

Autor

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück

F+E TGA

08547 Jößnitz (Plauen) und

Westfälische Hochschule Zwickau (FH)

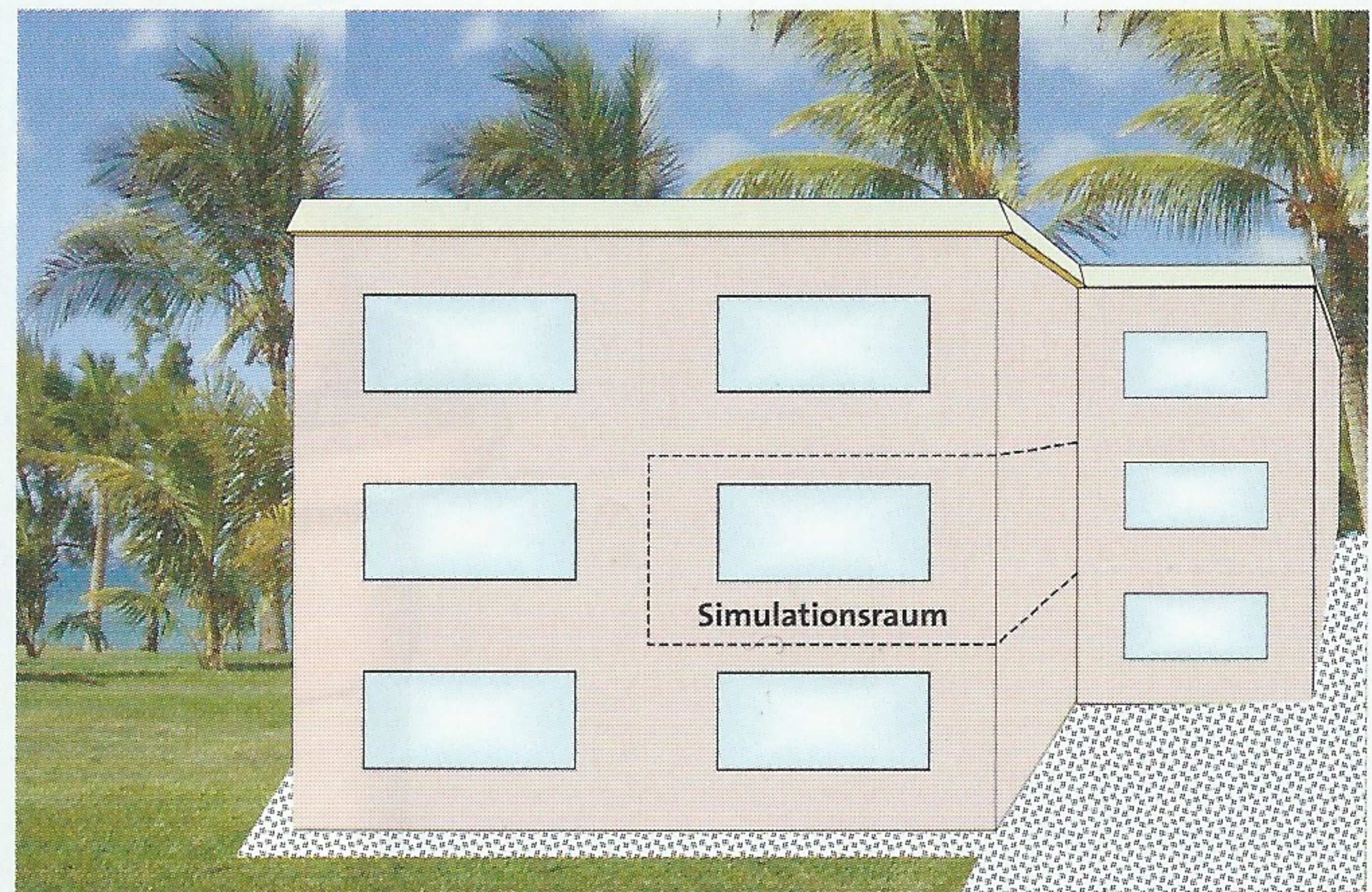


Bild 1: Ansicht des dreigeschossigen Bürogebäudes mit Kennzeichnung des Simulationsraumes mit einer opaken Ostfassade und einer Fassade mit Fenster nach Süden

Fassadenkühlung in heißen Ländern

Modellbildung, Simulation und Erkenntnisse

In den Golfanrainerstaaten wurden die Wohngebäude aufgrund der Erfahrung von Jahrtausenden mit dicken Wänden und kleinen Fenstern errichtet, um eine maximale Speicherung der „Nachtkälte“ und geringe Sonneneinstrahlung zu erreichen. In der jüngeren Vergangenheit entstanden jedoch auch Bürogebäude mit Glasfassaden, wobei die Nutzung der Büros den Einsatz von leistungsstarken Klimaanlage erfordert. In neuester Zeit beabsichtigt man aber den Energiebedarf zu reduzieren. Es entstehen wiederum vermehrt Gebäude, die den früheren Standards mit kleineren Fenstern – z. B. Lochfassaden mit beispielsweise 30 % Öffnungsanteil – entsprechen und die sogar mit einer äußeren PUR-Schaumdämmung versehen werden.

Von der Fa. Clina, Berlin wird vorgeschlagen, zwischen der massiven Außenwand und der Dämmschicht Kunststoff-Kapillarrohrmatten anzuordnen und diese mit Meerwasser zu beaufschlagen.

Die Außenwandtemperaturen von beispielsweise 40 bis 50 °C bewirken bei üblicher Bauweise und Raumtemperaturen von 23 bis 25 °C, die durch die Klimaanlage konstant gehalten werden, einen sehr großen Wärmestrom durch die opake Fassade in den Raum. Diesen Wärmestrom muss die Klimaanlage zusätzlich zur inneren Wärmelast und zum Energieeintrag über die Fenster abführen. Die neue Idee verfolgt das Ziel, mit Wasser aus der Umwelt den Wärmestrom durch die Wand zu einem großen Teil abzufangen, wodurch die Raumkühlleistung verringert wird. Da der Küstenstreifen eine bevorzugte Bebauungszone darstellt, wäre die Anwendung in umfangreicher Form mit Meerwasser möglich.

Als weitere Vervollkommenung wäre die Verlegung der Kunststoff-Kapillarrohrmatten in einer Schicht aus Latentspeichermaterial (PCM) denkbar, um Lastspitzen infolge des täglichen Sonnenganges ohne erhöhten Wasserdurchsatz zu vergleichmäßigen.

Im Weiteren werden Ergebnisse, die mittels Simulation mit dem „Dynamischen Raummodell zur wärmetechnischen und wärme-

physiologischen Bewertung“ [1] gewonnen wurden, vorgestellt. Das Simulationsmodell wurde dankenswerterweise durch die Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung gefördert. Der zugehörige Forschungsbericht enthält umfangreiche theoretische Ableitungen, die programmtechnische Umsetzung, die Verifikation der Algorithmen und zahlreiche Beispielanwendungen. Als charakteristische Größen gelten der zeitabhängige Tageskühlenergiebedarf sowie zu signifikanten Zeitpunkten die sich einstellenden thermischen Behaglichkeitsparameter: operative Raumtemperatur, Strahlungstemperatur, Strahlungstemperatur-Asymmetrie jeweils über einer definierten Prüfrasterebene in wählbarer Höhe über dem Fußboden sowie der vertikale Lufttemperaturverlauf einschließlich des vertikalen Lufttemperaturgradienten.

Modellraum und modellierte Raumkühlanlage

Als Modellraum für die umfassenden wärmetechnischen Simulationen wird ein Büroraum in einem dreistöckigen Gebäude verwendet. Die Außenansicht ist im Bild 1 dargestellt. Den Grundriss des Büros zeigt Bild 2. Die für die Simulation vorgegebene Geometrieingabe für den Raum verwendet eine Flächenunterteilung gemäß Bild 3. Zur eindeutigen Ergebnisbewertung der unterschiedlichen Bauweisen

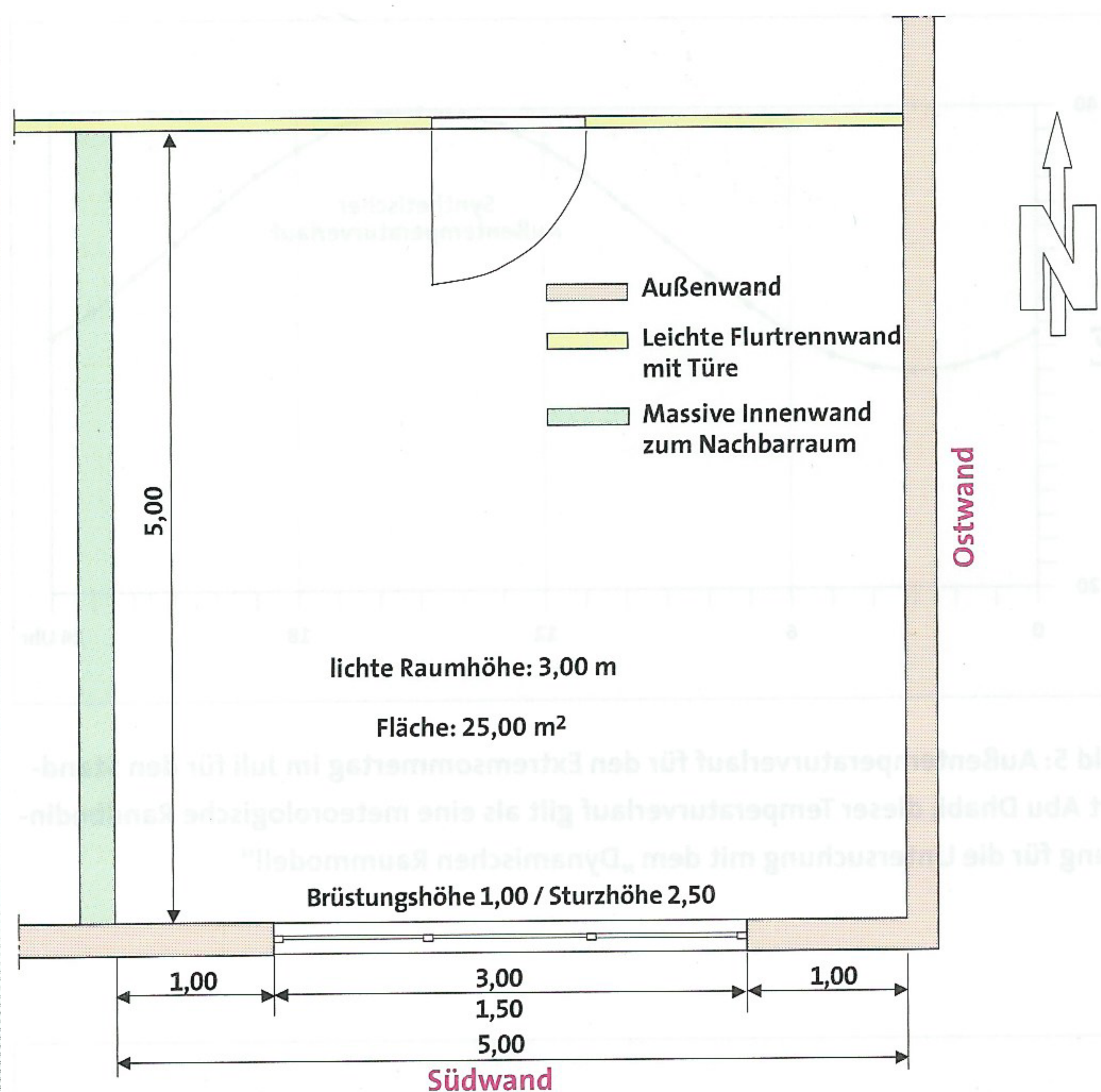


Bild 2: Grundriss eines Büroraumes mit quadratischem Grundriss, der als Grundlage für die Modellierung und die Simulationsrechnungen dient (Maße in m)

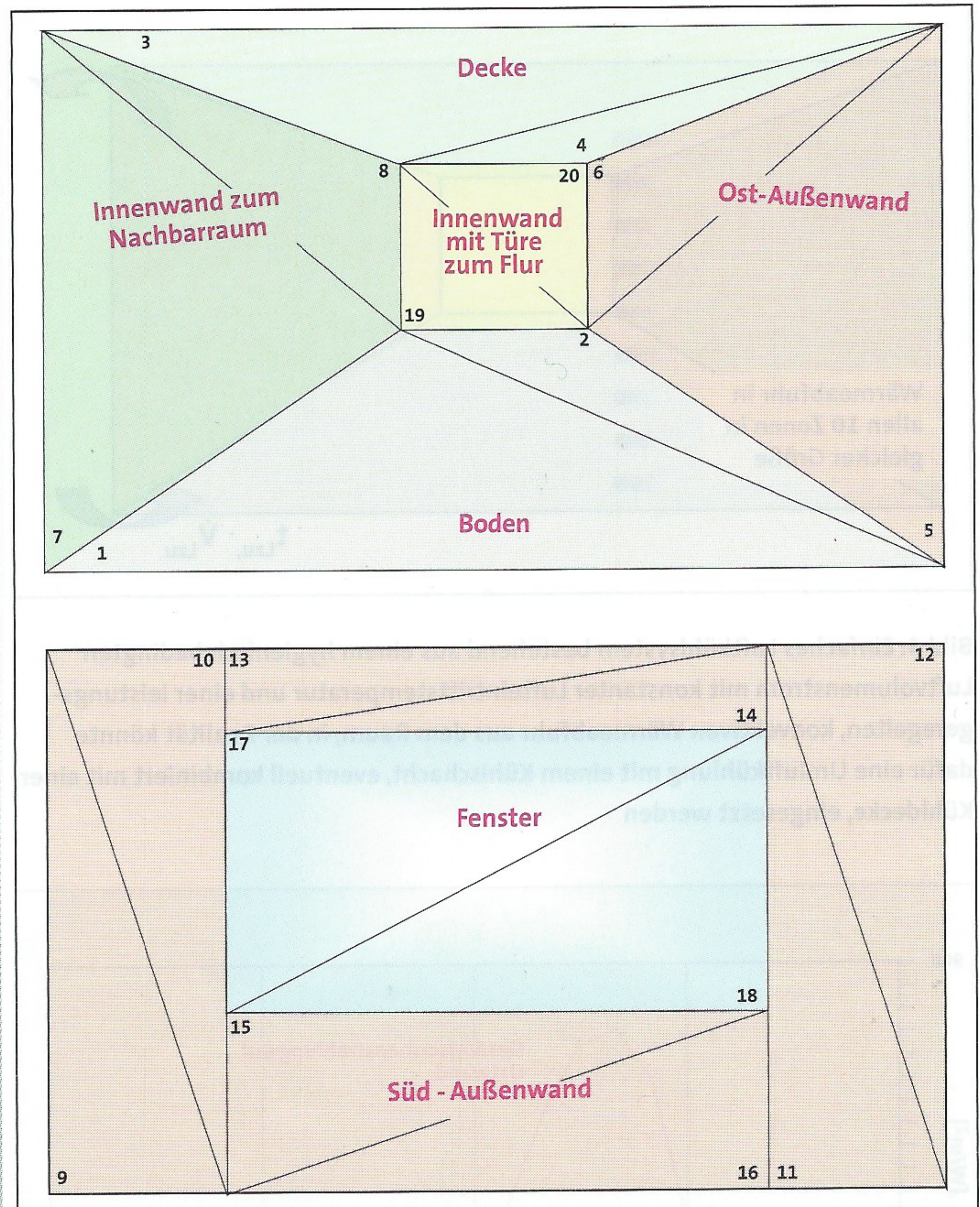


Bild 3: Raumgeometrie als Grundlage der Simulation für unterschiedliche Außenwandbauweisen: der Raum stellt das Büro in dem dreigeschossigen Gebäude (Bilder 1 und 2) mit einer opaken Ostwand und einer Südwand mit Fenster dar; jede Rechteckfläche besteht gemäß den Anforderungen des Simulationsmodells aus zwei Dreiecken

werden die Untersuchungen für ein in allen Fällen gleichbleibendes Klimatisierungssystem durchgeführt. Mittels eines Qualluftsystems erfolgt die hygienisch bedingte Zuluftzufuhr (gekühlte und entfeuchtete Außenluft) mit konstanter Temperatur in den Raum. Zur Leistungsregelung wird für die restliche Kühlung eine konvektive Wärmesenke, die über die Raumhöhe gleichverteilt wirkt, vorgesehen (Bild 4).

