

Kombination verschiedener Aktivflächensysteme im Raum

Bernd Glück, Jößnitz (Plauen)

Infolge der wärmedichten Bauweise der Gebäude und der umfangreichen inneren Wärmequellen, verursacht durch die installierte Bürotechnik, stellt die wirtschaftliche und behagliche Wärmeabfuhr aus den Büro- und Versammlungsräumen derzeit die Hauptaufgabe der Klimatechnik dar. Die energetisch und wärmephysiologisch vorteilhaften Flächenkühlsysteme sollten hierzu eingesetzt werden und in Doppelfunktion auch das Heizen übernehmen.

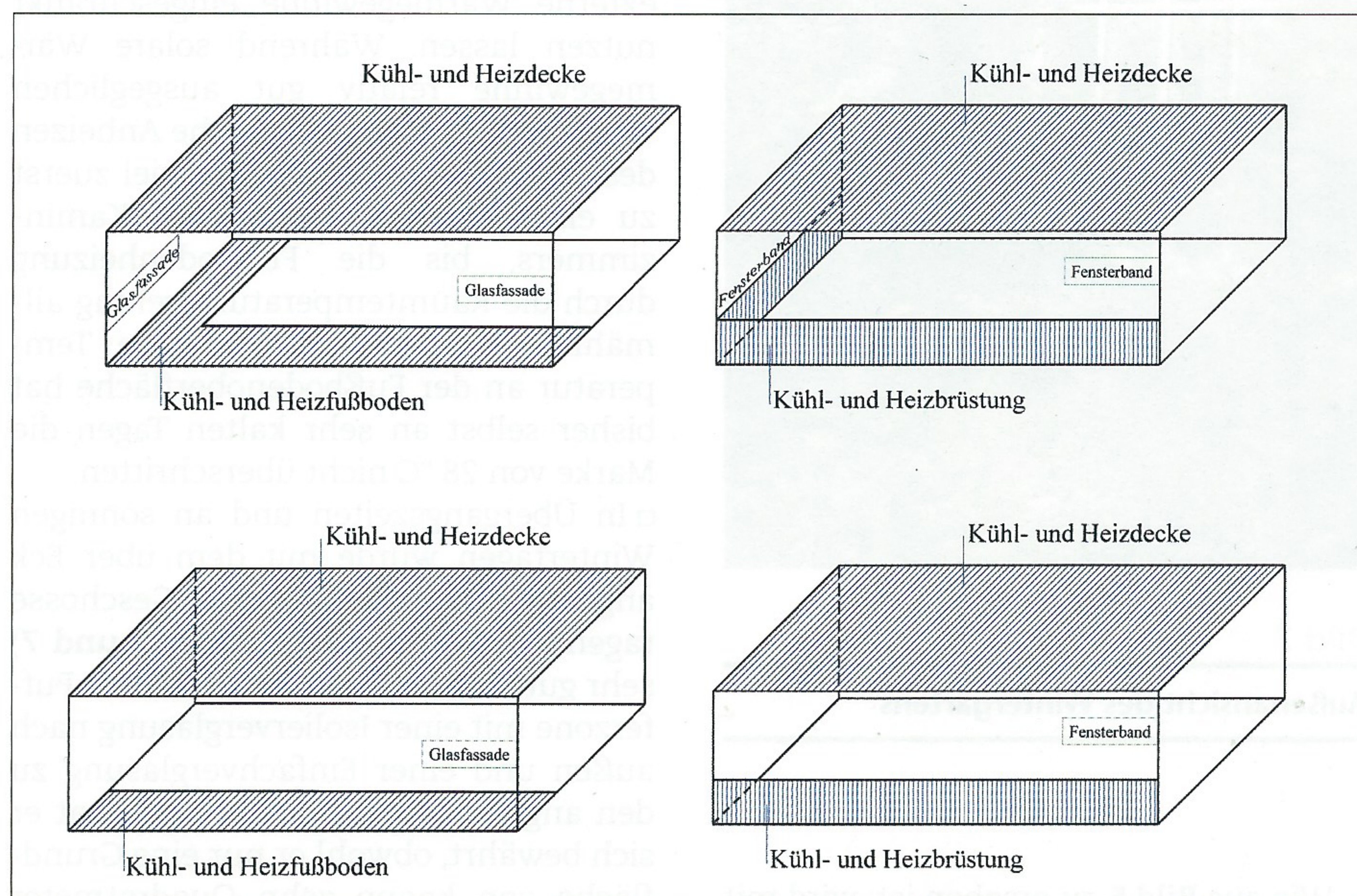


Bild 1

Zusammenstellung von Eck- und Normalraumvarianten mit Kombinationen von thermisch aktiven Flächen. Es werden die Deckenfläche und ein Fußbodenstreifen oder an dessen Stelle die Brüstung nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt. Die Beaufschlagung aller aktiven Flächen erfolgt jeweils mit der gleichen Wassertemperatur

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, war an der TU Dresden, in der Anlagenplanung, im Industrieinstitut TGA und im Zentralbereich Ingenieurtechnik bei ROM in leitender Funktion auf dem Gebiet der Heizungs- und Lüftungstechnik tätig. Jetzt betreibt er ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig. Er ist bisher mit über 170 Buch- und Zeitschriftenveröffentlichungen hervorgetreten.

Es wird eine Baukastenlösung wärmetechnisch sowie wärmephysiologisch untersucht, die eine Anwendung bei Vollglas- und bei Lochfassaden sowohl in Normal- als auch in Eckräumen erlaubt. Die Anregung für eine Baukastenlösung mit thermisch aktiven Flächen auf der Basis von integrierten Kunststoff-Kapillarrohrmatten wurde vom Geschäftsführer der Fa. Clina – Dipl.-Ing. B. Chahed – in Verbindung mit einem vom Wirtschaftsministerium geförderten und von ihm federführend geleiteten Forschungsvorhaben gegeben.

Ausgangssituation

Die Geometrien der Büroräume sind sehr unterschiedlich, häufig sollen die Abmessungen der Räume auch variabel gestaltbar bleiben, um beispielsweise zwischen Zweiachs- und Dreiachsräumen wählen zu können. Variantenreich ist vor allem die Fassadengestaltung. Vollglasfassaden werden sehr häufig realisiert, denn sie entsprechen dem architektonischen Zeitgeist. Die früher in

der Regel angewandten Lochfassaden kommen relativ selten zum Einsatz, eine Alternative hierzu bilden Fensterbänder mit Brüstung.

Bei Vollglasfassaden und auch bei durchgehenden Fensterbändern treten meistens große Kühllasten auf, die besonders in Eckräumen problematisch sind. Mit Zunahme der transparenten Flächen steigt normalerweise der zeitgleiche solare Wärmeeintrag (keine Phasenverschiebung) und die wärmespeichernde Masse wird kleiner. Klimatisierungssysteme sind dann notwendig. Wie diese wärmephysiologisch und energetisch günstig gestaltet werden können, soll in diesem Beitrag beispielhaft gezeigt werden. Selbstverständlich sind diese Lösungen nicht zum Nulltarif zu haben.

Oftmals wird diese „Selbstverständlichkeit“ nicht anerkannt und der Investor, der Projektentwickler, der Architekt, der Generalunternehmer usw. fordern mit Hinweis auf „vorbildhafte“ Neuerungen die gebäudetechnischen Anlagen zu minimieren. Leider sind die Informatio-

Lasteintrag		Lastabfuhr		Charakterist	
$\dot{Q}_{\text{Raum}}$	= 2650 W	$\dot{Q}_{\text{Kühldecke}}$	= 2656 W	$t_{\text{Kaltwasser}}$	= 18,8 °C
$\dot{Q}_{\text{Interieur}}$	= 850 W	$\dot{Q}_{\text{Fußboden}}$	= - W	$\dot{q}_{\text{Decke}}$	= 53,1 W/m ²
Strahlung	40 %	$\dot{Q}_{\text{Brüstung}}$	= 442 W	$\dot{q}_{\text{Brüstung}}$	= 36,8 W/m ²
Konvektion	60 %	$\dot{Q}_{\text{Zuluft}}$	= 399 W	t_{Zuluft}	= 22 °C
Summe	= 3500 W	Summe	= 3497 W	$\dot{q}_{\text{Zuluft}}$	= 8,0 W/m ²

Lufttemperaturen der Zonen			Oberflächentemperaturen der thermisch aktiven Flächen			Charakteristiken	
Zone	maximale Höhe der Zone in m	t_{Luft} °C	t_{Decke} °C	$t_{\text{Fußboden}}$ °C	$t_{\text{Brüstung}}$ °C	Temperaturen in 1,1 m Höhe	
10	2,70	25,96	20,5...20,6	-	20,0...20,1	t_{Luft}	= 24,7 °C
9	2,43	25,31	≡ Ablufttemperatur			t_{Umgebung}	= 25,3 °C
8	2,16	24,91				$t_{\text{Empfindung}}$	= 25,0 °C
7	1,89	24,80	Wärmetechnische Modellannahmen der Variante: Aktive Flächen: Decke, Brüstung Luftvolumenstrom: 6 m³/(m² h) Spezifische Wärmebelastung der inaktiven Raumflächen: Glasflächen 50 W/m ² Opake Flächen 13,54 W/m ²			Lufttemperaturgradient zwischen 0,1 m und 1,1 m Höhe (Mittelwert)	
6	1,62	24,75				$g_{\text{Lufttemperatur}}$	= 1,0 K/m
5	1,35	24,70				maximaler Unterschied der Empfindungstemperatur in 1,1 m Höhe	
4	1,08	24,65					
3	0,81	24,42				$\Delta t_{\text{Empfindung}}$	
2	0,54	24,28					
1	0,27	23,63					

