Ein Vorschlag zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung von Wohnbauten

Bernd Glück

Wohnbauten sind ein sehr hochwertiger Gebrauchsgegenstand. Betrachtet man aus der Vielzahl der Anforderungen nur den Bereich der wärmetechnischen und wärmephysiologischen Ansprüche, so ergeben sich jahreszeitlich bedingt, extrem unterschiedliche Zielstellungen. Die ideale Erfüllung wäre nur durch ein Bauwerk denkbar, das über Anpassungsmöglichkeiten verfügte, wie sie lebende Organismen besitzen. Davon sind selbst sogenannte „intelligente" Bauwerke noch sehr weit entfernt. Somit ist die objektive Bewertung der wärmetechnischen Eigenschaften und des erreichbaren thermischen Komforts von Wohnräumen sehr diffizil aber außerordentlich bedeutungsvoll. Zur Beurteilung wird ergänzend zum Normenwerk ein spezielles Simulationsmodell empfohlen. Als Randbedingungen sollten ausgewählte winter- und sommerliche Lastfälle dienen, die zur Diskussion gestellt werden.

1. Anforderungen an Wohngebäude, ihre Realisierung und Bewertung

Grundsätzlich ist die *thermische Behaglichkeit mit minimalem Primärenergieaufwand* zu sichern. Diese allgemein anerkannte Auffassung sollte aber nur als eine *notwendige Bedingung* gesehen werden.

Zusätzlich sind noch *hinreichende Bedingungen* zu erfüllen. Die thermische Behaglichkeit soll auch an Tagen extremer äußerer Belastungen gewährleistet werden oder zumindest sind bestimmte Grenztemperaturen im Raum einzuhalten. Beispielsweise resultieren große Fensterflächen aus dem Wunsch nach guter Belichtung und Besonnung, wodurch sich auch der Jahresheizwärmebedarf reduziert. Trotz des solaren Strahlungseintrages soll aber an heiteren Tagen und sogar auch an extremen Sommertagen die Raumtemperatur bestimmte Grenzwerte – z. B. 27 °C – nicht überschreiten.

In vielen Fällen wird eine tägliche *Raumumnutzung* erforderlich, beispielsweise dienen Kinderzimmer nachts als Schlafräume mit gewünschter Raumtemperatur ≤ 20 °C und tags als Spielstätte mit angestrebter bodennaher Temperatur ≥ 23 °C.

In der Regel können diese Anforderungen nur im Zusammenwirken von *Bauwerk und gebäudetechnischer Anlage* erfüllt werden. Zur *vorausschauenden Bewertung* werden üblicherweise *Simulationswerkzeuge* eingesetzt. Im Ergebnis sollte eine Vielzahl von Aussagen über die Nutzeigenschaften des Bauwerk-Anlage-Systems stehen, die eine objektive aber auch subjektive Einschätzung erlaubt. Dass dabei vom potenziellen Nutzer unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden, ist keineswegs unüblich, denn das Gesamtsystem verkörpert stets eine technische Kompromisslösung.

Das derzeitige *Normenwerk* zur Realisierung der Anforderungen an Gebäude einschließlich Anlagentechnik ist außerordentlich umfangreich. Es umfasst z. B.: Berechnungen zum Jahresheizwärme- und -energiebedarf, energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen, Mindestanforderungen an den Wärmeschutz im Winter und im Sommer. Normen sichern in der Regel einen guten technischen Standard. Grundsätzlich basieren sie auf dem Stand der Technik, gehen vielfach von statistischen Mittelwerten der Randbedingungen aus, müssen generalisieren und pauschalieren. Die derzeitigen Normen für Wohnbauten orientieren primär auf einen niedrigen Jahresenergiebedarf bzw. Jahresprimärenergiebedarf bei vernünftiger Nutzung. Weiterhin versuchen sie, unzumutbare Raumtemperaturen im Sommer ohne das Wirken von Kühlanlagen zu vermeiden.

Es sei ein *vergleichender Blick auf andere Technikbereiche* erlaubt. Während Maschinen und Prozesse zur Energieumwandlung, die unter konstanten Randbedingungen ablaufen, vereinfachend nach einem einzigen Zielparameter – z. B. nach dem Wirkungsgrad – optimiert werden können, sind für den Nutzer von Kraftfahrzeugen zahlreiche, den technischen Gebrauchswert charakterisierende Parameter interessant: spezifischer Kraftstoffverbrauch für verschiedene Verkehrssituationen, Drehmoment, Beschleunigung bei unterschiedlichen Ausgangsgeschwindigkeiten, Höchstgeschwindigkeit, Zuladung bezüglich Masse und Volumen usw.

2. Beispielhafte Problemschilderungen

Die Komplexität der unterschiedlichen Bauwerkseigenschaften und der verschiedenen Einflüsse ist bekannt. Dennoch sei nachfolgend an einige Zusammenhänge und Entwicklungen erinnert:

- Wichtige wärmetechnische Eigenschaften der Gebäude werden durch die *Wärmedämmung* und die *Wärmespeicherkapazität* gekennzeichnet. Über lange Zeiträume des Bauens waren beide Eigenschaften miteinander verknüpft, z. B. wurde eine bessere Wärmedämmung durch dickere Ziegelwände realisiert. Bei neuartigen

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Westsächsische Hochschule Zwickau (FH) und F+E TGA, Goethestraße 18, 08547 Jößnitz (Plauen).

Baustoffen wurden Wärmedämm- und Wärmespeichervermögen entkoppelt. Moderne Dämmmaterialien besitzen praktisch keine Speicherfähigkeit mehr.