Definition eines Designdays für die meteorologischen Randbedingungen

Um die wärmetechnischen Eigenschaften der zu untersuchenden Gebäude zu demonstrieren, können Entwurfstage definiert werden. Im vorliegenden Fall wurde ein Extremsommertag im Juli festgelegt und für die Untersuchung bereitgestellt. Aus den sommerlichen Lufttemperaturen für den Airport Bateen (Abu Dhabi) folgt für die Durchschnittstemperaturen im Juli mit maximal 40 °C und minimal 29 °C unter der idealen Annahme einer cos-Schwingung mit dem Maximum um 15.00 Uhr der Lufttemperaturgang gemäß Bild 5. Grundlage für die Gesamtsonnenstrahlung bilden die Verläufe am 15. Juli am Standort Abu Dhabi für 24,5° nördlicher Breite und einem Trübungsfaktor $T_L = 4,0$. Der Gang der Sonnenstrahlung wurde für nach Osten und

Süden orientierte Wände in Abhängigkeit der Ortszeit untersucht. Die Verläufe sind im Bild 6 dargestellt.

Spezielle Randbedingungen für die Simulation

Für den Leistungsverlauf der inneren Wärmequellen wird eine maximale Besetzung mit zwei Personen und eine übliche Büroausstattung angenommen. Dieser Wärmeeintrag (Bild 7) sei im Sinne des „Dynamischen Raummodells“ standortlos und rein konvektiv wirkend. Bei verfeinerter Betrachtung müsste eine exakte Möblierung zugrunde gelegt werden.

Die solare Gesamtstrahlung setzt sich aus der direkten und diffusen Strahlung zusammen. Aufgrund der geringen nördlichen Breite von Abu Dhabi und dem damit verbundenen hohen Sonnenstand am Mittag erreicht das Fenster in der Südwand nur kurzzeitig eine geringe Direktstrahlung. Die diffuse Strahlung hat den Höchstwert um 12.00 Uhr. Es wird davon ausgegangen, dass trotz der relativ geringen Einstrahlung eine einfache Verschattung – beispielsweise in Form einer Markise – mit dem Minderungsfaktor $F_c = 0,5$ in der Zeit von 9.00 bis 16.00 Uhr wirkt. Die Eingabe ist aus Bild 8 ersichtlich. Der Abminderungsfaktor für den g-Wert infolge des nicht senkrech-

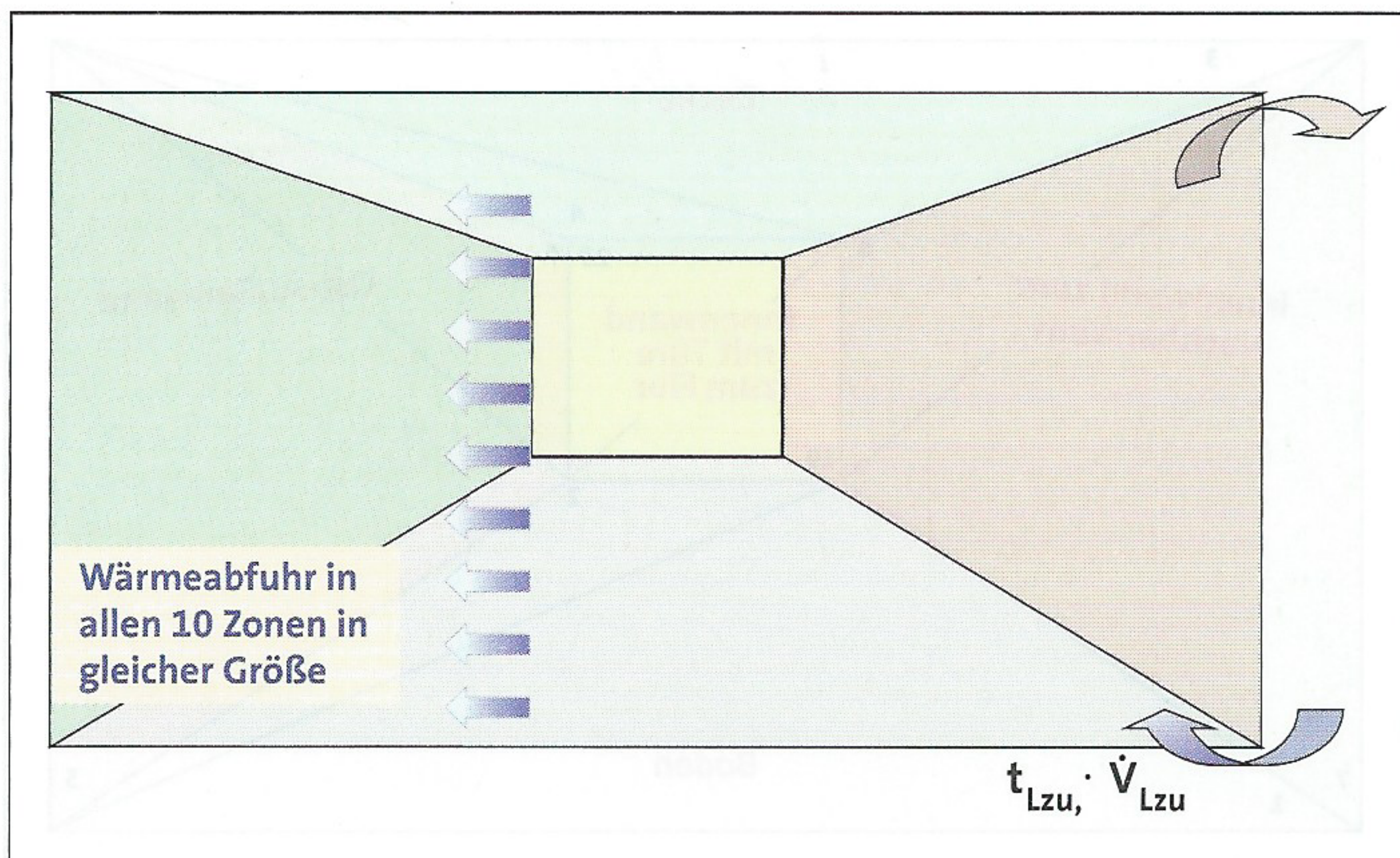


Bild 4: Einfaches Luftkühlsystem bestehend aus einem hygienisch bedingten Luftvolumenstrom mit konstanter Luft Eintrittstemperatur und einer leistungsgeregelten, konvektiven Wärmeabfuhr aus dem Raum; in der Realität könnte dafür eine Umluftkühlung mit einem Kühlschacht, eventuell kombiniert mit einer Kühldecke, eingesetzt werden

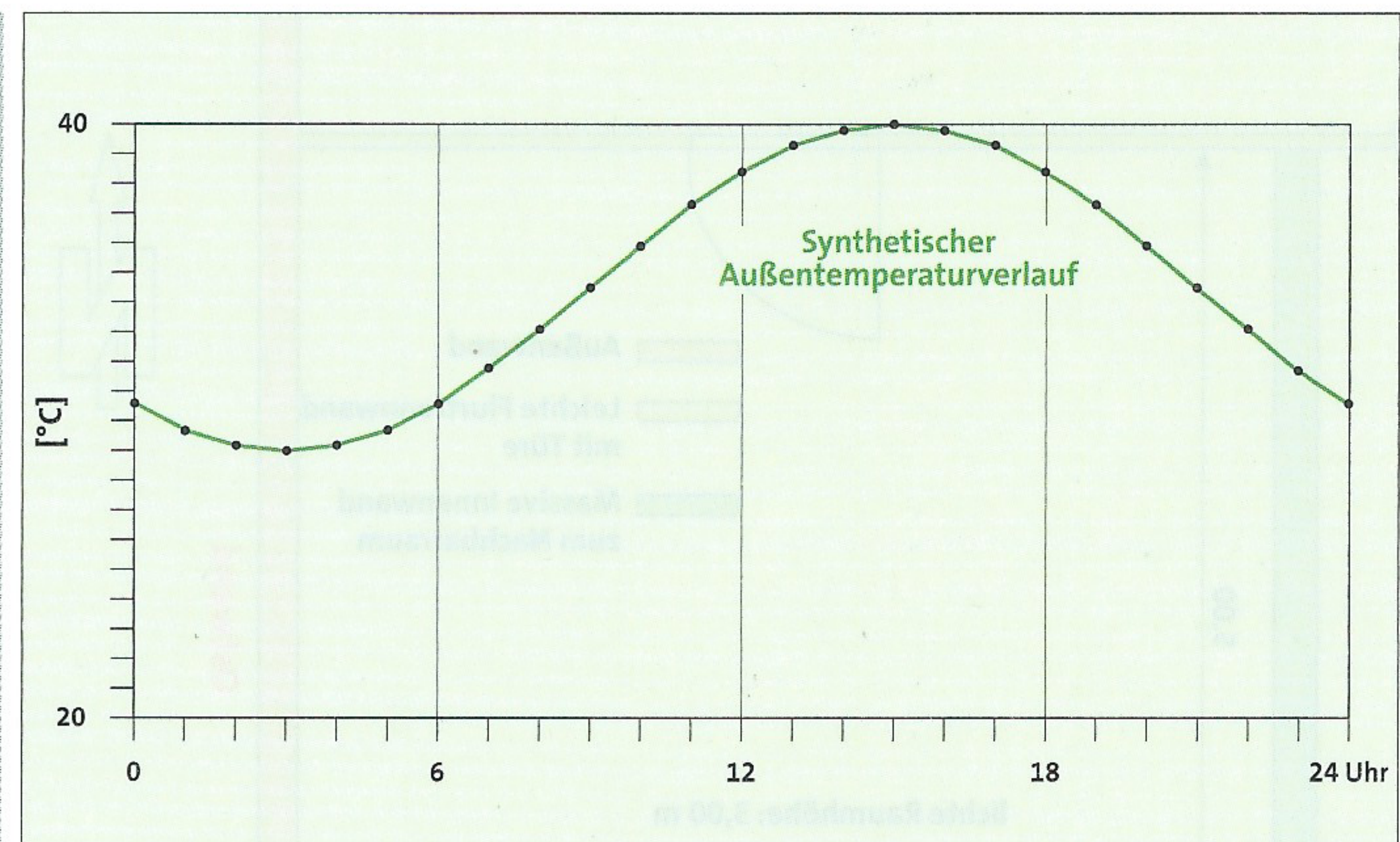


Bild 5: Außentemperaturverlauf für den Extremsommertag im Juli für den Standort Abu Dhabi; dieser Temperaturverlauf gilt als eine meteorologische Randbedingung für die Untersuchung mit dem „Dynamischen Raummodell“

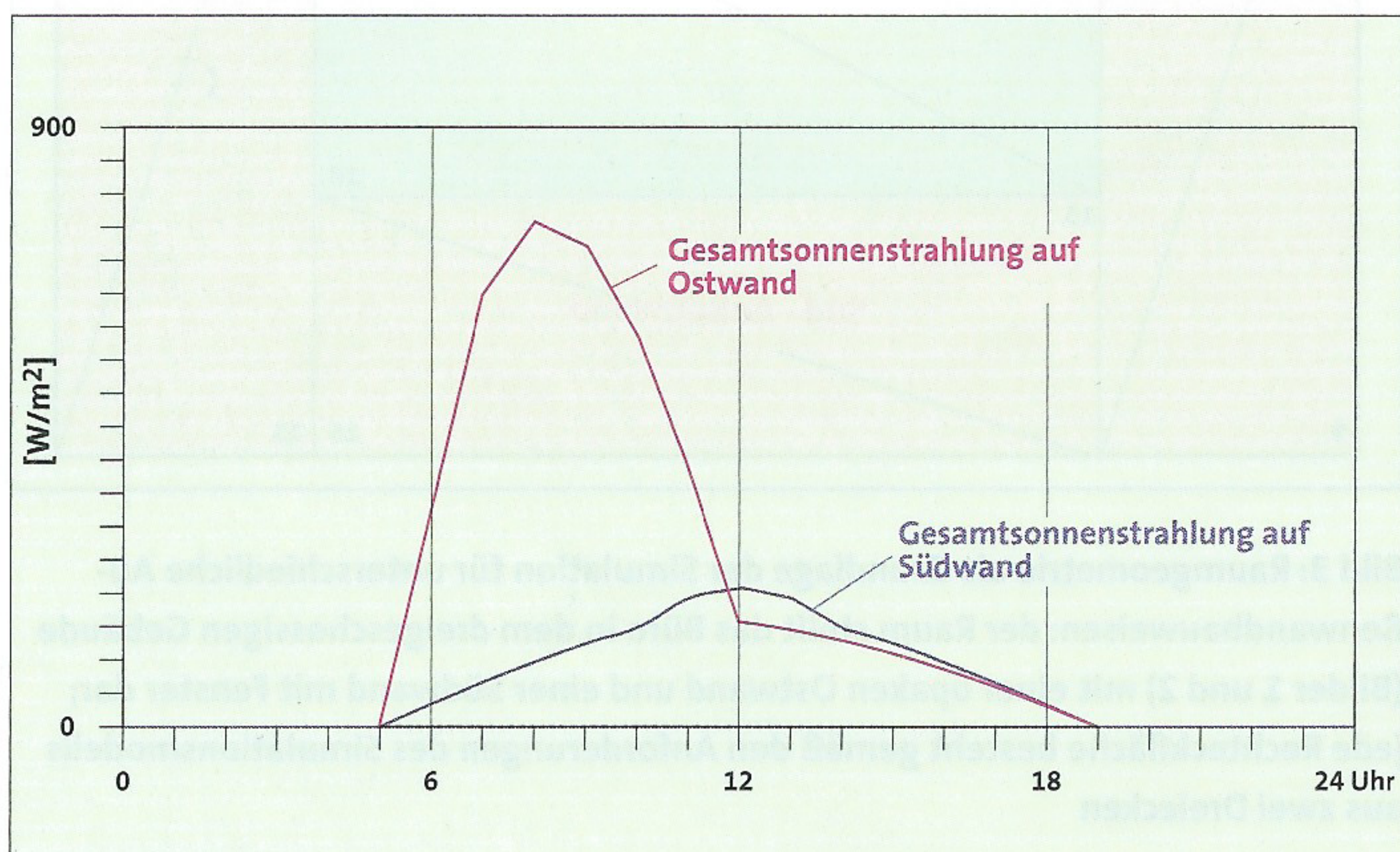


Bild 6: Gesamtsolarstrahlung für den Extremsommertag am 15. Juli für den Standort Abu Dhabi; diese Verläufe der solaren Wärmestromdichten bilden als weitere meteorologische Randbedingungen die Grundlage für die Untersuchung mit dem „Dynamischen Raummodell“