Strahlungsverhältnisse (l, k kennzeichnen den Prüfrasterpunkt im Raummodell)							
globale Strahlungstemperatur				Strahlungstemperatur-Asymmetrie			
maximal		minimal		maximal		mini	
$t_{\text{U,max}}$	= 25,7 °C	$t_{\text{U,min}}$	= 24,9 °C	$\Delta t_{\text{S,max}}$	= 3,5 K	$\Delta t_{\text{S,min}}$	= 2,6 K
l = 1	k = 1	l = 5	k = 3	l' = 6	k = 4		

Bild 2
Datenblatt mit relevanten Eingabewerten und Simulationsergebnissen für einen Eckraum mit Fensterband und einer flächenbezogenen Kühlleistung von 70 W/m² (Variante 5). Zugehörig gilt auch Bild 5

nen über diese Wunderlösungen oftmals unvollständig mitunter sogar unehrlich:

- Die Doppelfassaden – im völlig falschen Sprachgebrauch oftmals als „Klimafassaden“ bezeichnet – können die Klimaanlage nicht ersetzen, wie anfangs teilweise propagiert und erhofft wurde, sondern sie vergrößern in der Regel die Wärmeeinträge unter sommerlichen Bedingungen. Die häufig installierten Klimatisierungssysteme finden oft keine Erwähnung in den Publikationen und täuschen somit den Leser.
- Die thermische Bauteilaktivierung stellt eine energetisch interessante Entwicklung dar, die bei alleiniger Anwendung aber Raumzustände beispielsweise

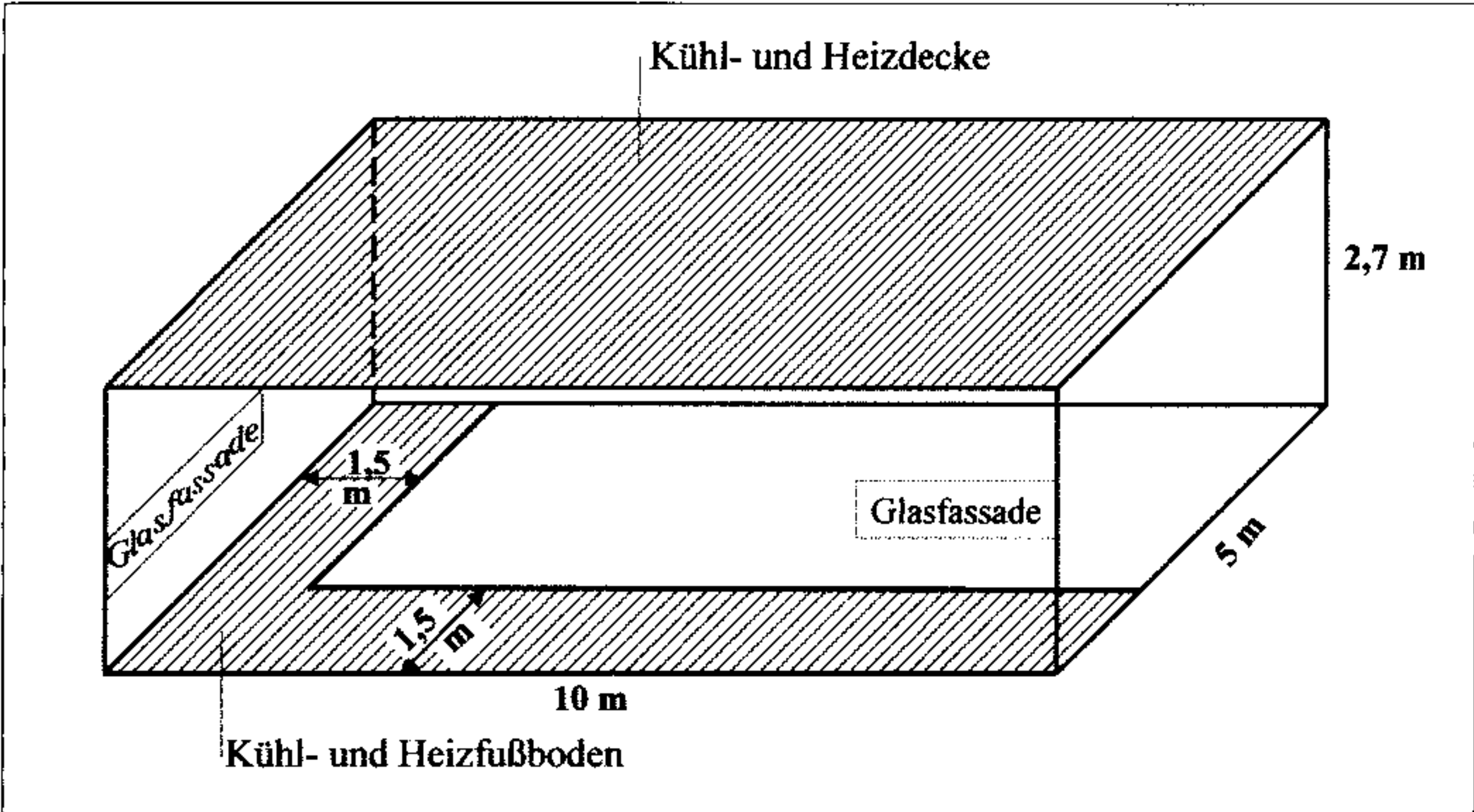
in den Grenzen der DIN 1946/2 nicht gewährleisten kann. Meistens wird nicht deutlich darauf hingewiesen, dass Zusatzsysteme oder spezielle Hybridlösungen dafür erforderlich sind. Zu hohe Erwartungen bringen die thermische Bauteilaktivierung dann in Misskredit.

Um die Planungsaufträge und die Ausführungsaufträge für die Haustechnik zu bekommen, überbieten sich die Bewerber sehr häufig in ihren Versprechungen bezüglich der Leistungsfähigkeit der jeweils vorgeschlagenen Lösungen und unterbieten sich in den Preisen. Die Betriebskosten bleiben bei sogenannten Investorenobjekten ohnehin auf der Strecke, d. h., es werden primär energetische Sünden begangen.

Da die meisten konventionellen Klimatisierungssysteme technisch weitestgehend ausgereift sind, muss man sich normalerweise mit kleinen Verbesserungen begnügen. Wirklich innovative Lösungen sollten seriös entwickelt und sorgfältig ausgetestet werden, bevor vollmundige Versprechungen folgen.

Tabelle 1

Relevante Ergebnisse für die Kühlung und Heizung eines Eckraumes mit Vollverglasung mittels einer Baukastenlösung thermisch aktiver Decken- und Fußbodenteilfläche



Kühlung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,max}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Boden}$ °C	$t_{Kaltwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Eckraum mit Vollverglasung 70 W/m ² _{FB} (Variante 1)											
Kühldecke 52,0 W/m ² _{KD} + Kühlbodenstreifen 26,1 W/m ² _{KBS} + Luftkühlung 7,7 W/m ² _{FB}											
25	24,7	25,3	0,7	1,2	2,7...5,1	26,0	23,4	20,2...20,3	20,9...21,3	18,5	ideal
Eckraum mit Vollverglasung 90 W/m ² _{FB} (Variante 2)											
Kühldecke 68,0 W/m ² _{KD} + Kühlbodenstreifen 34,6 W/m ² _{KBS} + Luftkühlung 7,8 W/m ² _{FB}											
25	24,4	25,6	0,9	0,9	3,5...6,8	26,5	23,4	18,8...18,9	19,7...20,3	16,6	ideal
Eckraum mit Vollverglasung 90 W/m ² _{FB} (Variante 3) ¹											
Kühldecke 67,7 W/m ² _{KD} + Kühlbodenstreifen 33,3 W/m ² _{KBS} + Luftkühlung 8,4 W/m ² _{FB}											
25	24,7	25,3	0,8	1,1	3,4...6,1	26,0	23,5	18,9...19,0	19,8...20,3	16,7	ideal
¹ Gegenüber Variante 2 wird eine erhöhte Interieurlast angenommen.											
Heizung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,min}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Boden}$ °C	$t_{Heizwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Eckraum mit Vollverglasung 46 W/m ² _{FB} (Variante 12)											
Heizdecke 32,8 W/m ² _{HD} + Heizbodenstreifen 31,6 W/m ² _{HBS} + Luftkühlung 5,5 W/m ² _{FB}											
22	21,4	22,6	1,1	0,7	2,3...5,7	21,7	20,7	27,4...27,6	25,2...25,7	28,6	ideal

