. Diese beschriebenen Freiheitsgrade sind bei Dunkelstrahlersystemen in der Regel nicht gegeben, wie z.B. der Halblastfall im Bild 33 zeigt.
- Der vertikale Lufttemperaturgradient ist bei Luftheizungen erfahrungsgemäß am größten, was auch die Simulationen bestätigen. Sie nehmen bei Teillast ab. Werte > 3 K/m im Aufenthaltsbereich sind kritisch anzumerken. Alle Strahlungsheizungssysteme ergeben wärmephysiologisch unproblematische Gradienten.
- Aus energetischer Sicht (systembedingte Heizlast) schneidet die Luftheizung stets am ungünstigsten ab. Die Ursache ist durch die großen vertikalen Lufttemperaturgradienten gegeben. Es folgen dann die Hell- und Dunkelstrahler. Bezüglich der zuletzt genannten Systeme existiert keine eindeutige Reihenfolge, weil eine starke Beeinflussung durch die Anordnung gegeben ist. Bei

den Luftheizungen tritt beim Übergang von der Volllast zur Halblast eine energetische Verbesserung auf, wenn eine kontinuierliche Regelung (kein Abschaltbetrieb) unterstellt wird. Der Einsatz von Gasstrahlern führt beim Übergang von der Voll- zur Teillast meistens zu einer Verschlechterung. Dies wird durch die Abschaltung von Strahlern und der damit verbundenen ungleichen Strahlungsbeaufschlagung des Aufenthaltsbereiches bewirkt. Die Strahlplattenheizungen erfordern infolge der gleichmäßigen Bestrahlung der Bodenfläche und der kontinuierlichen Regelung der Wassertemperatur in allen Lastberei-

chen die geringsten Heizleistungen im Raum.

Empfehlungen zum Systemeinsatz und zur Weiterentwicklung aus wärmephysiologischer und energetischer Sicht

- Die Luftheizung besitzt den Hauptnachteil des relativ hohen Energieeinsatzes. Er kann nur verbessert werden, wenn es gelingt, die Temperaturschichtung in der Halle abzubauen. Vorteilhaft wäre die Entnahme der Umluft im oberen Hallenbereich und das Einblasen der erwärmten Luft in Bodennähe. Der Verwirklichung dieser Zielrichtungen sind