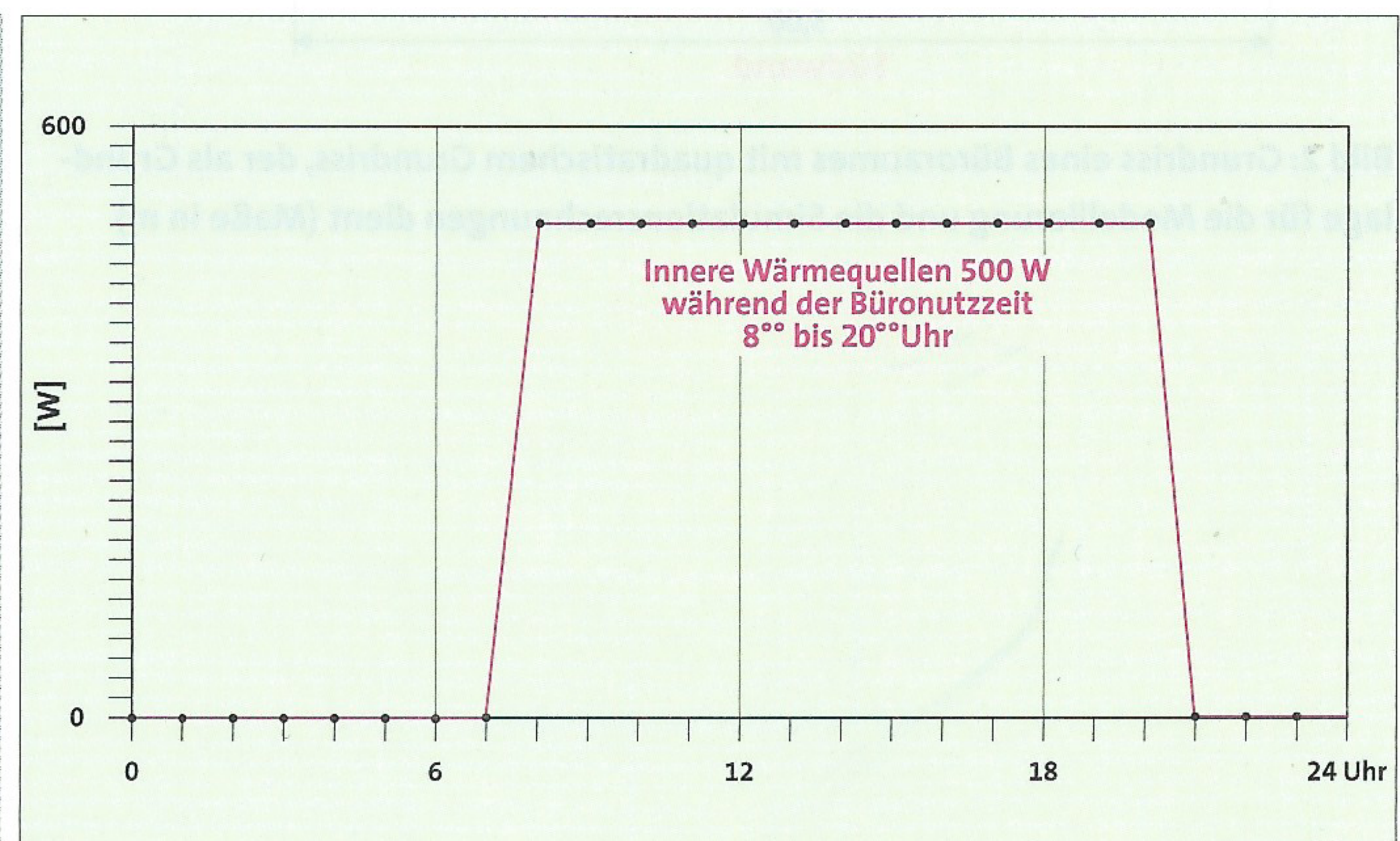


Bild 7: Wärmestrom der inneren Wärmequellen im Büro (Menschen und Maschinen)

ten Strahlungsdurchgangs wird mit $F_w = 0,782$ angenommen.

Im Zeitraum von 7.00 bis 21.00 Uhr wird ein Zuluftvolumenstrom (Außenluftwechsel) von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ angesetzt. Dies entspricht einem Außenluftwechsel von $1,33 \text{ h}^{-1}$. Außerhalb dieser Zeit werde die Anlage mit dem halben Luftvolumenstrom ($50 \text{ m}^3/\text{h}$) betrieben. Die Zulufttemperatur beträgt konstant 21°C , sodass ein Quellsystem einsetzbar ist (Bild 9).

Während der Büronutzung von 8.00 bis 20.00 Uhr muss die Raumtemperatur $\leq 24^\circ\text{C}$ betragen. Außerhalb dieser Zeit darf sie bis auf 27°C ansteigen, wobei anschließend an die Büronutzzeit um 7.00 und um 21.00 Uhr 25°C als Obergrenze gelten. Aus diesen Vorgaben entsteht der im Bild 9 gezeigte Verlauf. Alle genannten Temperaturen gelten somit als Höchstwerte, d. h., eine Unterschreitung wird zugelassen.

Wegen der Lage des Simulationsraumes in der Gebäudemitte (Bild 1) ist davon auszugehen, dass alle Nachbarräume annähernd den gleichen thermischen Randbedingungen unterliegen. Weiterhin dürften auch die Nutzungen der Räume vergleichbar sein. Vereinfacht werden somit alle Nebenraumtemperaturen gleich der jeweils aktuellen Empfindungstemperatur im Simulationsraum gesetzt.

Wenn die Raumtemperatur den jeweiligen Sollwert geringfügig überschreitet, erfolgt eine Konvektionskühlung (Regelungsart = 2 nach Simulationsmodell).

Simulationszeitraum: Beginn 0.00 Uhr; Simulationszeit 89 h (Ende 17.00 Uhr). In der Regel kann bei üblichen Bauten nach drei Simulationstagen (72 h) mit einem eingeschwungenen Zustand gerechnet werden. Als Auswertzeitraum wird der 3. Simulationstag verwendet. Das Simulationsende wurde auf 17.00 Uhr des 4. Simulationstages gelegt, da dann zur kritischen Hauptnutzungszeit die wärme-physiologische Überprüfung anhand der Simulationsergebnisse erfolgen kann. Die Starttemperatur für alle Bauteile mit Speichermaterialien beträgt 24°C .

Die Überprüfung der wärme-physiologischen Bedingungen im Raum geschieht punktuell bezogen auf die über dem Raumgrundriss liegende Prüflasterebene nach Bild 10.

Untersuchte Bauweisen

Kennzeichnend für die Bauweise 1 ist, dass bis auf die Innenwand zum Flur alle übrigen Umfassungen aus Betonhohlblocksteinen gemauert sind. Die Wände sind beiderseits verputzt. Die Decken bestehen aus Ort beton oder aus Betonfertigteilen. Die Fußböden sind mit Marmorplatten gefliest. Die Innenwand zum Flur besteht aus einer Vollgipsplatte. Die Außenwände haben keine zusätzliche Dämmung. Der Aufbau aller Bauelemente wird in Tabelle 1 beschrieben. Hinweise:

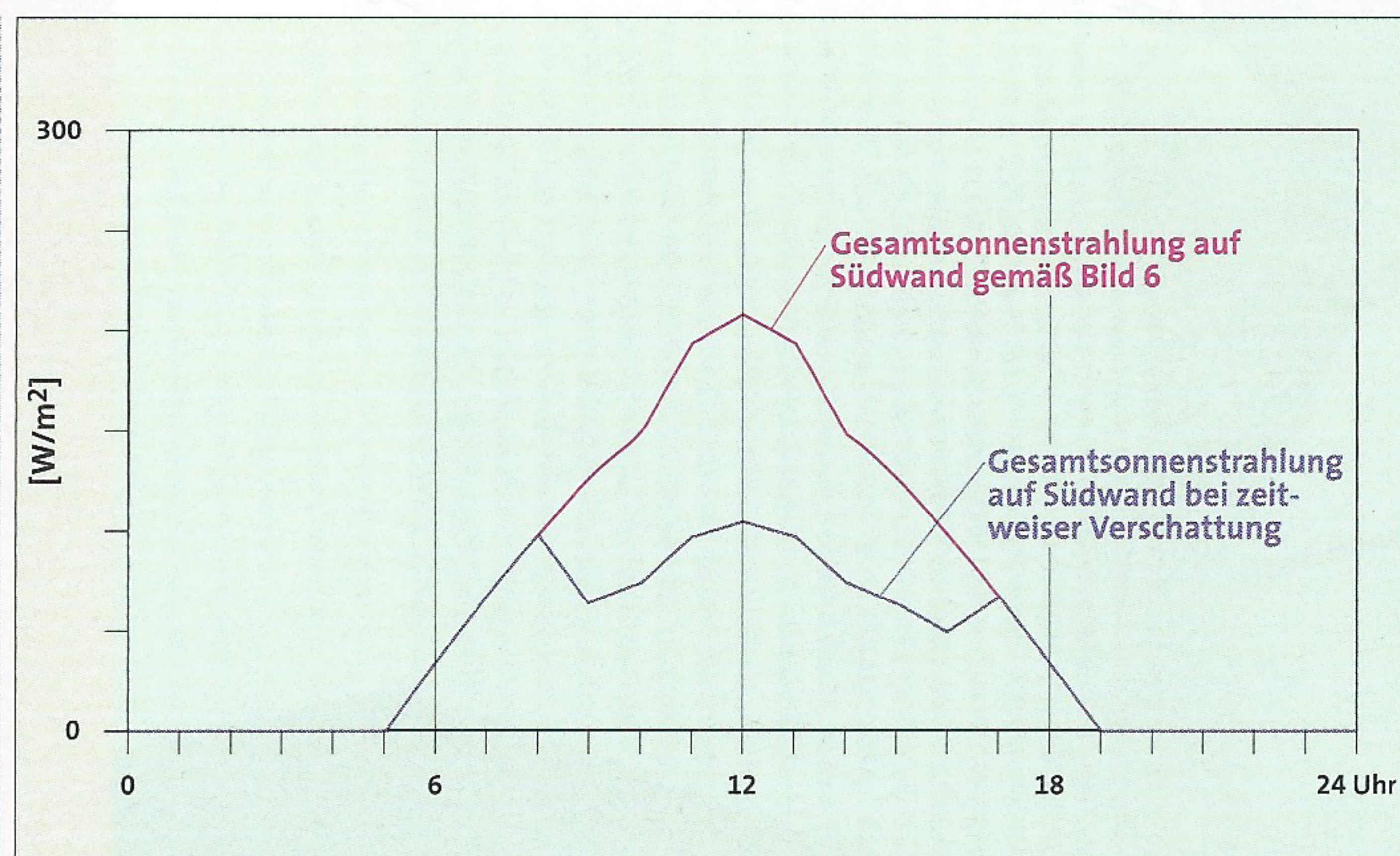


Bild 8: Gesamtsolarstrahlung für den Extremsommertag am 15. Juli für den Standort Abu Dhabi und die durch die Verschattung bewirkte reduzierte Strahlung im Zeitraum von 9.00 bis 16.00 Uhr