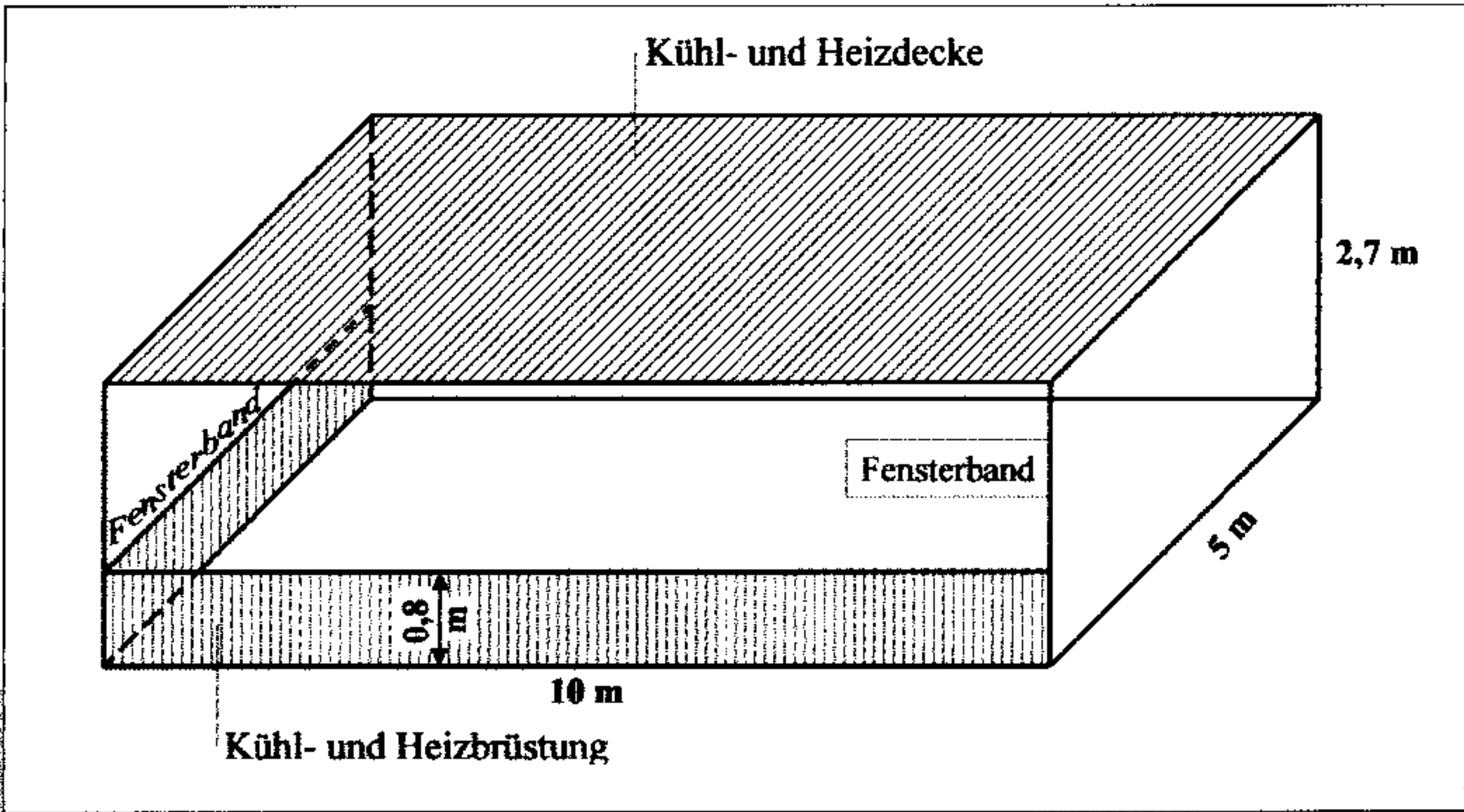


Tabelle 2

Relevante Ergebnisse für die Kühlung und Heizung eines Eckraumes mit Fensterband mittels einer Baukastenlösung thermisch aktiver Decken- und Brüstungsfläche

Kühlung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,max}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Brüstung}$ °C	$t_{Kaltwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Eckraum mit Fensterband 50 W/m ² _{FB} (Variante 4)											
Kühldecke 36,3 W/m ² _{KD} + Kühlbrüstung 21,2 W/m ² _{KB} + Luftkühlung 8,7 W/m ² _{FB}											
25	24,8	25,2	0,6	1,8	1,5...3,7	25,9	23,2	22,0...22,1	21,5	20,8	ideal
Eckraum mit Fensterband 70 W/m ² _{FB} (Variante 5)											
Kühldecke 53,1 W/m ² _{KD} + Kühlbrüstung 36,8 W/m ² _{KB} + Luftkühlung 8,0 W/m ² _{FB}											
25	24,7	25,3	0,4	1,0	2,6...3,5	25,7	23,6	20,5...20,6	20,0...20,1	18,8	ideal
Eckraum mit Fensterband 90 W/m ² _{FB} (Variante 6)											
Kühldecke 69,4 W/m ² _{KD} + Kühlbrüstung 49,3 W/m ² _{KB} + Luftkühlung 8,0 W/m ² _{FB}											
25	24,4	25,6	0,5	0,9	3,5...4,6	26,0	23,5	19,1...19,3	18,5...18,6	16,9	ideal
Eckraum mit Fensterband 90 W/m ² _{FB} (Variante 7) ¹											
Kühldecke 69,1 W/m ² _{KD} + Kühlbrüstung 48,9 W/m ² _{KB} + Luftkühlung 8,5 W/m ² _{FB}											
25	24,7	25,3	0,5	1,1	3,2...4,5	25,7	23,6	19,2...19,3	18,6	17,0	ideal
¹ Gegenüber Variante 6 wird eine erhöhte Interieurlast angenommen.											
Heizung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,min}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Brüstung}$ °C	$t_{Heizwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Eckraum mit Fensterband 33 W/m ² _{FB} (Variante 13)											
Heizdecke 26,0 W/m ² _{HD} + Heizbrüstung 28,6 W/m ² _{HB} + Luftkühlung 5,0 W/m ² _{FB}											
22	21,2	22,8	0,7	0,5	1,6...3,3	22,0	20,7	26,1...26,3	26,1	27,0	ideal

Im Besonderen sollten drei Hauptpunkte bei der Systemfindung bzw. -entwicklung Beachtung finden:

□ Hauptzielstellung für den Anlagenbetrieb ist die größtmögliche Primärenergieeinsparung. Sie kann durch weitestgehende Nutzung von Umweltenergie zum Kühlen und Heizen sowie durch Minimierung des Transportaufwandes für die Medienströme erreicht werden.

□ Mit den installierten Anlagen sind behagliche, in Grenzen individuell einstellbare Raumzustände zu gewährleisten. Die Forderungen der DIN 1946/2 gelten hierbei als berechtigt. Sie entsprechen im Allgemeinen auch den Behaglichkeitskriterien der ISO 7730.

□ Die Realisierung der Anlage muss wirtschaftlich optimal erfolgen. Theoretisch durchdrungene und praktisch erprobte Anlagentechniken mit einem hohen Wiederholungsgrad (Masseneinsatz), die im Bauwerk so integriert werden, dass ein hoher Vorfertigungsgrad erreicht wird, bieten ein hohes Einsparpotenzial.

Zur Verdeutlichung des letzten Punktes sei vermerkt:

□ Für viele Bürobauten sind die Klimatisierungssysteme jeweils neu „erfunden“ worden. Zugehörige Raumströmungsversuche wurden von der Industrie gerne durchgeführt, beseitigten die bei jeder Neuentwicklung auftretenden Kinderkrankheiten aber nicht grundsätzlich.

□ Wird im Leistungsverzeichnis beispielsweise ein kombiniertes Kühlsegel mit Leuchte und Luftdurchlasselement beschrieben, welches von der Ausführungsfirma „noch zu optimieren“ ist, so kann diese Konstruktion unter den Rahmenbedingungen der Anlagenrealisierung sicherlich nicht zu einem technischen Highlight entwickelt werden.

□ Ausschreibungen, die z.B. kombinierte Kühl-/ Heizdecken beinhalten und bei fast gleichen Absolutwerten der Wärmestromdichten für beide Fälle, das Kühlen mit 3 K Temperaturspreizung und das Heizen mit 6 K Temperaturspreizung vorschreiben, verursachen große hydraulische Probleme in der Anlage oder einen unwirtschaftlichen Aufwand bei der Errichtung der Anlage. Wenn zudem die angegebenen Leis-

tungswerte nicht zur konzipierten Konstruktion der thermisch aktiven Fläche passen, werden niedrig prognostizierte Kosten nicht haltbar sein.

Der Autor wünscht sich selbstverständlich keine Begrenzung der Systemvielfalt, jedoch einen Wettbewerb von „ausgereiften“ Systemen. Sie bieten die Gewähr für Funktionstüchtigkeit und Wirtschaftlichkeit.