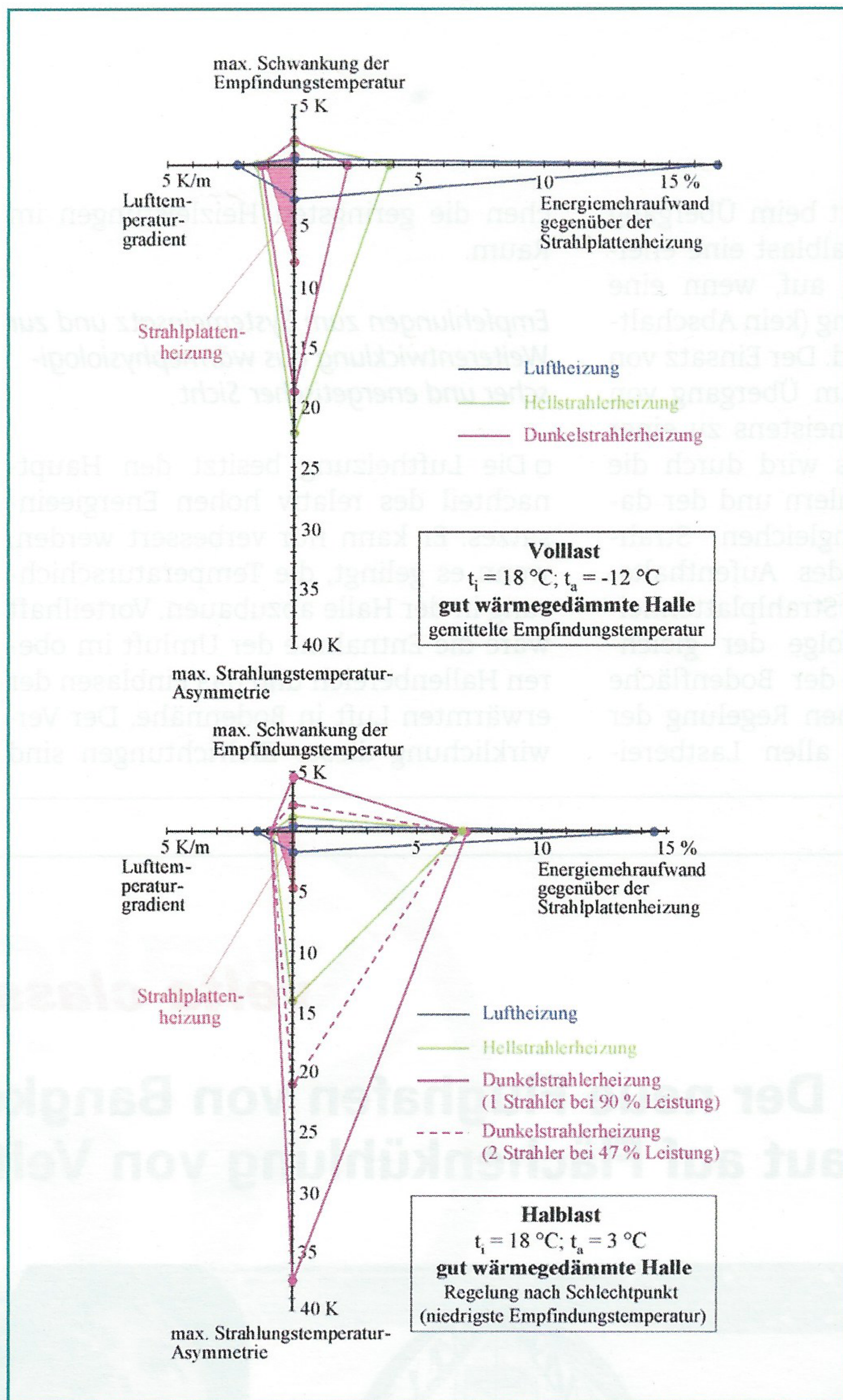


Bild 33

Kombinierter Vergleich der thermisch-energetischen Verhältnisse für die Modellhalle mit guter Wärmedämmung: Schwankungsbereich der Empfindungstemperatur sowie maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie über dem Aufenthaltsbereich, vertikaler Lufttemperaturgradient und Energiemehrverbrauch gegenüber der Strahlplattenheizung (Verteilung nach Bild 13)

jedoch enge praktische Grenzen gesetzt. Die meist angestrebte Erhöhung des Induktionsverhältnisses allein reicht nicht aus, da die Temperatur in Bodennähe niedrig bleibt.

□ Die Strahlplattenheizung stellt das momentan flexibelste System zur Erfüllung der wärmephysiologischen Forderungen bei gleichzeitiger energetischer Effizienz dar. Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen, ist allerdings eine sorgfältige Planung vorzunehmen.

□ Die festgestellten Nachteile der Gasstrahlersysteme haben hauptsächlich zwei Ursachen. Die angebotenen Geräteeinheiten sind in ihren Leistungen zu groß, und sie werden vielfach in zu geringer Höhe installiert. Daraus folgen die hohen Strahlungstemperatur-Asymmetrien und die ungleiche Verteilung der Empfindungstemperatur über dem Nutzbereich. Diese Nachteile verstärken sich bei gut wärmegeämmten Gebäuden und im Teillastbetrieb. Die in Richtlinien und Firmenempfehlungen angegebenen Installationshöhen und Abstände der Strahler sind dringend zu überdenken. Die Aussagen werden durch die Untersuchungen bestätigt, wobei die flexibler ein-