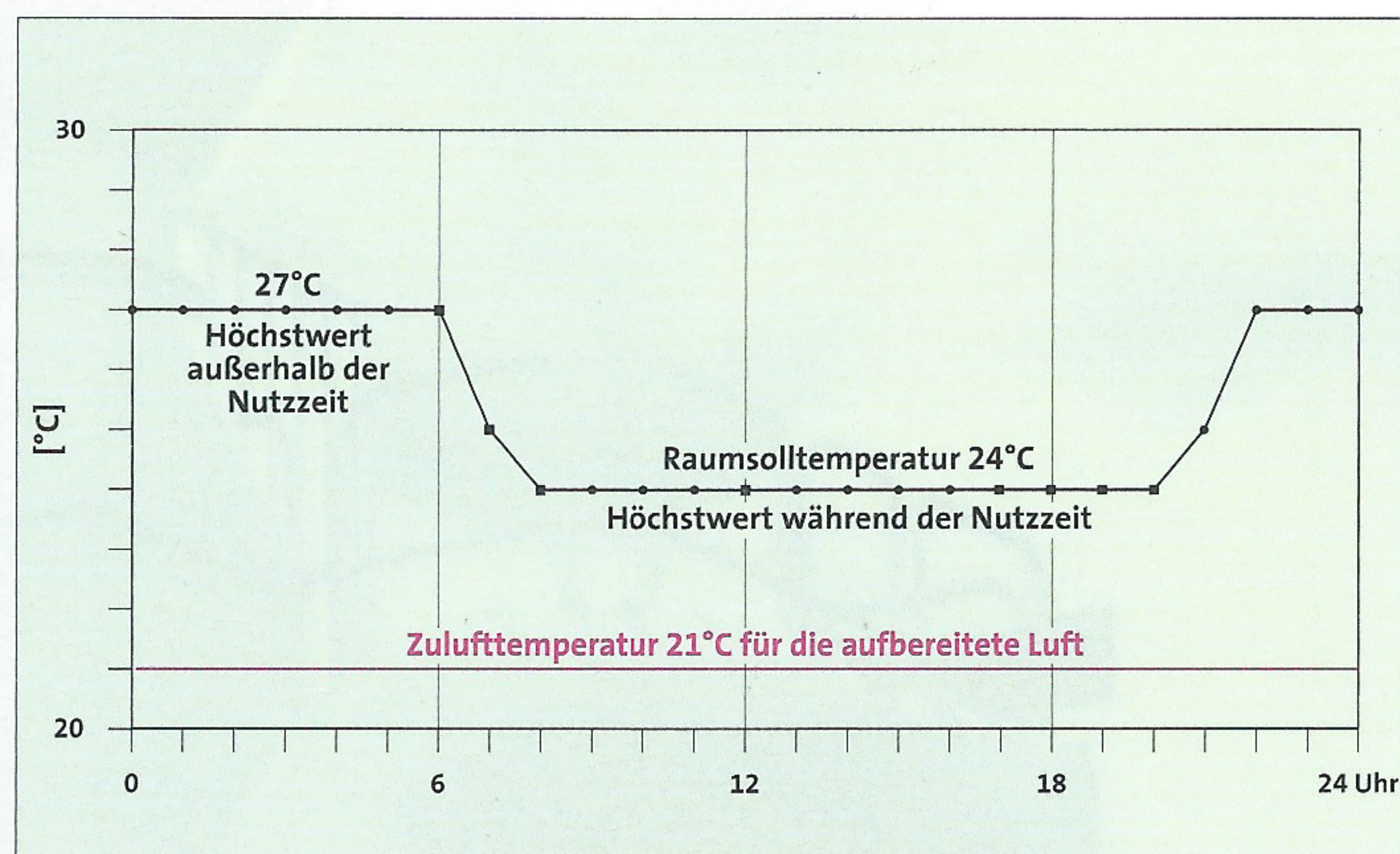


Bild 9: Konstante Zulufttemperatur für den von der Klimaanlage aufbereiteten, hygienisch bedingten Luftvolumenstrom und Vorgabe für die Raumsolltemperatur (Empfindungstemperatur) als Höchstwert über den gesamten Designday

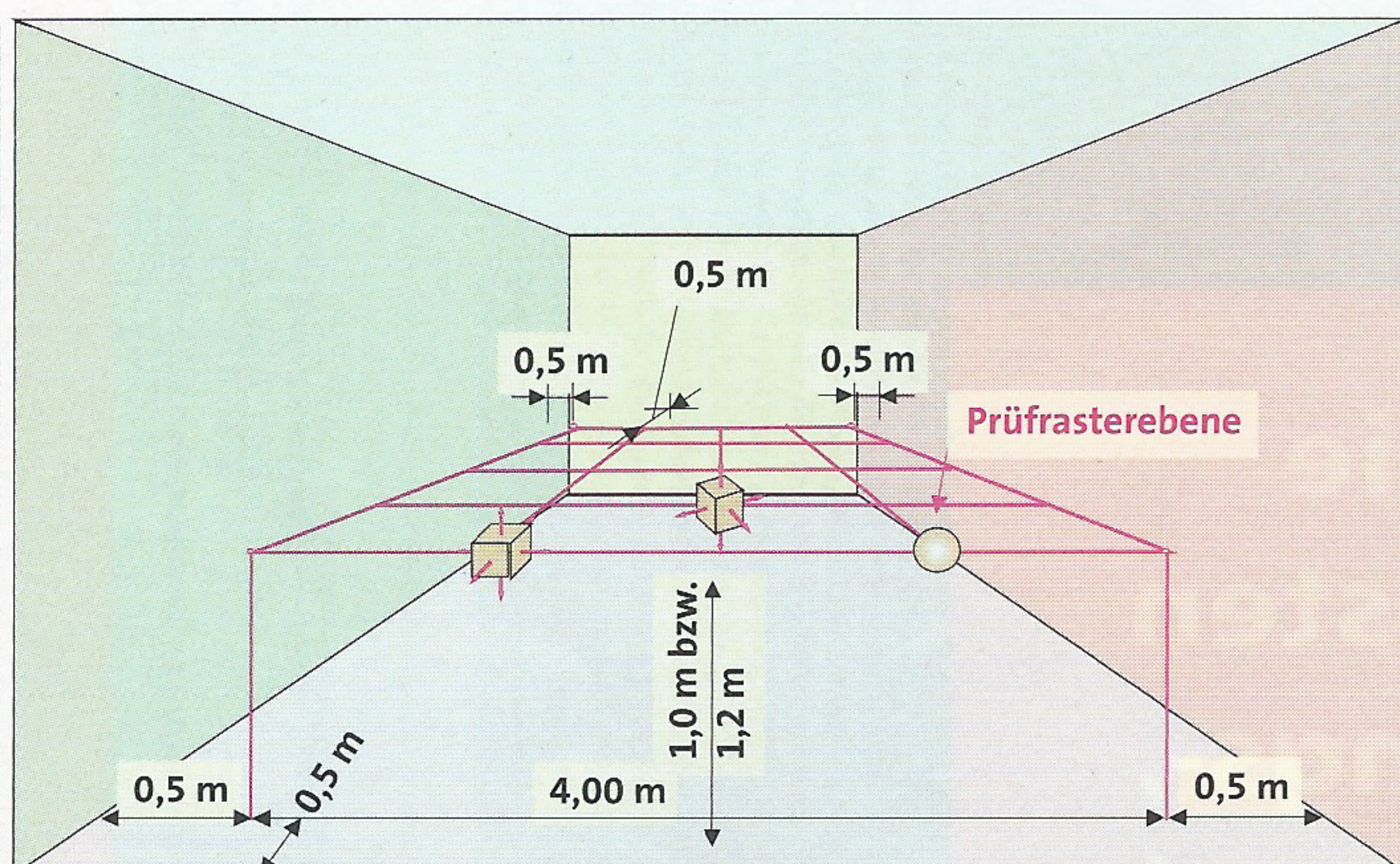


Bild 10: Raum mit virtueller Prüfrasterebene auf der sich in verschiedenen Höhen die Prüfkörper bewegen; die Prüfwürfel in Höhe von 1,2 m dienen zur Ermittlung der Strahlungstemperatur und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie; mit Hilfe der Prüfkugel wird die örtliche Empfindungstemperatur bestimmt (Höhe 1 m)

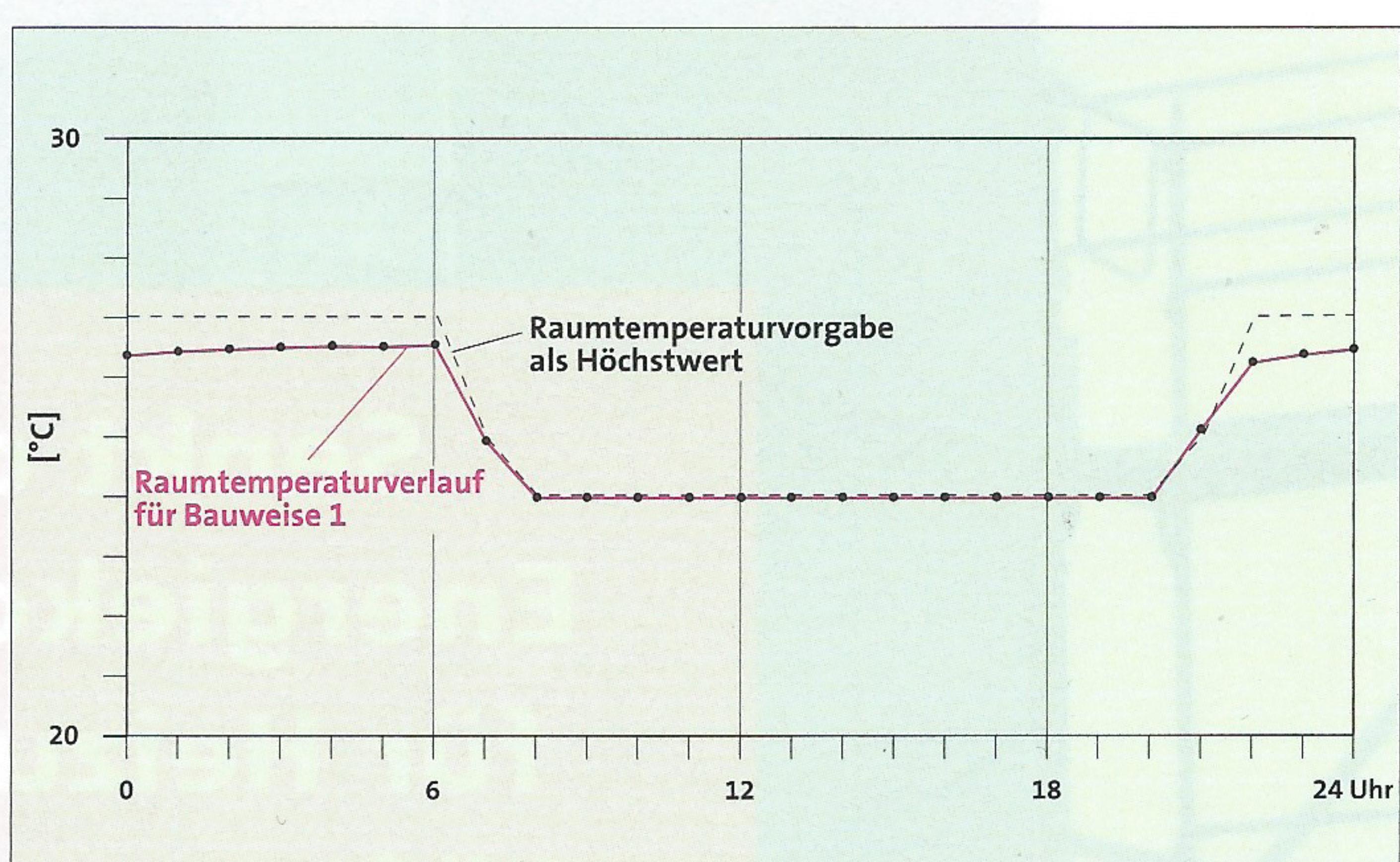


Bild 11: Gegenüberstellung der Raumisttemperatur (Empfindungstemperatur) und dem vorgegebenen Höchstwert bei Bauweise 1

Die Aufzählung der Schichten erfolgt immer von der Raumseite aus. Aneinandergrenzende Schichten mit Materialien annähernd gleicher Stoffwerte werden als eine gemeinsame wärmespeichernde Schicht in Ansatz gebracht. Auf der Bauteilaußenseite ist der Wärmeübergangskoeffizient als Wärmeleitwiderstand $R_a = 1/\alpha_{\text{ausßen}}$ vorzugeben. Auf der Seite zum Raum ist dies nicht erforderlich, da das Simulationsmodell die Strahlung und die Konvektion getrennt – ausgehend von der Oberflächentemperatur – selbsttätig berechnet.

Bei der Bauweise 2 sind die Außenwände mit einer Wärmedämmung von 40 mm PUR-Schaum versehen. Darauf sind 12 mm Kunstharzputz aufgetragen (Tabelle 2).

Kennzeichnend für die Bauweise 3 ist, dass auf der jeweiligen Massivaußenwand eine Mörtelschicht von ca. 15 mm mit einer integrierten Kunststoff-Kapillarrohrmatte aufgebracht wird. Darauf folgt dann eine Wärmedämmung mit 40 mm PUR-Schaum und ein 12 mm dicker Kunstharzputz (Tabelle 3). Als Kapillarrohrmatten werden so genannte G-Matten mit geraden Rohren und Verteilern bzw. Sammlern an den Enden eingesetzt. Das Kapillarrohr hat die Abmessungen $4,3 \times 0,8$ mm, der Rohrabstand beträgt 30 mm. Die Wasserbeaufschlagung erfolgt täglich von 6.00 Uhr bis kurz vor 1.00 Uhr. Die Wassergeschwindigkeit in den Kapillarrohren beträgt 0,1 m/s. Die Wassereintrittstemperatur wird variiert: 27 °C, 24 °C und 21 °C.

Zusammenstellung der Ergebnisse

Das Simulationsmodell liefert eine Fülle von Ergebnissen, die fast alle sehr aufschlussreich sind, deren Darstellung aber den Veröffentlichungsrahmen sprengen würde. Deshalb wird sich auf einige Einzeldarstellungen beschränkt und verstärkt eine vergleichende Betrachtung durchgeführt.

Einzelaussagen

Die vorgegebene Raumsolltemperatur von tags 24 °C wird stets korrekt eingehalten, wie die Extremvarianten (Bilder 11 und 12) bestätigen. Den nachts zulässigen Höchstwert von 27 °C erreicht der Raum auch bei der Bauweise 1 nie, da die nächtliche Kühlung durch die Zuluft ($50 \text{ m}^3/\text{h}$ bei der Zulufttemperatur von 21 °C) und eine wirksame Wärmeaufnahme durch die tags abgekühlten Massivwände erfolgt.

Der Maximalwert beträgt 26,6 °C. Bei Bauweise 3 und der Wassereintrittstemperatur von 21 °C ergibt sich nachts eine weitere Besonderheit, indem die Raumtemperatur unter dem Sollwert am Tage liegt. Sie beträgt im Minimum 23,3 °C. Dies wird durch die intensive Außenwandkühlung bewirkt. Die Raumisttemperaturen der übrigen Varianten liegen zwischen den in den Bildern dargestellten Verläufen.