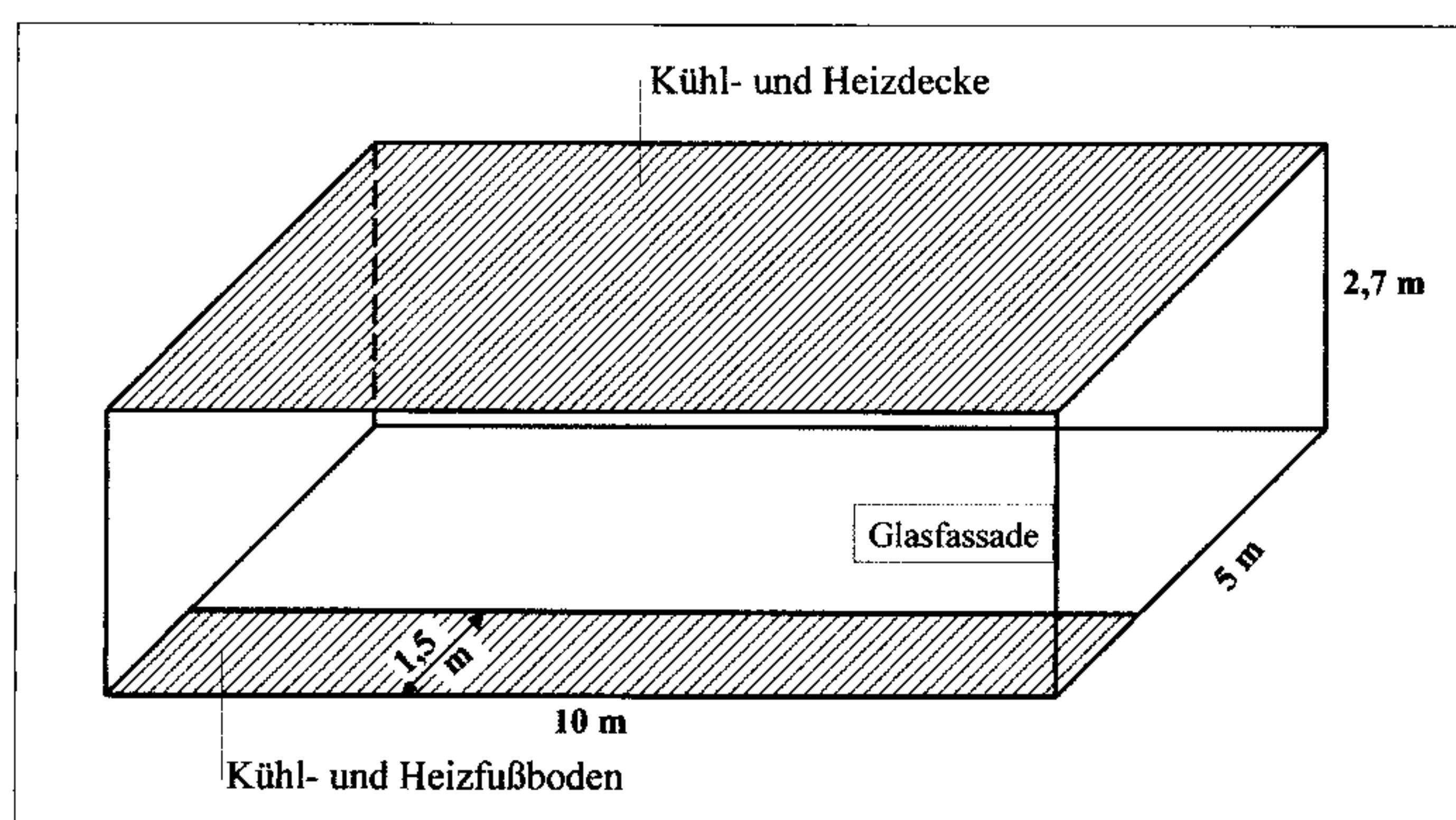
Vorteilhafte Flächenkühlsysteme

Um die Primärenergieaufwendungen und die Betriebskosten gering zu halten, hat sich der Einsatz von Flächenkühlsystemen bestens bewährt. Die Hauptvorteile sind:

□ Die Kaltwassertemperaturen können bei Flächenkühlsystemen gegenüber reinen Luftkühlsystemen beträchtlich angehoben werden, wodurch sich die Antriebsenergie für die Kälteerzeugung stark reduzieren lässt. Bei einer mittleren Wassertemperatur von 16 °C – wie für Kühldecken ausreichend – ergeben sich gegenüber der Luftkühlung mit einer mittleren Kaltwassertemperatur von

Tabelle 3

Relevante Ergebnisse für die Kühlung und Heizung eines Normalraumes mit Vollverglasung mittels einer Baukastenlösung thermisch aktiver Decken- und Fußbodenteilfläche



Kühlung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,max}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Boden}$ °C	$t_{Kaltwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Normalraum mit Vollverglasung 70 W/m ² _{FB} (Variante 8)											
Kühldecke 54,9 W/m ² _{KD} + Kühlbodenstreifen 26,5 W/m ² _{KBS} + Luftkühlung 7,7 W/m ² _{FB}											
25	24,7	25,3	0,5	0,9	3,1...4,9	25,7	23,8	20,1	20,8...21,1	18,3	ideal
Normalraum mit Vollverglasung 90 W/m ² _{FB} mit erhöhter Interieurlast (Variante 9)											
Kühldecke 70,8 W/m ² _{KD} + Kühlbodenstreifen 34,5 W/m ² _{KBS} + Luftkühlung 8,5 W/m ² _{FB}											
25	24,8	25,2	0,4	0,8	3,6...6,5	25,6	23,9	18,9	19,8...20,2	16,6	ideal
Heizung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,min}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Boden}$ °C	$t_{Heizwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Normalraum mit Vollverglasung 32 W/m ² _{FB} (Variante 14)											
Heizdecke 24,9 W/m ² _{HD} + Heizbodenstreifen 24,5 W/m ² _{HBS} + Luftkühlung 5,0 W/m ² _{FB}											
22	21,3	22,7	0,4	0,7	2,0...4,9	22,3	20,6	26,1...26,2	24,3...24,6	26,9	ideal

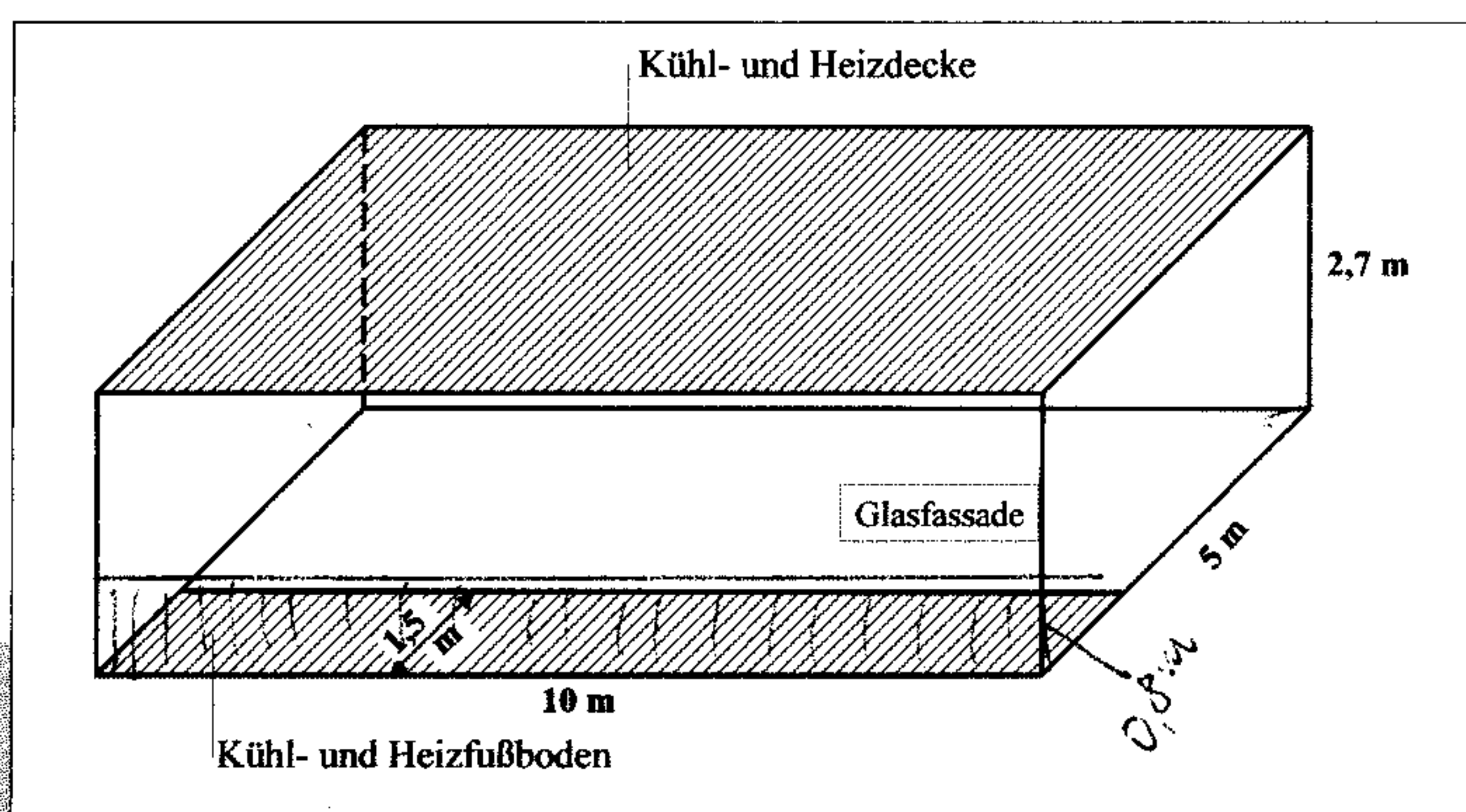


Tabelle 4

Relevante Ergebnisse für die Kühlung und Heizung eines Normalraumes mit Fensterband mittels einer Baukastenlösung thermisch aktiver Decken- und Brüstungsfläche

Kühlung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,max}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Brüstung}$ °C	$t_{Kaltwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Normalraum mit Fensterband 50 W/m ² _{FB} (Variante 10)											
Kühldecke 38,0 W/m ² _{KD} + Kühlbrüstung 24,8 W/m ² _{KB} + Luftkühlung 8,2 W/m ² _{FB}											
25	24,8	25,2	0,3	1,3	1,8...2,8	25,5	23,6	21,8	21,4	20,5	ideal
Normalraum mit Fensterband 90 W/m ² _{FB} mit erhöhter Interieurlast (Variante 11)											
Kühldecke 72,3 W/m ² _{KD} + Kühlbrüstung 52,9 W/m ² _{KB} + Luftkühlung 8,3 W/m ² _{FB}											
25	24,6	25,4	0,5	0,8	3,5...4,9	25,8	23,8	19,0	18,3	16,6	ideal
Heizung											
t_E °C	t_{Luft} °C	$t_{Umgebung}$ °C	Δt_E K	$g_{Lufttemp.}$ K/m	$\Delta t_{Strahl.}$ K	$t_{Umg.,min}$ °C	$t_{L,Boden}$ °C	$t_{aktiv,Decke}$ °C	$t_{aktiv,Brüstung}$ °C	$t_{Heizwasser}$ °C	Gesamt- urteil
Normalraum mit Fensterband 24 W/m ² _{FB} (Variante 15)											
Heizdecke 20,1 W/m ² _{HD} + Heizbrüstung 22,1 W/m ² _{HBS} + Luftkühlung 4,8 W/m ² _{FB}											
22	21,3	22,7	0,4	0,6	1,4...3,1	22,3	20,7	25,2...25,4	25,2...25,3	26,0	ideal

9 °C theoretische Verbesserungen bezüglich der Antriebsleistung um 30 % bis 50 %.