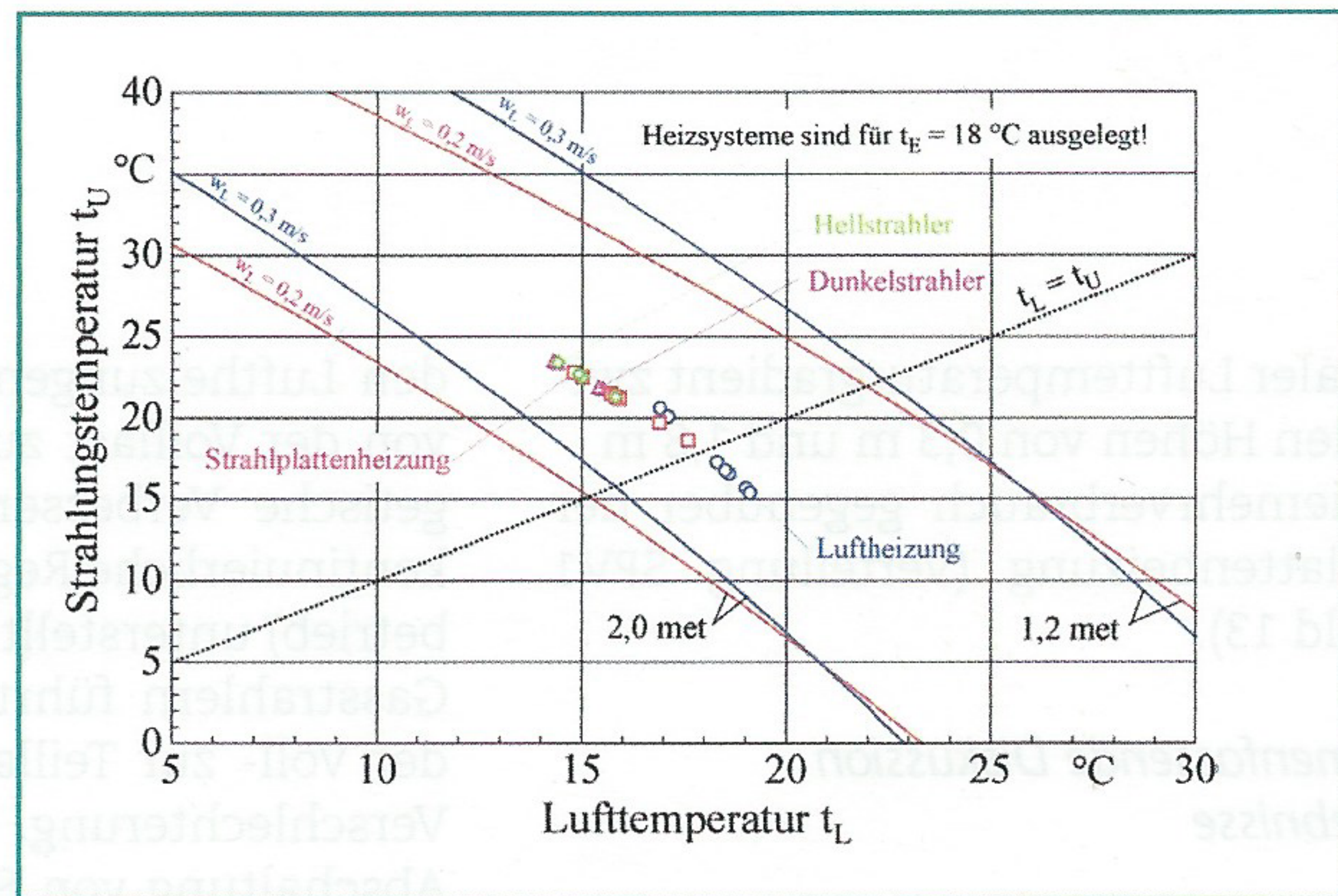


Bild 34

Zusammenstellung ausgewählter Simulationsergebnisse – Luft- und Strahlungstemperaturen – für den Volllastfall im Behaglichkeitsdiagramm

setzbaren Gashellstrahler die Zielanforderungen besser als Gasdunkelstrahler erfüllen. Bezüglich der Anlagenbemessung und der Wahl der Regelgröße sollte auch [9] Beachtung finden.

Jedes System hat unbestritten Vor- und Nachteile unter spezifischen Einsatzbedingungen. Es ist die Aufgabe des verantwortungsbewussten Ingenieurs, den entsprechenden technischen Kompromiss zu finden. Eine Überschreitung der verantwortbaren Einsatzgrenzen bietet nur einen kurzzeitigen Verkaufserfolg und schadet langfristig der Verbreitung des Systems.

Ergebnisse der Heizvarianten im Behaglichkeitsdiagramm

Im Bild 34 sind die mit dem Raummodell [5] simulierte Beispielanlagen mit der operativen Raumtemperatur von 18 °C bezüglich ihrer erzielten Luft- und Strahlungstemperaturen punktwise im Behaglichkeitsdiagramm nach DIN EN ISO 7730 (Kurven gelten für: Bekleidung 1,1 clo, relative Feuchte 40 % sowie für die angegebenen Aktivitäten und Luftgeschwindigkeiten bei idealer Behaglichkeit von PPD = 5 %) vermerkt. Es zeigt sich, dass alle Strahlplatten- und Gasstrahlerheizungen auf einer Kurve liegen, die näherungsweise äquidistant zu den roten Behaglichkeitskurven (Luftgeschwindigkeit 0,2 m/s) verläuft. Die Luftheizsysteme sind durch eine Punkteschar, die auf einer Kurve mit gleicher Neigung wie die blauen Kurven (Luftgeschwindigkeit 0,3 m/s) liegen, repräsentiert. Damit erfüllt das Simulationsmodell die Vorgaben in idealer Weise.

Es ist auffallend, dass die Strahlplatten- und die Gasstrahlerheizungen keine signifikant unterschiedlichen Luft- und Strahlungstemperaturen aufweisen. Die in der Richtlinie G 638/ I behaupteten großen Unterschiede zwischen Strahlungs- und Lufttemperatur in Hallen mit Gasstrahlern treten bei ordnungsgemäßer Beheizung nicht auf. Damit sind auch die Heizlastreduzierungen, die dort auf der Basis der abgesenkten Raumlufttemperatur ermittelt werden, nicht korrekt.

Luftheizungen zeichnen sich in der Regel durch hohe Lufttemperaturen aus. Bei gut wärmegeämmten Hallen kann es aber Besonderheiten geben (blaue Punkte liegen oberhalb der Linie $t_L = t_{ij}$). Die aufsteigende warme Luft erwärmt den oberen Raumbereich so intensiv, dass aufgrund der guten Dämmung die Oberflächen wie „milde“ Strahlungsheizflächen wirken (z.B. Variante L_4).

Die sehr gute Einordnung der Simulationsergebnisse im Behaglichkeitsdiagramm erfordert in der praktischen Umsetzung die Verwendung von Globethermometern zur richtigen Erfassung der operativen Raumtemperatur [6].