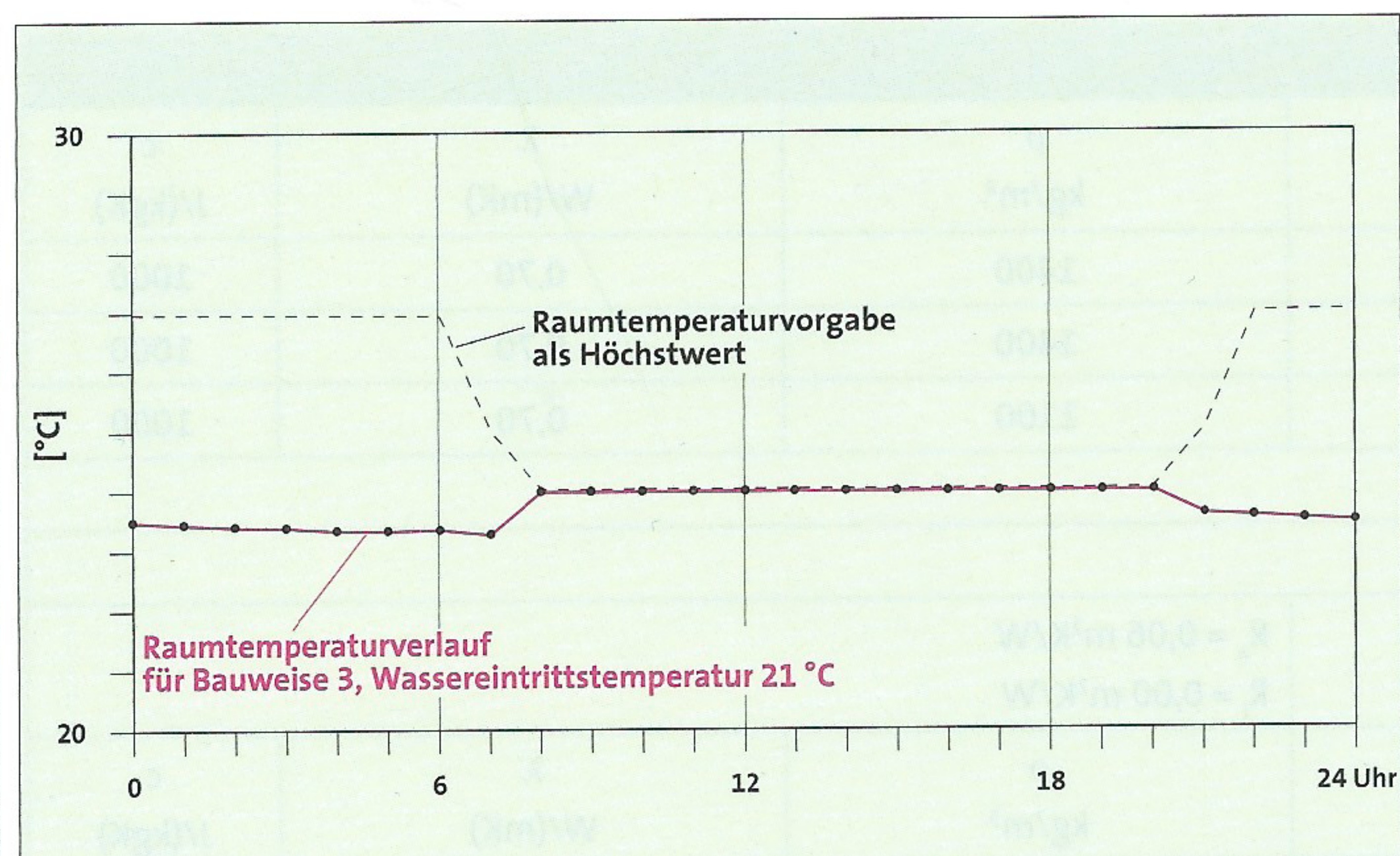


Bild 12: Gegenüberstellung der Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) und dem vorgegebenen Höchstwert bei Bauweise 3 und der niedrigsten Wassereintrittstemperatur von 21 °C

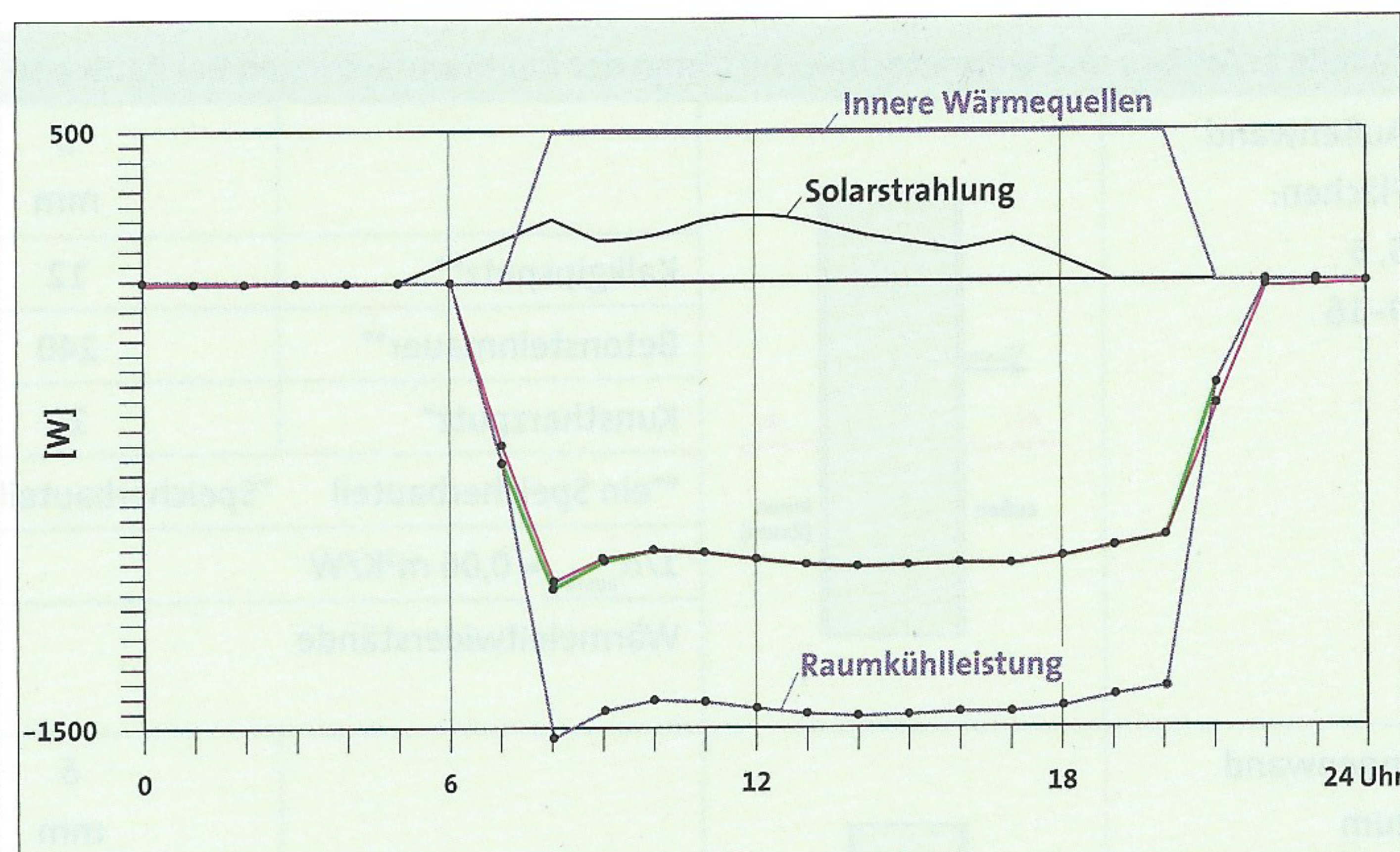


Bild 13: Wärmestromverläufe (negative Werte sind Kühlleistungen) für Bauweise 1 aus denen die erforderliche Raumkühlleistung folgt, um die geforderte Raumtemperatur einzuhalten (Die nicht bezeichneten Verläufe stellen spezielle Programmkontrollen dar)

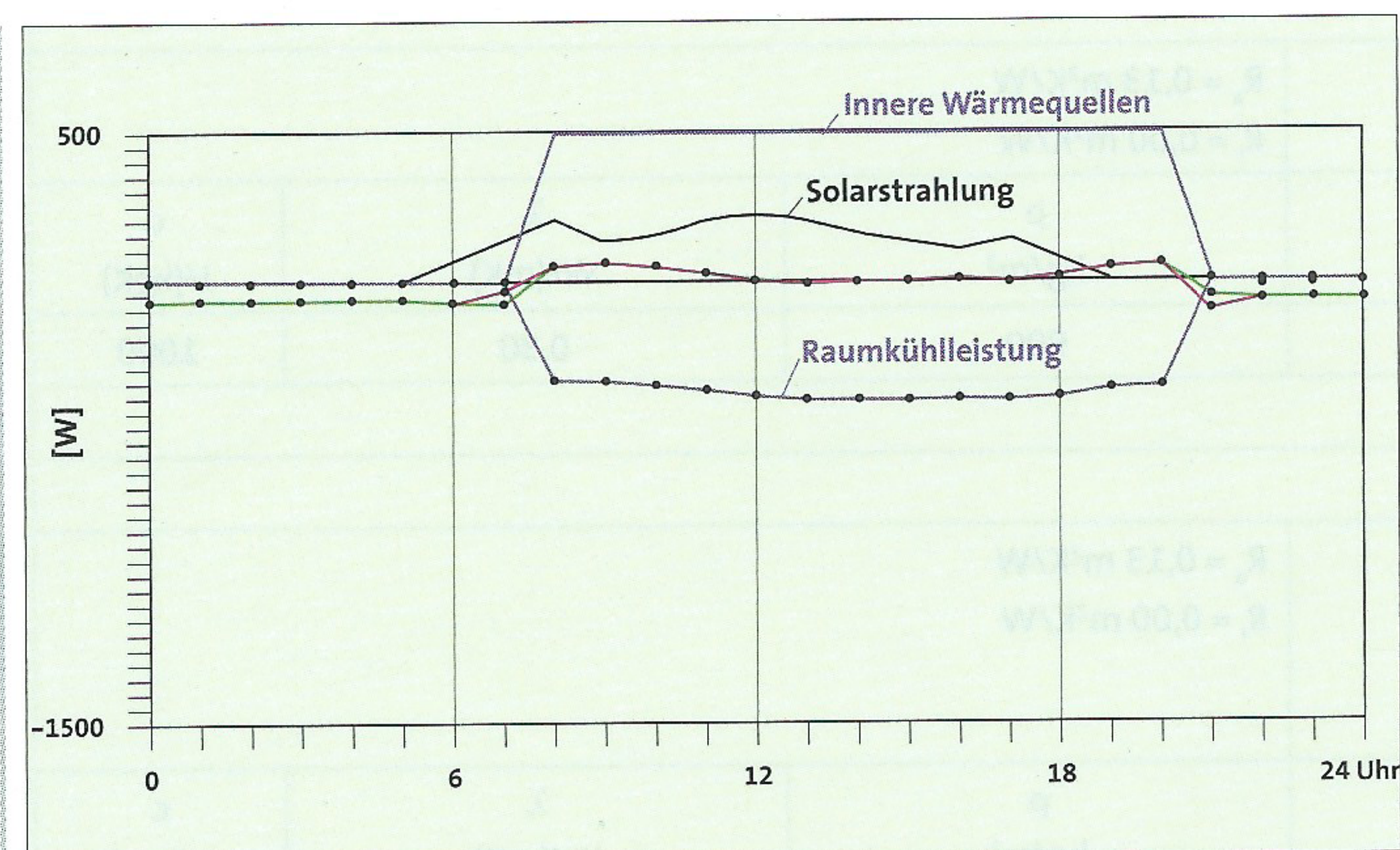


Bild 14: Wärmestromverläufe (negative Werte sind Kühlleistungen) für Bauweise 3 und die Wassereintrittstemperatur von 21 °C

Die erforderliche Raumkühlleistung ist bei Bauweise 3 und der Wassereintrittstemperatur von 21 °C gegenüber Bauweise 1 extrem reduziert. Sie beträgt nur etwa ein Viertel, wie die Bilder 13 und 14 zeigen.

Ergebnisvergleiche

Der Ergebnisvergleich für alle vorgestellten Varianten ist in Tabelle 4 in komprimierter Form dargestellt. Die Einzelsummanden sind im Bild 15 veranschaulicht. Es gelten die Aussagen:

- Der solare Wärmestrom in den Raum ist für alle Varianten identisch, da stets die gleiche Verschattung gewählt wurde.
- Der Transmissionswärmestrom durch das Fenster steigt mit sinkender Raumtemperatur an. Hierbei ist die mittlere Raumtemperatur über 24 h zu betrachten. Da die Raumtemperatur während der Büronutzzeit stets mit 24 °C korrekt eingehalten wird, ist somit die nächtliche Raumtemperatur bedeutungsvoll. Sie sinkt mit steigender Variantennummer.
- Der Wärmestrom von den inneren Wärmequellen an den Raum ist selbstverständlich auch bei allen Varianten gleich.
- Die Wärmeströme von den Nachbarräumen an den Simulationsraum bleiben in erster Näherung unbeachtet, da deren Temperaturen stets gleich der Temperatur im Simulationsraum gesetzt werden. In der