□ Der Einsatz von Wasser als Wärmeträger spart gegenüber Luft beispielsweise über 90 % an elektrischer Leistung für den Transport ein.

□ Über lange Zeiträume des Jahres kann das Kaltwasser für die Flächenkühlung

sogar ohne Kältemaschine durch Nutzung der freien Kühlung bereitgestellt werden. Bei Einsatz eines Trockenkühlers sind dies ca. 50 % des Jahres, bei Verwenden eines Nasskühlers (Kühlturmes) sogar ca. 70 % des Jahres.

Die genannten Einsparungen können noch gesteigert werden, denn bei innovativen Lösungen ist der Einsatz von

noch höheren Kaltwassertemperaturen möglich.

Zusätzlich zeichnen sich die Flächenkühlsysteme durch wärmephysiologische Vorteile aus:

□ Da die Wärmeabfuhr aus dem Raum mit einem großen Strahlungsanteil erfolgt, wird die thermische Behaglichkeit deutlich verbessert. Die Forderungen

nach DIN 1946 Teil 2 sind ohne weiteres einhaltbar.

- Durch niedrige Luftgeschwindigkeiten im Raum besteht keine Zuggefahr.
- Die Flächenkühlsysteme arbeiten völlig geräuschlos.

Die Lüftung hat nur noch die effiziente Versorgung mit aufbereiteter Außenluft zu gewährleisten, um die hygienischen Anforderungen und die Abfuhr der produzierten Schadstoffe zu erfüllen.

Kombinierte Kühl- und Heizflächensysteme

Selbstverständlich ist es wirtschaftlich, wenn installierte Anlagensysteme ganzjährig genutzt werden. Dies trifft somit auch auf die thermisch aktiven Flächensysteme zu. Es gelten:

- Wird der Kühlfall energetisch günstig gelöst, dann profitiert natürlich auch der Heizfall mit sehr niedrigen Heizwassertemperaturen davon.
- Die Behaglichkeitsgrenzwerte für Heizdecken sind kleiner als bei Kühldecken. So gelten beispielsweise nach [1] für die

zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie von Heizdecken 8 K und für die von Kühldecken 14 K beim kleinstmöglichen Unzufriedenheitswert von 5 %. Die Einhaltung ist in der Regel ohne weiteres realisierbar.

Problematisch kann bei alleinigem Heizdeckeneinsatz der Kaltluftabfall an den transparenten Fassaden sein. Dies betrifft vor allem Eckräume mit Vollverglasung.

Idee einer Baukastenlösung für alle Leistungsbereiche

Die Geometrien der Büroräume, die Gestaltung der Fassaden und die Intensität innerer Wärmequellen sind sehr unterschiedlich. Vollglasfassaden ohne äußere Verschattung kommen häufig zum Einsatz. Die Kühllasten von Räumen schwanken somit in sehr großen Bereichen. Dennoch besteht das Bestreben, trotz der großen Vielfalt der Raumgestaltungen und der thermischen Belastungen, mit einheitlichen Kühl- und Heizungskonzepten zu arbeiten. Es gelten die Überlegungen:

- In der Regel kann die Decke stets als thermisch aktive Fläche ausgebildet werden.
- Sie ist als Kühl- und Heizfläche zu nutzen.
- Behaglichkeitsfördernd wirkt das Einbeziehen der Brüstung in die Kühl- und Heizfunktion.
- Ist keine opake Brüstung vorhanden, kann ersatzweise ein Fußbodenstreifen genutzt werden.
- Die wärmetechnischen Charakteristiken der Aktivflächen sind so aufeinander abzustimmen, dass diese mit einer einheitlichen Wassertemperatur arbeiten können.

Für Grundsatzlösungen ist zwischen Eckräumen mit zwei Außenflächen und Normalräumen mit einer Außenfläche zu unterscheiden.

Damit ergeben sich die im **Bild 1** dargestellten Lösungen.

Grundlagen für die Simulationen

Zur Untersuchung des Baukastensystems wird eine Simulation mit dem Raummodell nach [1] durchgeführt. Die

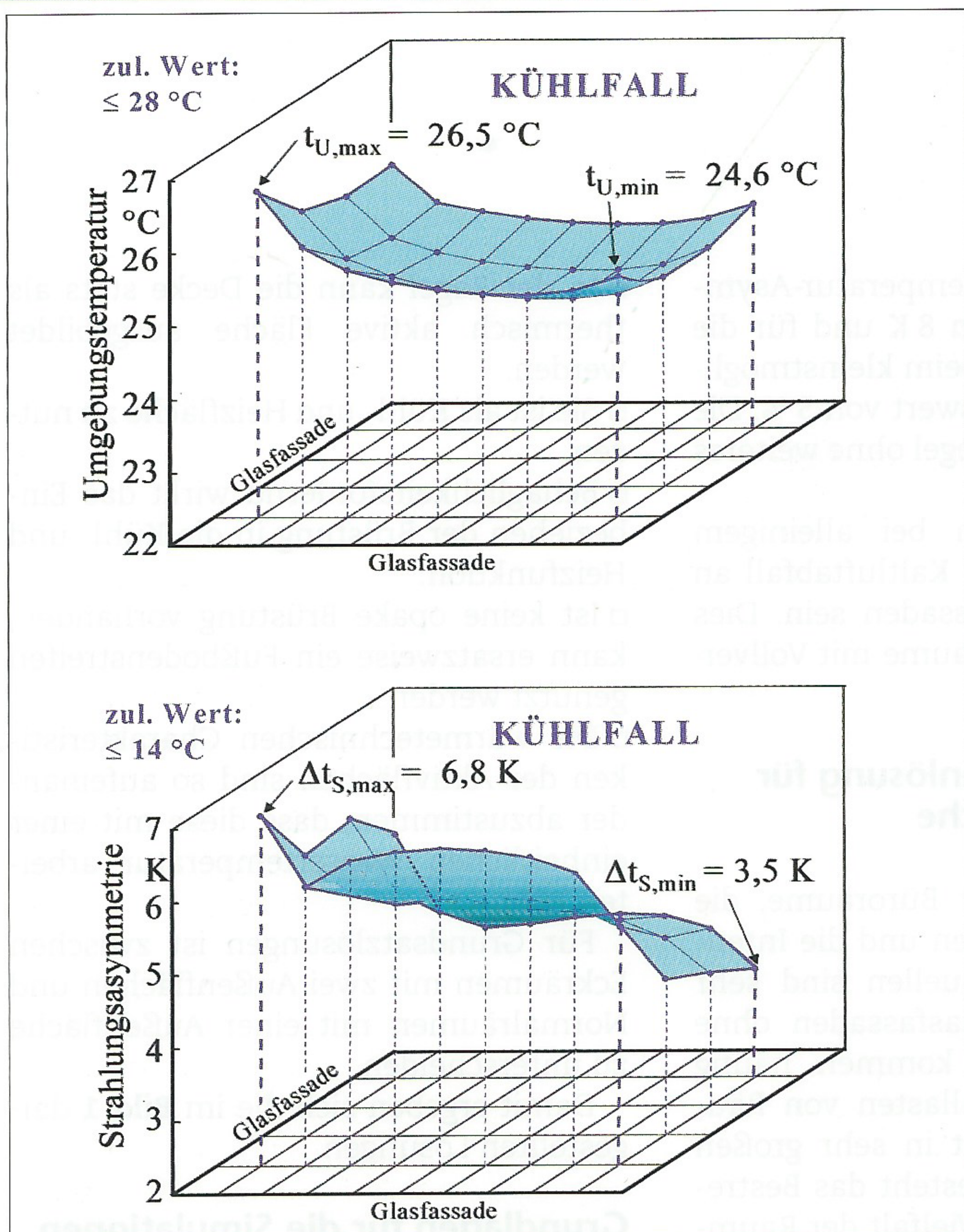


Bild 3

Verteilung der Strahlungstemperatur der Umgebung (a) und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie (b) über dem Raumgrundriss eines Eckraumes mit zwei Vollglasfassaden im Kühlfall bei einer flächenbezogenen Kühllast von 90 W/m^2 (Tabelle 1, Berechnungsvariante 2). Die Kühlung erfolgt durch die gesamte Deckenfläche und einen Fußbodenstreifen entlang der Fassade bei guten Behaglichkeitsbedingungen

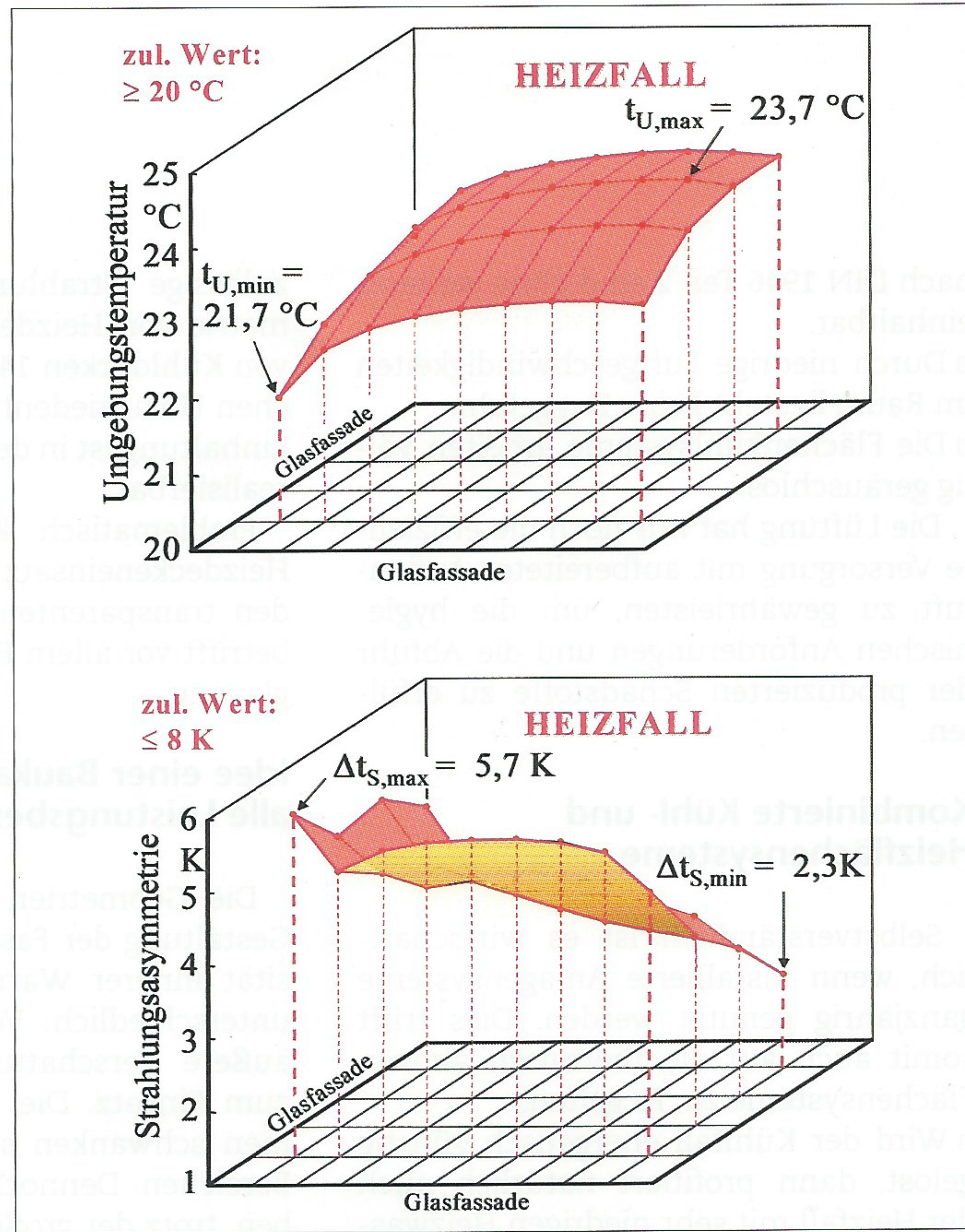


Bild 4

Verteilung der Strahlungstemperatur der Umgebung (a) und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie (b) über dem Raumgrundriss eines Eckraumes mit zwei Vollglasfassaden im Heizfall bei einer flächenbezogenen Heizlast von 46 W/m^2 (Tabelle 1, Berechnungsvariante 12, Spezifika:

$k_{\text{Fassade}} = 1,3\text{ W/(m}^2\text{K)}$, Außentemperatur -15°C , Raumtemperatur 22°C , Erwärmung der Quellluft). Die Heizung erfolgt durch die gesamte Deckenfläche und einen Fußbodenstreifen entlang der Fassade bei guten Behaglichkeitsbedingungen

verschiedenen Annahmen werden stichpunktartig erläutert.

Die Raumgeometrie ist in den Bildern der Tabellen 1 bis 4 dargestellt.

Zur Lüftung wird ein Quellsystem mit einem flächenbezogenen Volumenstrom von $6\text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ vorgesehen.

Im Kühlfall werde für die eingebrachten Wärmelasten eine relativ ungünstige Verteilung angenommen:

- Den thermisch aktiven Raumboflächen wird keine direkte Last zugewiesen, wodurch eine direkte Wärmeabfuhr entfällt. Die wärmephysiologischen Kennwerte – wie beispielsweise der vertikale Lufttemperaturgradient, die Strahlungsasymmetrie usw. – nehmen dadurch größere Werte an. Die Insassen werden theoretisch stärker als im Realfall belastet.
- Ein großer Teil der Wärmelasten wird durch die transparente Fläche an den Raum übergeben, indem der Wärmestrom der Fläche direkt aufgeprägt ist.
- Ein weiterer Teil ist ebenfalls als Wärmestromdichte den übrigen nichtaktiven Flächen zugeordnet.

□ Durch neun Interieurwärmequellen kann außerdem jeweils punktförmig ein Wärmestrom eingebracht werden, dessen Wirkungsanteile – Konvektion oder Strahlung – vorgegeben sind.

- Diese Art der Interieurlast kann wahlweise 850 W oder 1350 W betragen.
- Die Kühllasten sind im denkbaren Bereich von 50 W/m^2 bis 90 W/m^2 zu variieren.
- Die Wärmeeinträge von außen zur Kühlbrüstung bleiben unbeachtet, da diese keinen Einfluss auf die Behaglichkeit im Raum haben.
- Die Zulufttemperatur beträgt 22°C .

Im Heizfall ergeben sich die jeweiligen Lasten als Summe aus der Transmissionsheizlast und der Lüftungsheizlast unter nachfolgenden Besonderheiten:

- Die Transmissionsheizlast folgt programmintern aus dem Teilwärmehdangskoeffizienten $\kappa_a = 1,56\text{ W/(m}^2\text{K)}$ für den transparenten Fassadenanteil sowie für eine Außentemperatur von -15°C und für die Raumtemperatur von 22°C . Der Teilwärmehdangskoeffizient entspricht etwa einem Wärmehdangswert von $k = 1,3\text{ W/(m}^2\text{K)}$.

□ Die Wärmeverluste der Heizbrüstung nach außen bleiben unberücksichtigt, da hierdurch kein Einfluss auf die Behaglichkeit im Raum entsteht.

□ Die Lüftungsheizlast ergibt sich aus dem vorgegebenen Luftvolumenstrom, einer Zulufttemperatur von 20°C und aus der variantenspezifischen Ablufttemperatur.

Die wärmetechnische Qualität der thermisch aktiven Flächen wird durch die Teilwärmehdangskoeffizienten – von der Paneeloberfläche bis zum Wasser gebildet – gut charakterisiert. Es gelten:

- Kühldecke $\kappa_{\text{Panel}} = 30\text{ W/(m}^2\text{K)}$
- Fußboden $\kappa_{\text{Panel}} = 10\text{ W/(m}^2\text{K)}$
- Brüstung $\kappa_{\text{Panel}} = 30\text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Die genannten Werte entstammen umfangreichen Mess- und verifizierten Forschungsergebnissen für Bauteile mit Kapillarrohrmatten gemäß den Konstruktionen der Fa. Clina. Sie gelten bei den Decken und Brüstungen z. B. für Putzvarianten [2] und bei Fußböden für Estrichvarianten mit Parkettbelag [3]. Es handelt sich damit um Normlösungen, bei der Kühldecke entspricht der verwendete Wert etwa einer Normkühlleistung von 80 W/m^2 .

t_E	°C	Operative Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) in der Referenzhöhe nach DIN 1946/2 von 1,1 m über Fußboden
t_{Luft}	°C	Mittlere Raumlufthtemperatur in der Referenzhöhe nach DIN 1946/2 von 1,1 m über Fußboden
$t_{Umgebung}$	°C	Mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung in der Referenzhöhe nach DIN 1946/2 von 1,1 m über Fußboden
Δt_E	K	Schwankung der Empfindungstemperatur in der Referenzhöhe nach DIN 1946/2 von 1,1 m über Fußboden untersucht über dem Raumgrundriss mit einem Wandabstand von jeweils 1 m
$g_{Lufttemp.}$	K/m	Vertikaler Lufttemperaturgradient zwischen den Höhen 0,1 m und 1,1 m
$\Delta t_{Strahl.}$	K	Maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie bezogen auf Würfelemente gemäß [1] in der Referenzhöhe von 1,1 m über Fußboden untersucht über dem Raumgrundriss mit einem Wandabstand von jeweils 1 m
$t_{Umg.,max}$ $t_{Umg.,min}$	°C	Maximale bzw. minimale Strahlungstemperatur der Umgebung in der Referenzhöhe von 1,1 m über Fußboden untersucht über dem Raumgrundriss mit einem Wandabstand von jeweils 1 m
$t_{L,Boden}$	°C	Mittlere Lufttemperatur über dem Boden (Zonenhöhe: 0...0,27 m)
$t_{aktiv,Decke}$	°C	Oberflächentemperatur der thermisch aktiven Decke
$t_{aktiv,Boden}$ $t_{aktiv,Brüstung}$	°C	Oberflächentemperatur des thermisch aktiven Fußbodens bzw. der Brüstung
$t_{Kaltwasser}$ $t_{Heizwasser}$	°C	Mittlere Kaltwasser- bzw. Heizwassertemperatur mit der die Kapillarrohrmatten der Decke, des Fußbodens bzw. der Brüstung beaufschlagt werden.