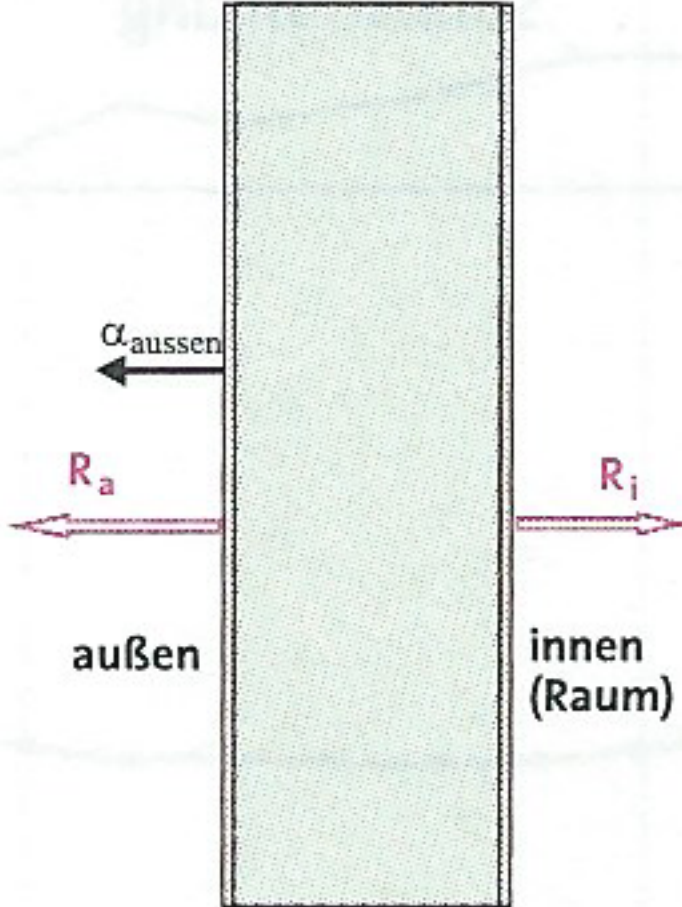
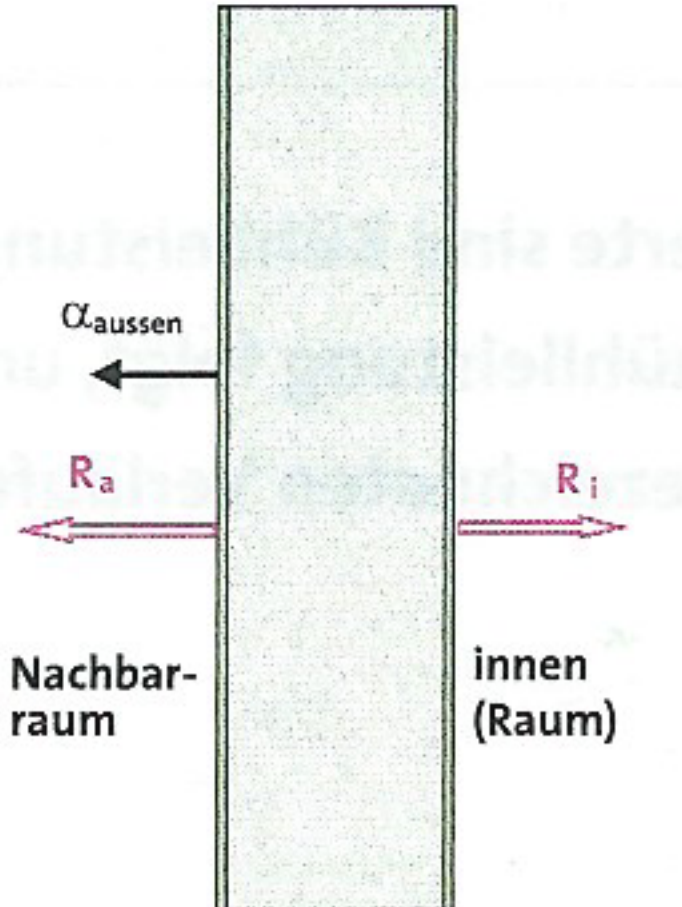
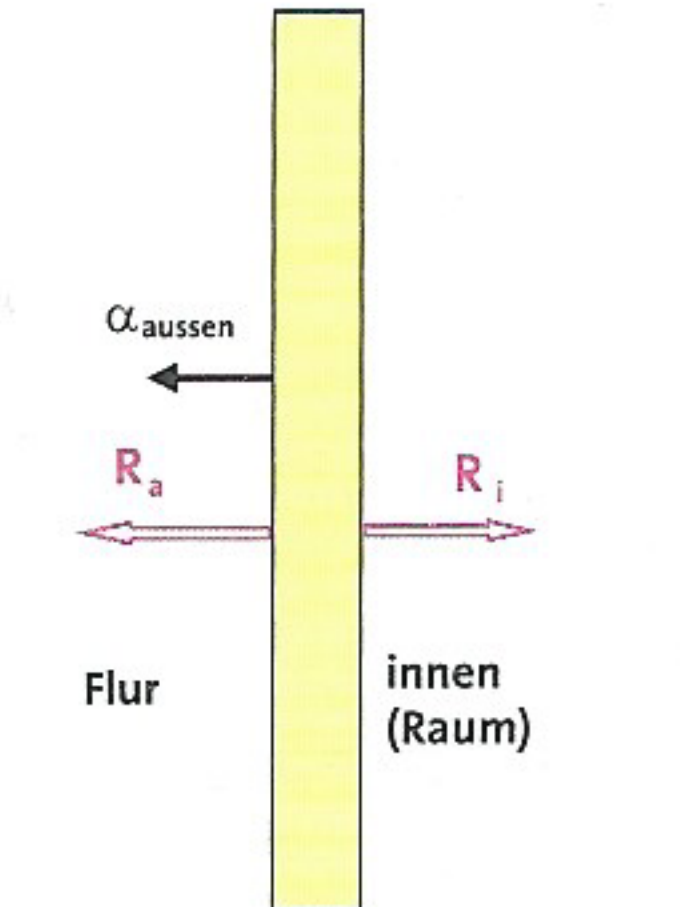
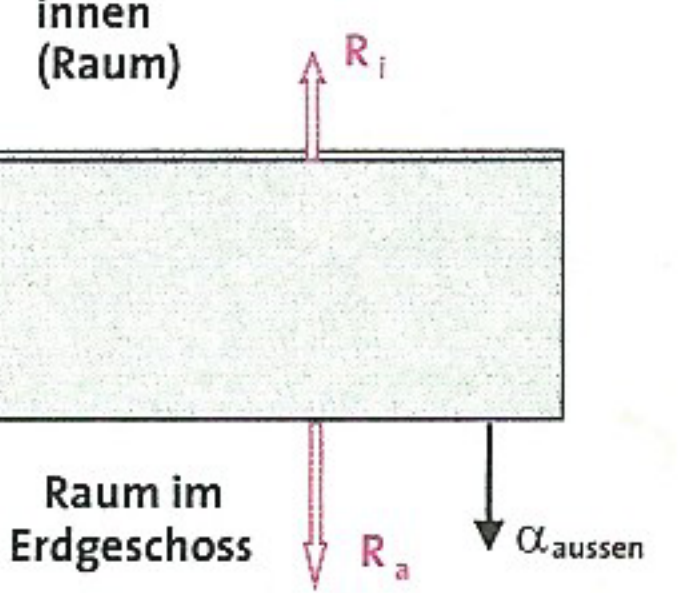
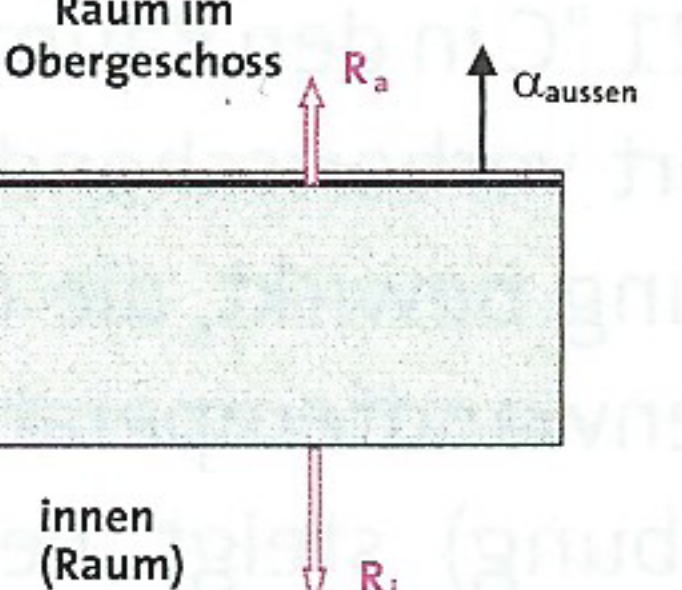
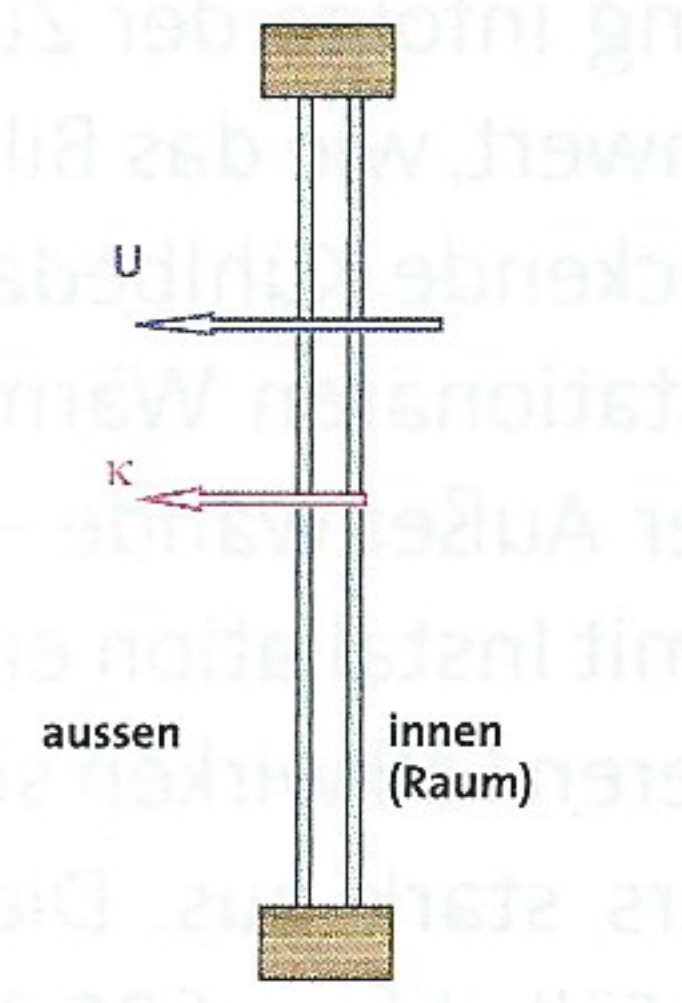
Realität treten jedoch aufgrund der Wärmespeicherung in den Umfassungen unterschiedliche Entladungen auf.

Die Zuluft, die tags 100 m³/h und nachts 50 m³/h beträgt, tritt beispielsweise als Quellluft stets mit 21 °C in den Raum ein und verlässt diesen unter der Decke mit der dort vorherrschenden Lufttemperatur. Dadurch wird eine Raumkühlung bewirkt, die etwas variantenabhängig ist. Mit niedrigerer Außenwandtemperatur (= niedrigerer Strahlungstemperatur der Umgebung) steigt bei gleicher Empfindungstemperatur die Lufttemperatur an und die Kühlleistung nimmt zu.

Bilanziert man die Wärmeeinträge infolge innerer Wärmequellen, solarer Einstrahlung sowie Transmission durch das Fenster und vermindert diese um die Raumkühlung infolge der Zuluft, erhält man einen nahezu konstanten Summenwert, wie das Bild 16 zeigt.

Der durch die Raumkühlung zu deckende Kühlbedarf hängt zusätzlich in starkem Maße von der instationären Wärmeleitung in den Massivbauteilen – vornehmlich der Außenwände – ab. Er sinkt mit Anbringung einer Dämmung und mit Installation einer Außenwandkühlung sehr drastisch ab. Im letzteren Fall wirken sich niedrige Wassereintrittstemperaturen besonders stark aus. Die Reduzierungen gehen bezüglich der untersuchten Fälle bis auf 25 % des Ursprungsbedarfs (Tabelle 4) zurück.

Tabelle 1: Aufbau und wärmetechnische Daten der Raumumfassungen bei Bauweise 1

Außenwand Flächen: 5, 6 9-16			δ mm	ρ kg/m ³	λ W/(mK)	c J/(kgK)
		Kalkgipsputz**	12	1400	0,70	1000
		Betonsteinmauer**	240	1400	0,70	1000
		Kunstharzputz*	12	1100	0,70	1000
		**ein Speicherbauteil *Speicherbauteil				
		$1/\alpha_{\text{aussen}} = 0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$ Wärmeleitwiderstände $R_a = 0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_i = 0,00 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Innenwand zum Nachbarraum Flächen 7, 8			δ mm	ρ kg/m ³	λ W/(mK)	c J/(kgK)
		Kalkgipsputz**	12	1400	0,70	1000
		Betonsteinmauer**	200	1400	0,70	1000
		Kalkgipsputz**	12	1400	0,70	1000
		**ein Speicherbauteil				
		$1/\alpha_{\text{aussen}} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ Wärmeleitwiderstände $R_a = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_i = 0,00 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Innenwand zum Flur Flächen: 19, 20 (Türe sei näherungsweise pauschal integriert)			δ mm	ρ kg/m ³	λ W/(mK)	c J/(kgK)
		Vollgipsplatte*	80	900	0,30	1000
		*Speicherbauteil				
		$1/\alpha_{\text{aussen}} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$				
		Wärmeleitwiderstände $R_a = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_i = 0,00 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Boden Flächen: 1,2			δ mm	ρ kg/m ³	λ W/(mK)	c J/(kgK)
		Marmorfliesen**	20	2200	2,10	1000
		Betonfertigteil**	200	2200	2,10	1000
		**ein Speicherbauteil				
		$1/\alpha_{\text{aussen}} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ Näherung (kleinster Wert)!				
		Wärmeleitwiderstände $R_a = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_i = 0,00 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Decke Flächen: 3, 4			δ mm	ρ kg/m ³	λ W/(mK)	c J/(kgK)
		Betonfertigteil**	200	2200	2,10	1000
		Marmorfliesen**	20	2200	2,10	1000
		**ein Speicherbauteil				
		$1/\alpha_{\text{aussen}} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ Näherung (kleinster Wert)!				
		Wärmeleitwiderstände $R_a = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_i = 0,00 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Fenster Flächen: 17, 18			U W/(m ² K)	κ W/(m ² K)	g —	FFS —
		Zweischeiben Isolierverglasung	1,43	1,76	0,75	0,80
		κ Teilwärmehdurgangskoeffizient ohne inneren Wärmeübergangskoeffizienten g Gesamtenergiedurchlassgrad $FFS = F_f \times F_s$ Abminderungsfaktor durch Fensterrahmen F_f und bauliche Vorsprünge F_s)				