Indizes der Bezugsflächen:

FB	Fußbodenfläche
KD	Kühldeckenfläche (= Fußbodenfläche)
HD	Heizdeckenfläche (= Kühldeckenfläche = Fußbodenfläche)
KBS	Kühlbodenstreifenfläche
HBS	Heizbodenstreifenfläche (= Kühlbodenstreifenfläche)
KB	Kühlbrüstungsfläche
HB	Heizbrüstungsfläche (= Kühlbrüstungsfläche)

Tabelle 5

Formelzeichen und Indizes

Die mittleren Wassertemperaturen sind für beide aktivierten Flächen gleich. D. h., die technische Lösung ist somit relativ einfach, indem von einer zentralen Vorregelung ausgegangen wird und die Raumtemperaturregelung in begrenztem Maße mit einer Drosselung des Wasserstromes arbeitet. Die Simulation setzt eine angepasste Wassertemperatur bei voller Durchströmung mit gleicher mittlerer Temperatur an jeder Stelle voraus.

Die Empfindungstemperatur wird als arithmetisches Mittel aus dem Maximal- und Minimalwert, der über dem Raumgrundriss vorliegt, gebildet. Sie soll im Kühlfall $t_{E,soll} = 25 \text{ °C}$ und im Heizfall $t_{E,soll} = 22 \text{ °C}$ betragen.

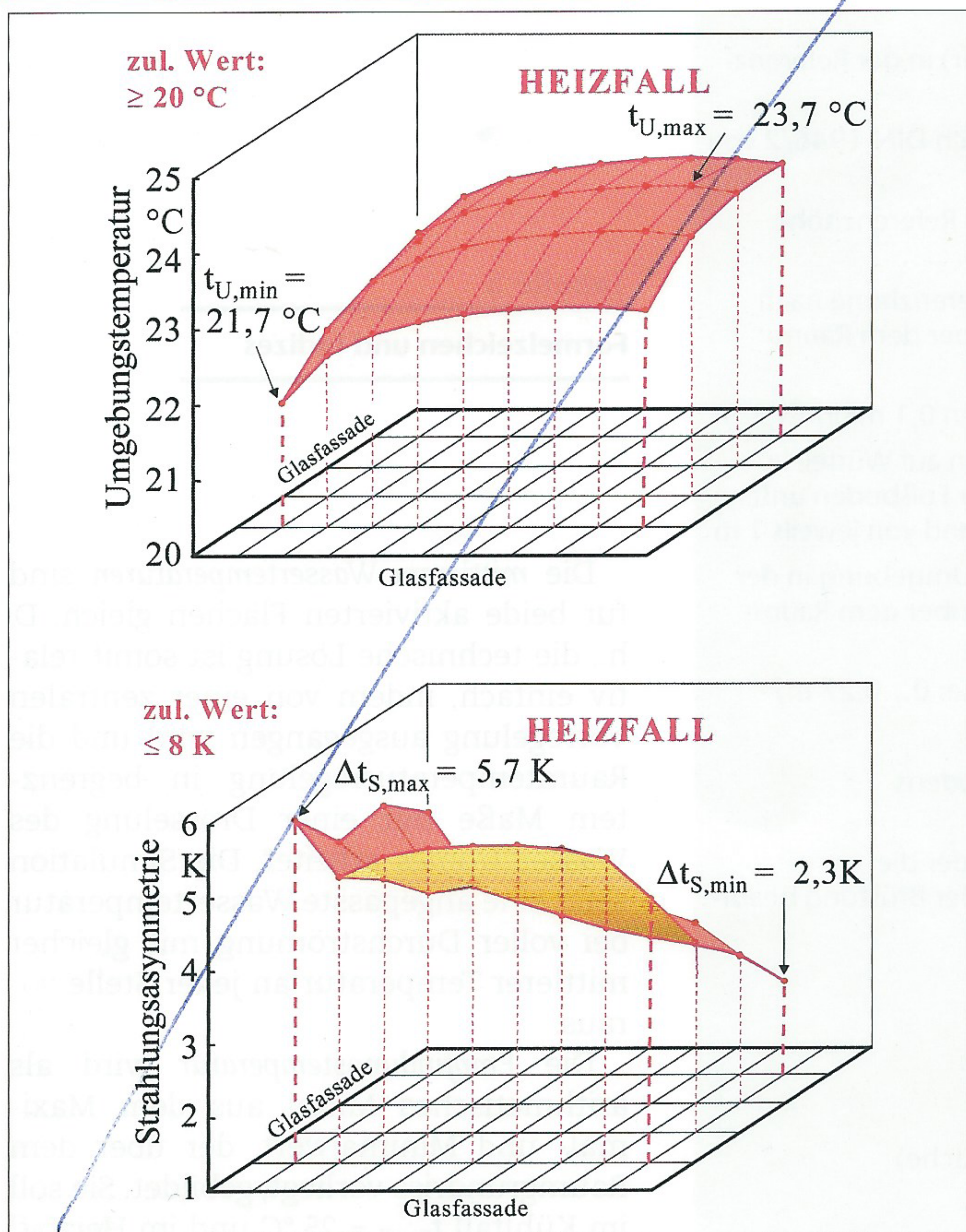


Bild 5

Verteilung der Strahlungstemperatur der Umgebung (a) und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie (b) über dem Raumgrundriss eines Eckraumes mit zwei Fensterbändern im Kühlfall bei einer flächenbezogenen Kühllast von 70 W/m^2 (Tabelle 2, Berechnungsvariante 5, siehe auch Bild 2). Die Kühlung erfolgt durch die gesamte Deckenfläche und die Brüstungen bei sehr guten Behaglichkeitsbedingungen

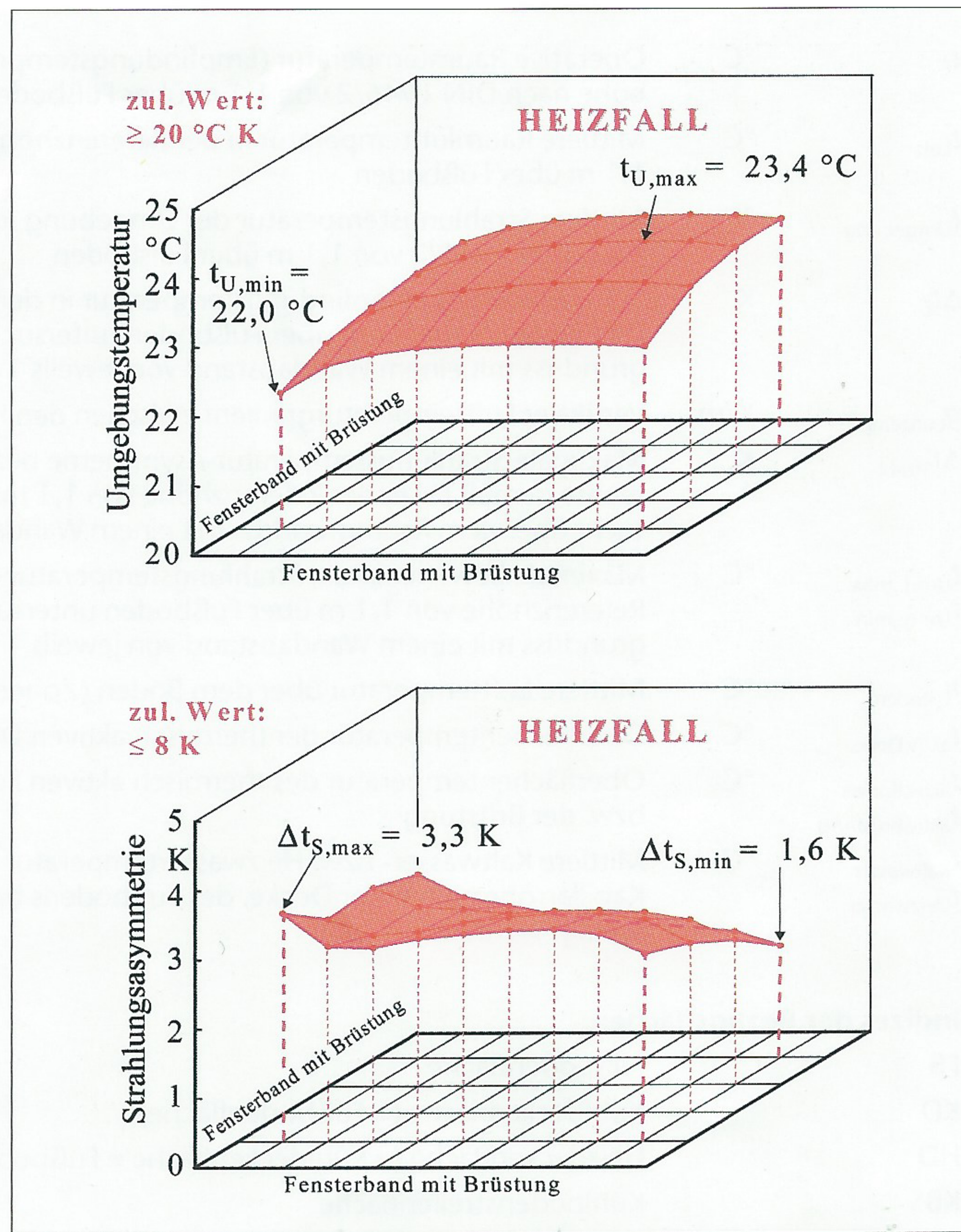


Bild 6

Verteilung der Strahlungstemperatur der Umgebung (a) und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie (b) über dem Raumgrundriss eines Eckraumes mit zwei Fensterbändern im Heizfall bei einer flächenbezogenen Heizlast von 33 W/m^2 (Tabelle 2, Berechnungsvariante 13, Spezifika: $k_{\text{Fassade}} = 1,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, Außentemperatur -15 °C , Raumtemperatur 22 °C , Erwärmung der Quellluft). Die Heizung erfolgt durch die gesamte Deckenfläche und die Brüstungen bei sehr guten Behaglichkeitsbedingungen.

Aussagen der Simulationen

Die Ergebnisse von Nutzrechnungen sind in [4] ausführlich dargelegt. Ein Variantenbeispiel zeigt das im **Bild 2** gezeigte Datenblatt. Die kompakte Zusammenfassung aller Ergebnisse für die im Bild 1 vorgestellten Raumvarianten ist in den **Tabellen 1 bis 4** für verschiedene Kühlleistungen und für den Heizfall gegeben. Es gilt hierfür die Größenerklärung in **Tabelle 5**.

Für die beiden Extremvarianten – Eckräume mit Vollverglasung oder Fensterband – sind die Verteilungen der Strahlungstemperatur der Umgebung und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie über dem Raumgrundriss in den **Bildern 3 bis 6** detailliert dargestellt.

Aus den Ergebnissen folgen die generellen Aussagen:

□ Mit der vorgestellten Baukastenlösung können die modellierten Kühl- und Heizlasten problemlos kompensiert werden, so dass energiesparend und umweltschonend wärmephysiologisch beste Raumzustände realisierbar sind.

□ Weitere Zusatzflächen könnten – falls unter besonderen Randbedingungen erforderlich – aktiviert werden.

Die wärmephysiologisch sehr guten Bedingungen für die Raumnutzer werden an den nachfolgenden Parametern deutlich:

- maximale Umgebungstemperatur (Mittelwert über die Grundfläche) im Kühlfall $25,6 \text{ °C}$
- zulässiger Wert (abgeleitet aus DIN 1946/2) $t_{U,\text{max}} \leq 28 \text{ °C}$
- maximale Schwankung der Empfindungstemperatur über die Grundfläche im Kühlfall $0,9 \text{ K}$ und im Heizfall $1,1 \text{ K}$
- zulässiger Wert nach ISO 7730 $\Delta t_{E,\text{max}} = \pm 2 \text{ K}$
- maximaler vertikaler Lufttemperaturgradient $1,8 \text{ K/m}$
- zulässiger Wert nach DIN 1946/2 $g_{\text{Lt}} \leq 2 \text{ K/m}$ (nach ISO 7730 $g_{\text{Lt}} \leq 3 \text{ K/m}$)
- maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie $6,8 \text{ K}$
- zulässiger Wert nach [1] für Heizdecken und Kühlwände $\Delta t_s \leq 8 \text{ K}$
- für Heizwände $\Delta t_s \leq 11 \text{ K}$ und für Kühldecken $\Delta t_s \leq 14 \text{ K}$
- maximale Strahlungstemperatur der Umgebung im Kühlfall $26,5 \text{ °C}$

- zulässiger Wert (abgeleitet aus DIN 1946/2) $t_{U,\text{max}} \leq 28 \text{ °C}$

□ minimale Strahlungstemperatur der Umgebung im Heizfall $21,7 \text{ °C}$

- zulässiger Wert $t_{U,\text{min}} \geq 20 \text{ °C}$

□ minimale Lufttemperatur in Knöchelhöhe ($0,1 \text{ m}$) im Kühlfall $23,2 \text{ °C}$

- zulässiger Wert nach DIN 1946/2 $t_{L,\text{min}} \geq 21 \text{ °C}$

□ maximale Kühlleistung des Fußbodenstreifens $34,6 \text{ W/m}^2$

- zulässiger Wert bei alleiniger Fußbodenkühlung. nach [5] $< 35 \text{ W/m}^2$.

Damit sind alle Behaglichkeitskriterien erfüllt, wobei noch erinnert sei, dass im Kühlfall nur eine Raumtemperatur von 25 °C zugrunde gelegt wurde. Einige Parameter würden sich beispielsweise bei einer Raumtemperatur von 26 °C noch besser darstellen.

Besonders positiv ist die Energieeffizienz der Flächenkühl- und Flächenheizsysteme zu bewerten:

□ Kühl- bzw. Heizmedientemperaturen nahe der Raumtemperatur sind energetisch und wirtschaftlich sehr vorteilhaft. Das Ziel, eine umfassende Umweltenergienutzung wird erreicht.

Geräteeinsatz	t_{KW}	t_L bzw. $t_{L,feucht}$	Berlin				München			
			tags		nachts		tags		nachts	
	°C	°C	h/a	%	h/a	%	h/a	%	h/a	%
Trockenkühler	16	<11	2259	52	2695	62	2301	53	3015	69
Nasskühler	16	<11	3029	69	3328	76	2944	67	3381	77

□ Die hohen mittleren Kaltwassertemperaturen – sie liegen variantenabhängig zwischen 16,6 °C und 20,8 °C – erlauben es, über lange Zeiträume des Jahres ohne „Powerkälte“ auszukommen, d. h. man kann mit *Umweltenergie* den Betrieb der Kühlflächen realisieren. Würde man im ungünstigsten Fall von einer mittleren Wassertemperatur von 16 °C ausgehen und eine Grädigkeit von 5 K im Trocken- bzw. Nasskühler ansetzen, folgten für die freie Kühlung die Jahresnutzungszeiten in **Tabelle 6**.

In der Realität liegt die mittlere Wassertemperatur beträchtlich über 16 °C, wodurch sich die Nutzungszeiten erhöhen. Außerdem wird der Minimalwert auch nur bei der maximalen Kühllast benötigt und schließlich kann mit angeputzten Kühldecken auch noch eine gewisse Nutzung der nächtlichen Kühlung durch Speichereffekte in der Massivdecke erfolgen.

□ Das Kaltwassertemperaturniveau kann theoretisch um etwa 1 K angehoben werden, wenn die zulässige Raumtemperatur von 26 °C realisiert wird. *Damit besteht im Kühlfall eine energetische Reserve!*

□ Die niedrigen mittleren Heizwassertemperaturen – sie liegen zwischen 26,0 °C und 28,6 °C – gestatten im Heizfall auch die Nutzung von Abfallenergie und von Solaranlagen in der Übergangszeit. Sie sind außerdem optimal beim Einsatz von Wärmepumpen.

□ Das Heizwassertemperaturniveau kann noch abgesenkt werden, wenn man die Raumtemperatur von 22 °C auf 20 °C reduziert. *Somit besteht auch im Heizfall eine energetische Reserve!*

Zusätzliche Simulationen wurden für alleinige Kühl- und Heizdecken mit der

gleichen wärmetechnischen Charakteristik im Raum durchgeführt. Es gelten die Aussagen:

□ Die Behaglichkeitskriterien zeigen ungünstigere Werte als bei den Lösungen mit den kombinierten Aktivflächen (Baukastenvarianten). Dies sind beispielsweise größere Ungleichförmigkeiten der Empfindungstemperatur über dem Raumgrundriss, höhere Strahlungstemperatur-Asymmetrien, höhere Strahlungstemperaturen im Kühlfall und niedrigere Werte im Heizfall.

□ Bei den hohen Kühlleistungen wären Kühldecken allein wegen bestehender Kondensationsgefahr nicht anwendbar (mittlere Wassertemperaturen 14,8 bis 15,4 °C).

□ Energetisch ungünstig sind im Heizfall auch die höheren Wassertemperaturen.

□ Der Kaltluftabfall an der Fassade bei Winterbetrieb ist bei einer reinen Deckenheizung stets problematisch. Dies gilt vor allem für Eckräume. Bei der Baukastenlösung ist durch den beheizten Fußbodenstreifen, noch günstiger durch die beheizte Brüstung der Kaltluftabfall gemindert bzw. unterbunden.

Fazit

Insgesamt ist festzustellen, dass die Idee, einen universell einsetzbaren Baukasten – bestehend aus thermisch aktiven Decken-, Brüstungs- und Fußbodenflächen mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten – zu entwickeln und für Büroräume mit unterschiedlichsten Fassadengestaltungen zu nutzen, aus wärmephysiologischer und energetischer Sicht sehr gut realisiert werden kann.

Die bereits vorhandenen, vielfältigen Mattenkonstruktionen (variable Flä-

Tabelle 6

Jahresnutzungszeiten für freie Kühlung

chenabmessungen, optimierte Rohrgeometrien mit kreisrunden oder ovalen Verteilleitungen) für Putz, Estrich, Alustrangpressprofile, Filigrandecken sowie Folientapeziersysteme mit neuartigen Verbindungstechniken der Fa. Clina, Berlin erlauben es, mit einem Baukastensystem die Kompensation aller in Büros vorkommenden Kühllasten vorzunehmen.

Der Betrieb aller thermisch aktiven Flächen im Raum mit einer einheitlichen Wassertemperatur, die Flexibilität sowie die Vorfertigung der Grundelemente und die Tatsache, dass wärmephysiologische Überprüfungen in der Regel nicht erforderlich sind, müsste zu einer Kostendegression führen. H 285

Literatur

[1] Glück, B.: *Wärmetechnisches Raummodell – Gekoppelte Berechnungen und wärmephysiologische Untersuchungen*. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1997 (ISBN 3-7880-7615-1).

[2] *Untersuchung der Kühlleistung von Putzdecken mit integrierten Kunststoff-Kapillarrohrmatten verschiedener Geometrie*. Forschungsbericht der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH), FG Versorgungs- und Umwelttechnik. Bearbeiter: B. Glück, 2001.

[3] Glück, B.: *Wassertemperaturen und Aufheizzeiten von Fußbodenheizungen mit Estrichverlegung*. HLH Bd. 51 (2000) Nr. 6, S. 26-33.

[4] *Kombinationen verschiedener Flächenkühlsysteme im Raum und ihre Einflüsse auf die Behaglichkeit und die Kaltwassertemperatur*. Forschungsbericht der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH), FG Versorgungs- und Umwelttechnik. Bearbeiter: B. Glück, 2001.

[5] Daniel, T.; Gräff, B.: *Leistungsbestimmung von Kühlböden*. DKV-Tagung 1996.