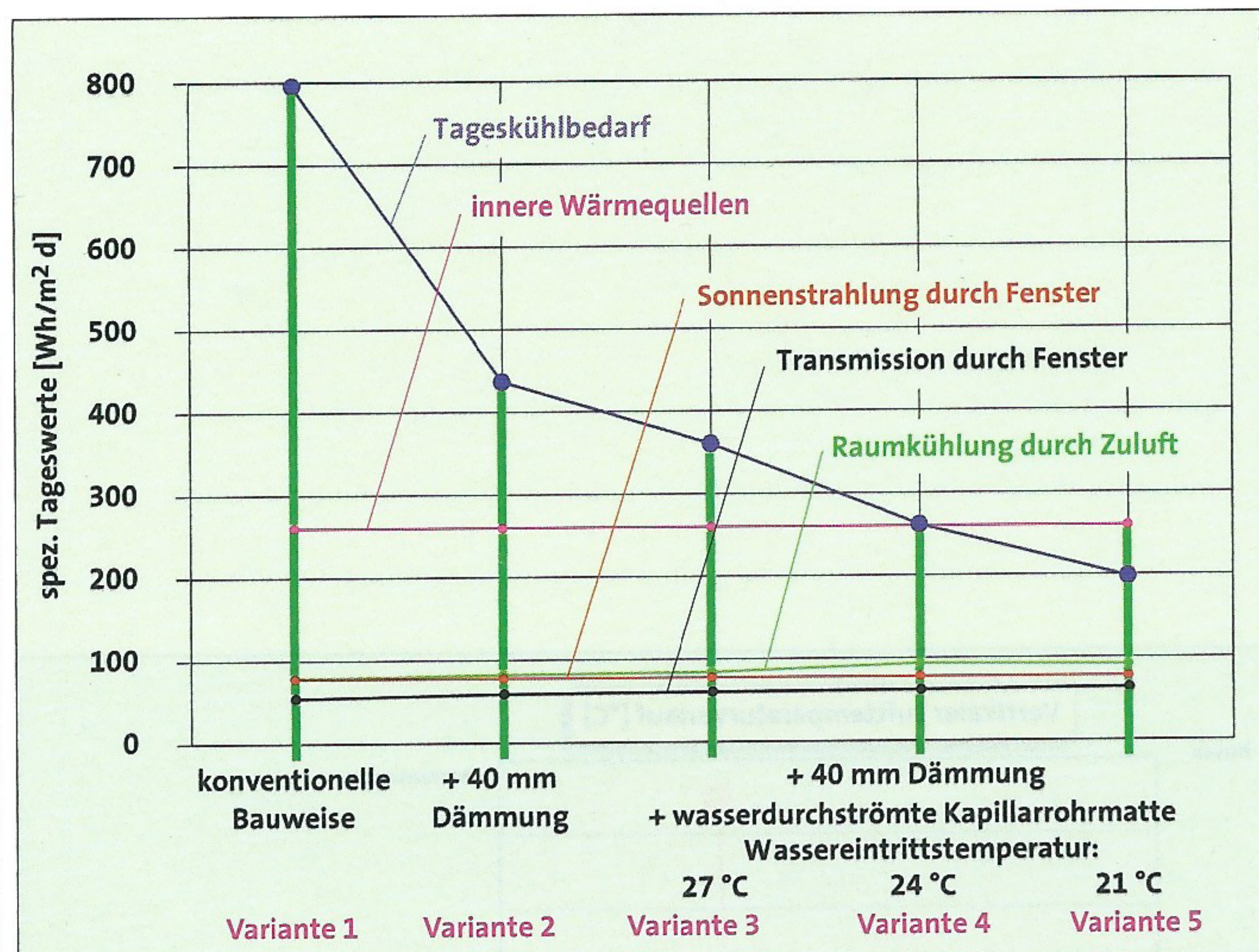


Bild 15: Visualisierung der in Tabelle 4 vorgestellten Teilergebnisse (Wärmeeinträge und Kühlbedarf) summiert über 24 h und bezogen auf die Raumgrundfläche

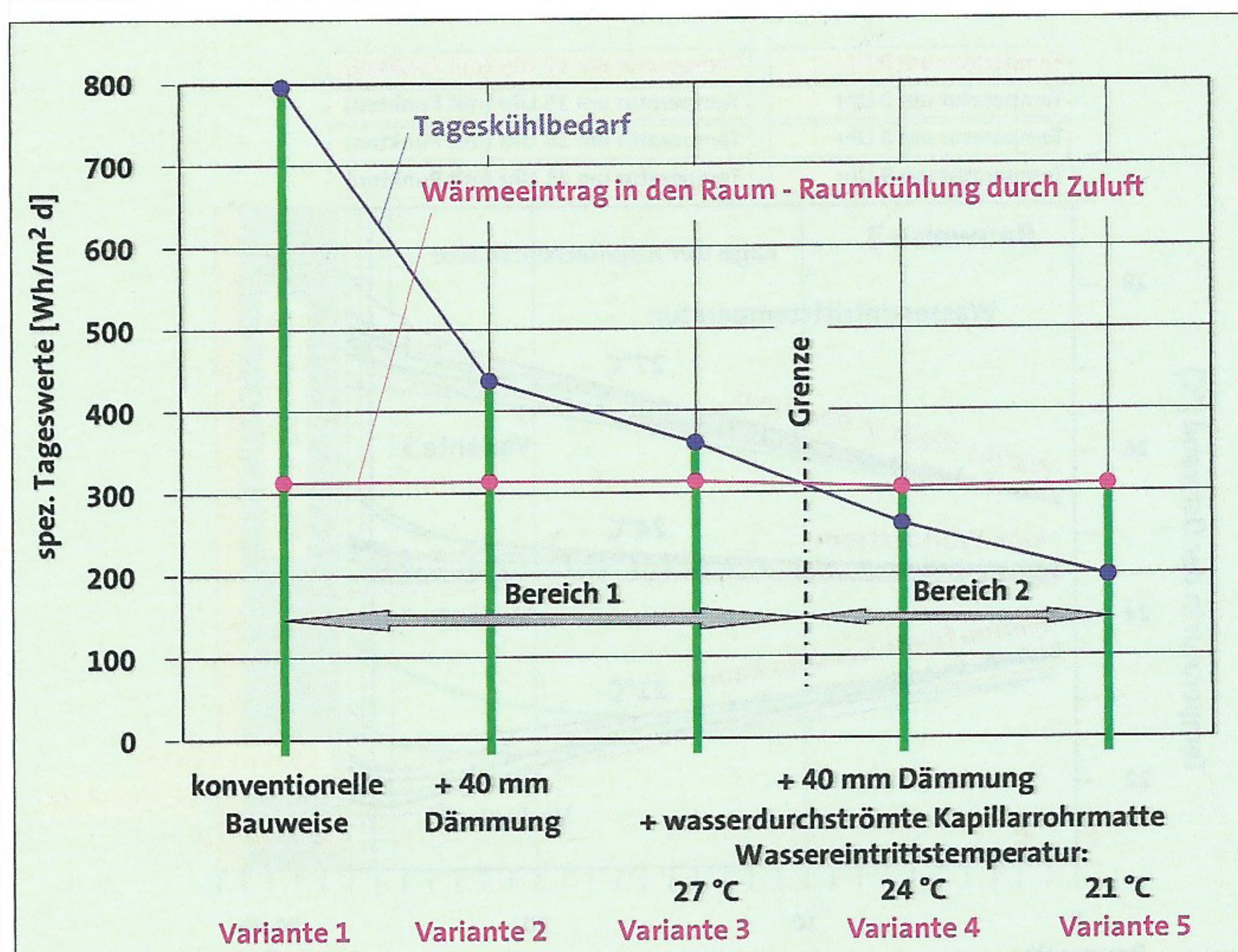


Bild 16: Gegenüberstellung des Wärmeeintrags (Addition der Summanden aus Bild 15) minus der betriebsbedingten Zuluftkühlung und des erforderlichen Raumkühlbedarfs; alle Werte sind über 24 h summiert und auf die Raumgrundfläche bezogen

Fazit

- Generell ist die Reduzierung des Tageskühlbedarfs sehr positiv zu bewerten, wenn dafür Wärmesenken aus der Umwelt genutzt werden können. Als Wärmesenken sind beispielsweise verfügbar: Meerwasser aus einer bestimmten Tiefe unter dem Wasserspiegel, Brunnenwasser in Form von Uferfiltrat und/oder Rücklaufwasser von Fernkältenetzen, die zunehmend entstehen. Je nach Nutzung könnten z. B. die in der Simulation verwendeten Wassereintrittstemperaturen von 27 bis 21 °C erreicht werden.
- Die Zielstellung der Außenwandkühlung besteht darin, den Wärmestrom durch die opake Außenwand möglichst vollständig zu kompensieren. Bild 16 zeigt in einer sehr groben Übersicht, dass im Bereich 1 die durch die Außenwand eingedrungene Wärme ganz oder teilweise durch die Raumkühlung kompensiert wird. Im Bereich 2 übernimmt die in der Außenwand integrierte wasserdurchströmte Kapillarrohrmatte die völlige Kompensation des äußeren Wärmeeintrags und bewirkt sogar eine teilweise Raumkühlung. Näherungsweise kann man an der eingetragenen Grenze die angestrebte Zielstellung – die Kompensation des äußeren Wärmeeintrags – als ideale Verwirklichung ansehen. Somit ist der Einsatz der Variante 4 empfehlenswert.
- Diese Einsatzempfehlung lässt sich auch direkt aus den unterschiedlichen Temperaturverläufen in der Außenwand ablesen. Dies zeigt

der im Bild 17 oben erfolgte Zusammenschnitt von verschiedenen Detailaussagen.

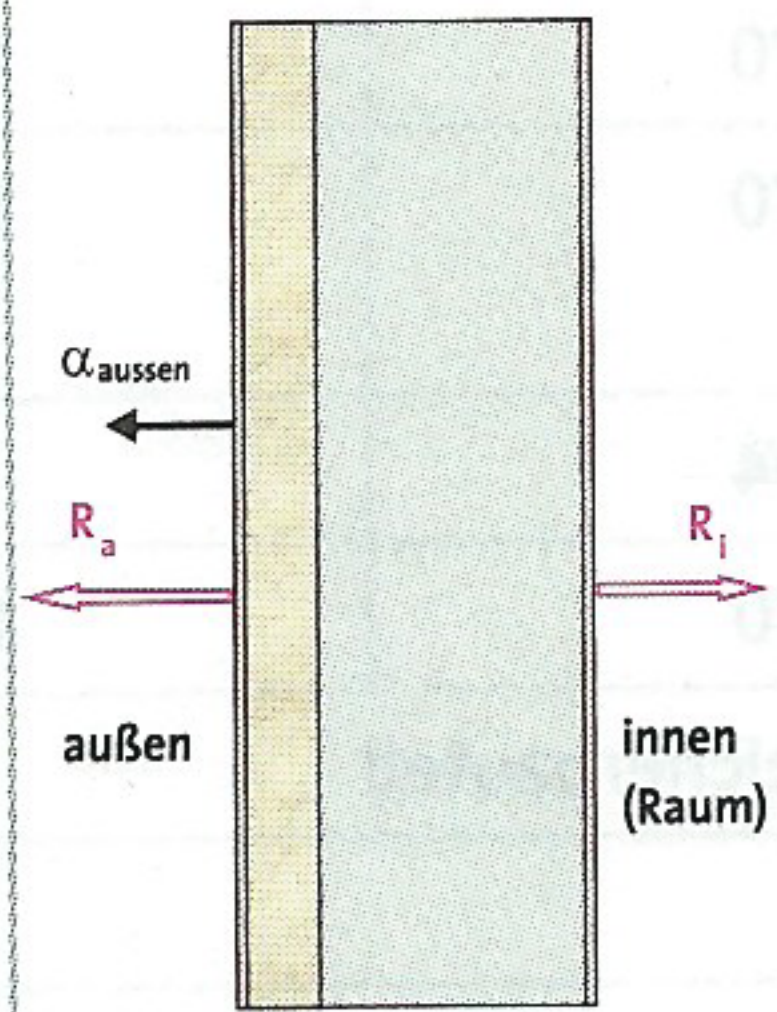
Liegt die Wassertemperatur über der Raumtemperatur (z. B. 27 °C, Variante 3), dann ist der Wärmestrom von außen in den Raum existent aber gegenüber dem ungekühlten Fall (Vergleichsdarstellung im Bild 17 unten) stark gemindert.

Bei einer Wassertemperatur, die näherungsweise der Raumtemperatur entspricht (z. B. 24 °C, Variante 4), ist der Temperaturgradient in der Wand etwa 0 K/m. Es erfolgt kein Wärmeeintrag in den Raum.

Wird die Wassertemperatur in der integrierten Kapillarrohrmatte niedriger als die Raumtemperatur gewählt (z. B. 21 °C, Variante 5), dann erfolgt auch ein Wärmestrom vom Raum an die Kapillarrohrmatte und der Wärmestrom von außen verstärkt sich, d. h., es besteht eine Überkompensation.

Es sei nochmals angemerkt, dass der Wärmefluss vom Raum in die Außenwand und die damit verminderte Raumkühlung prinzipiell vorteilhaft ist und zudem die Behaglichkeit infolge geringer Wandstrahlungskühlung verbessert. Die Ablehnung einer zu tiefen Wassertemperatur in den Kapillarrohrmatten ist energetisch begründet, denn sie steigert den Wärmestrom von außen in die Wand, wodurch sich der Energiebedarf unnötig erhöht. Mit dem gleichen Kühlerer-

Tabelle 2: Aufbau und wärmetechnische Daten der Außenwände bei Bauweise 2

Außenwand Flächen: 5, 6 9–16			δ mm	ρ kg/m³	λ W/(mK)	c J/(kgK)
		Kalkgipsputz **	12	1400	0,70	1000
		Betonsteinmauer**	240	1400	0,70	1000
		Wärmedämmung*	40		0,04	
		Kunstharzputz*	12	1000	0,70	1000
		** ein Speicherbauteil *nicht wärmespeichernde Schicht				
		$1/\alpha_{\text{aussen}} = 0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Wärmeleitwiderstände			$R_a = 1,077 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_i = 0,000 \text{ m}^2\text{K/W}$			

Der Außenputz und die Wärmedämmung werden mit dem äußeren Wärmeübergangswiderstand zum Wärmeleitwiderstand zusammengefasst. Alle anderen Bauteile entsprechen unverändert der Tabelle 1.

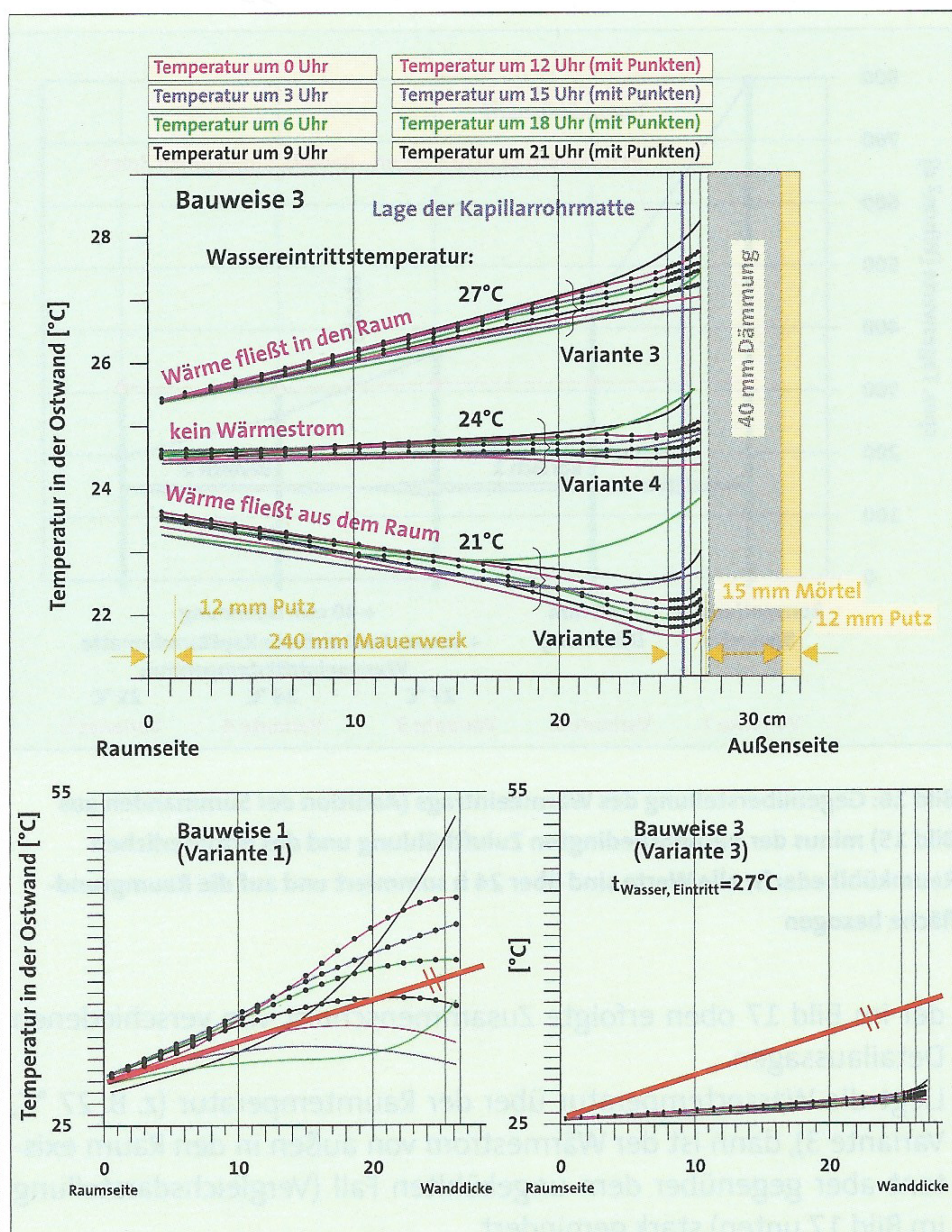


Bild 17 oben: Temperaturverläufe in der Ost-Außenwand mit integrierter Kapillarrohrmatte bei unterschiedlichen Wassereintrittstemperaturen (Varianten 3 bis 5) unten: Veränderungen des Temperaturgradienten im raumnahen Bereich der Ostwand von Variante 1 zu Variante 3; er ist ein Maß für den Wärmestrom in den Raum und zeigt die generell positive Wirkung der thermischen Aktivierung

gieaufwand könnten beispielsweise direkt im Raum angeordnete Kühlflächen effizienter genutzt werden.

Damit gilt auf der Grundlage derzeitiger Erkenntnisse die Faustregel: Betrieb der Kunststoff-Kapillarrohrmatten möglichst mit einer Wassertemperatur, die etwa der Raumtemperatur entspricht. Im simulierten Beispiel ist damit eine Absenkung des Raumkühlbedarfs auf ein Drittel gegeben (Tabelle 4).

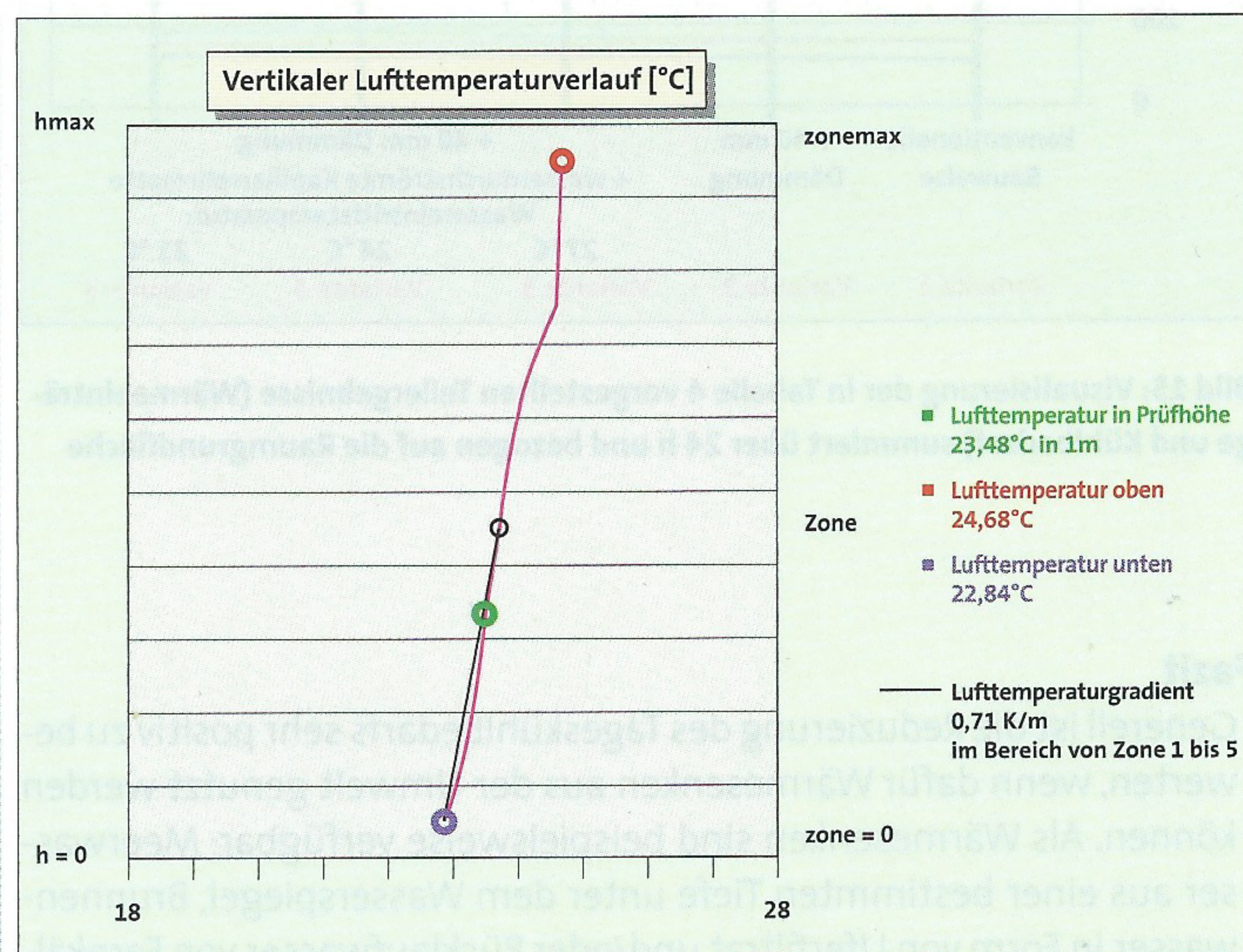


Bild 18: Vertikaler Lufttemperaturverlauf und Lufttemperaturgradient im unteren Raumbereich

Zur gewählten Betriebsweise ist aus Sicht der Effizienz der Wärmeabfuhr festzustellen, dass die Betriebszeit der Wasserbeaufschlagung von 6.00 bis ca. 1.00 Uhr richtig gewählt wurde. Eine Reduzierung des Wasserstromes ist möglich, denn die maximale Temperaturspannung beträgt im Beispiel nur 0,9 K.

Die Betrachtungen der Behaglichkeitskenngrößen zeigen bei der Variante 4 sehr gute Ergebnisse.

Das vertikale Lufttemperaturprofil nach Bild 18 gibt die Lufttemperatur in Prüfhöhe mit 23,5 °C an. Der vertikale Lufttemperaturgradient beträgt 0,7 K/m.

Tabelle 3: Aufbau und wärmetechnische Daten der Außenwände bei Bauweise 3

Außenwand	Flächen:	δ mm	ρ kg/m ³	λ W/(mK)	c J/(kgK)
5, 6					
9-16					
		Kalkgipsputz **	1400	0,70	1000
		Betonsteinmauer**	1400	0,70	1000
		Mörtelschicht*** mit Kapillarrohrmatte	1400	0,70	1000
		Wärmedämmung*		0,04	
		Kunstharzputz*	1100	0,70	1000
** ein Speicherbauteil *nicht wärmespeichernde Schicht ***thermisch aktivierbares Speicherbauteil					
$1/\alpha_{\text{aus}} = 0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$			$R_a = 1,077 \text{ m}^2\text{K/W}$		
Wärmeleitwiderstände			$R_i = 0,000 \text{ m}^2\text{K/W}$		

Der Außenputz und die Wärmedämmung werden mit dem äußeren Wärmeübergangswiderstand zum Wärmeleitwiderstand zusammengefasst. Alle anderen Bauteile entsprechen unverändert der Tabelle 1.

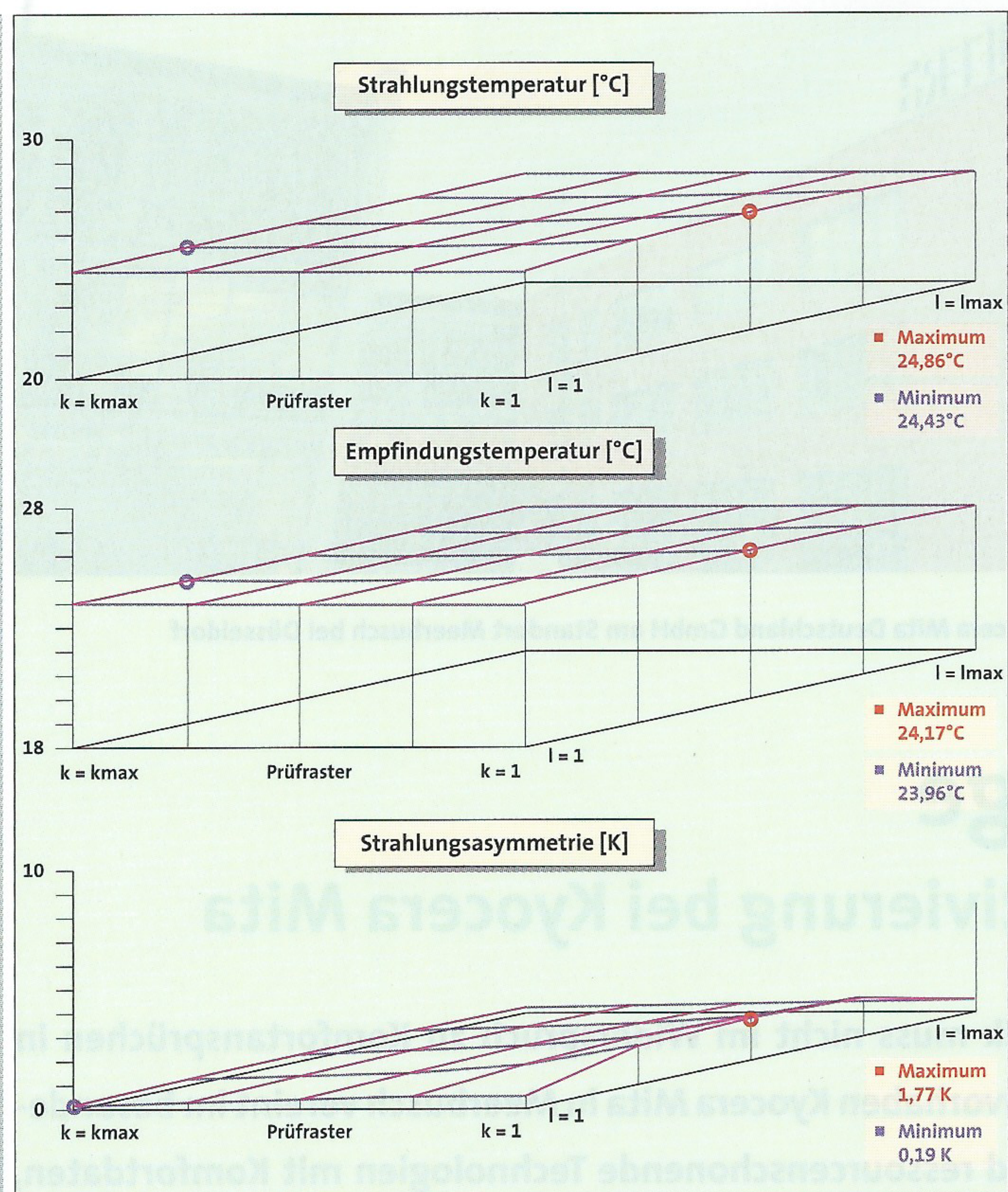


Bild 19: Ergebnisse der thermischen Behaglichkeitssimulation innerhalb des Prüfpunktrasters gemäß Bild 10 ($k = 1$ bis $0,5$ m von der Südwand mit Fenster entfernt)

Weiterhin bestehen ausgeglichene Temperaturfelder über dem gesamten Raumgrundriss (Bild 19). Der Unterschied der Strahlungstemperatur über dem Grundriss beträgt nur $0,4$ K. Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie liegt bei $1,8$ K. Sie wird durch den Fenstereinfluss bedingt. Die niedrigeren Wandtemperaturen wirken behaglichkeitsfördernd, da von den Personen im Raum eine verstärkte Strahlungswärmeabgabe erfolgt.

Literatur

[1] Glück, B.: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. Bericht der Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung, Hamburg 2004/07

Kostenlos erhältlich unter:

<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14)

Detaillaufrufe:

http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Kurzbericht01.pdf

Umfang 6 Seiten (Kurzbericht)

http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Raummodell_TeilA.pdf

Umfang 102 Seiten (Grundlagen)

http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Raummodell_TeilB.pdf

Umfang 140 Seiten (Stationäre Simulation)

http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Raummodell_TeilC.pdf

Umfang 170 Seiten (Instationäre Simulation)

http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Raummodell_TeilD.pdf

Umfang 181 Seiten (1. Ergänzung der instationären Simulation)

http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Raummodell_TeilE.pdf

Umfang 106 Seiten (2. Ergänzung der instationären Simulation)

Tabelle 4: Vergleich der Hauptergebnisse der simulierten Bauweisen und Varianten

Energetische Größen für den Simulationsraum an einem Extremsommertag	Bauweise				
	konventionell	+ 40 mm Außenwanddämmung	+ 40 mm Außenwanddämmung + wasserdurchströmte Kapillarrohrmatte		
			Wassereintrittstemperatur:		
			27 °C	24 °C	21 °C
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Teilergebnisse und Endergebnisse in Wh/d für den Simulationsraum von 25 m^2					
Sonnstrahlung durch Fenster	1945	1945	1945	1945	1945
Transmission durch Fenster	1361	1473	1508	1541	1593
Innere Wärmequellen	6500	6500	6500	6500	6500
Raumkühlung durch Zuluft	1970	2064	2111	2344	2298
Raumkühlbedarf (noch zu kompensieren)	19894	10925	9025	6548	4958
Endergebnisse in $\text{Wh}/(\text{m}^2\text{d})$					
Spez. Raumkühlbedarf	795,8	437,0	361,0	261,9	198,3
Prozentualer Raumkühlbedarf	100 %	55 %	45 %	33 %	25 %