- Die früheren Wärmeschutzverordnungen forderten primär eine stetig verbesserte Dämmung der Gebäudeumfassungen. Die weitergehenden Betrachtungen galten dem Energiebedarf. Die Qualität der eingesetzten Wärme blieb in der Regel aber unbeachtet, sodass im Endeffekt die Hauptzielstellung eine *sehr wirkungsvolle Außenhautdämmung* blieb.
- Die *ressourcenverbrauchende Energie* (Primärenergie) ist sehr sparsam einzusetzen, sich *regenerierende Umweltenergie* darf dagegen nahezu unbegrenzt verwendet werden. In der Regel haben die Umweltwärmequellen oder -senken Verfügbarkeitszeiten und/oder Temperaturen, die die Bedarfsanforderungen der Gebäude nicht direkt erfüllen können. Es sind Energiespeicher und/oder temperaturändernde Maschinen (Wärmepumpe oder Kältemaschinen) zwischenzuschalten. Sie verbrauchen wiederum Primärenergie, die in der Bewertung zu berücksichtigen ist. Häufig verwendet man als Qualitätsmaß für die erforderliche Energie die Exergie. Kann Umweltenergie effizient genutzt werden, gilt die früher alleinige Forderung nach einer sehr wirkungsvollen Dämmung nicht mehr a priori.
- Die Umweltenergieaufnahme, ihre Speicherung und die Arten der Wärmeübergabe sind vielfältig. Bei der *passiven Solarenergienutzung* können diese Funktionen bei entsprechender Bauweise durch die Raumumfassungen allein erfüllt werden. Durch transparente Fassaden gelangt die Energie in den Raum, die Wärmespeicherung erfolgt in den Massivbauteilen und bei sinkender Raumtemperatur vollzieht sich die zeitversetzte Wärmeabgabe an den Raum. Bei *aktiver Solarenergienutzung* erfolgt die Energieaufnahme z. B. durch Solarkollektoren, die Speicherung kann extern geschehen und der Wärmeeintrag in den Raum wird beispielsweise durch eine regelbare Flächenheizung bewirkt. Selbstverständlich sind auch kombinierte Nutzungen, das Zwischenschalten von Wärmepumpen usw. üblich.
- Leider realisiert man oftmals auch bau- oder anlagentechnische Kombinationen, die nur in *begrenzten Zeitabschnitten sinnvoll arbeiten,* ansonsten jedoch kontraproduktiv wirken. Dies trifft beispielsweise bei der passiven Solarenergienutzung zu, wenn die Speicherfähigkeit der Umfassungen zu gering ist. Der Energieeintrag ist im Winter positiv, aber bereits an heiteren Frühlingstagen muss ein Teil der eingestrahlten Energie „weggelüftet" werden, was in der Regel zu einem *Behaglichkeitsdefizit* – z. B. durch kalte Luft im Knöchelbereich oder erhöhtes Zugrisiko – führt. Man spricht von den sogenannten *„nicht nutzbaren solaren Gewinnen"*. D. h., bei dieser Bauweise „vergeudet" man einen Teil des Umweltenergiedargebotes. Bei Gestaltung einer aktiv arbeitenden Anlagenvariante mit geringer Speicherkapazität gäbe es auch den Nachteil, dass nicht alle aufgenommene Energie für eine spätere Nutzung verfügbar wäre, aber eine Beeinträchtigung der Behaglichkeit im Raum bliebe aus, da der „nicht nutzbare solare Gewinn" gar nicht in den Wohnraum gelangte.
- Die extrem gegensätzliche Denkungsart sah in der Wärmespeicherfähigkeit – bzw. verkürzt in der Gebäudeschwere – den allein richtigen Bewertungsmaßstab. Generell dürfen die Dämmung und die Speicherkapazität nicht kontrovers diskutiert werden.
- Durch Entwicklung und Einsatz von *Latentspeichermaterialien mit einem Phasenwechsel bei Raumtemperatur* (z. B. Putze mit mikroverkapselten Paraffinen) werden neuerdings Leichtbauten mit einer Speicherkapazität aus- bzw. nachgerüstet. Die Dämmwirkung der in der Regel dünnen Schichten ist marginal. Es erhebt sich die Frage, ob neue Baustoffe nicht wieder Wärmedämm- und Wärmespeichereigenschaften in vorgegebenem Umfang in sich vereinen sollten. Gegenüber früher könnte man heute das Verhältnis von Dämm- und Speicherfähigkeit bedarfsgerecht einstellen.
- Lange Zeit präferierte man den solaren Eintrag zur Heizenergieersparnis, setzte große Glasflächen nach Süden und Westen mit hohem Gesamtenergiedurchlasskoeffizient ein. Die sommerliche Überhitzung wurde nicht ausreichend beachtet. Nunmehr verstärken sich die *Rufe nach maschineller Kühlung,* wobei die Werbenden auf den zunehmenden Einsatz in Kraftfahrzeugen verweisen. Allein dieser nicht zutreffende Vergleich zeigt die Gefahr, die in der weiteren Entwicklung liegt, auf.

3. Bewertung von Räumen mittels Simulationsmodell

Die detaillierte wärmetechnische und wärmephysiologische Bewertung von Wohnbauten ist nur möglich, wenn sich die Untersuchungen auf Einzelräume beziehen und über die Jahresnutzzeit erstrecken. Der Wohnraum ist stets in seiner Gesamtheit zu betrachten. Das *Zusammenwirken von Raumgeometrie, Bauweise, Anlagentechnik, Betriebsweise und Nutzerverhalten bedarf der komplexen Beachtung.* Bei Bürobauten ist dies inzwischen ein Gebot der Wirtschaftlichkeit geworden.

Von großem Interesse sind vor allem die Auswirkungen

- unterschiedlicher *Bauweisen*
- verschiedenartiger *Baustoffe* einschließlich ihrer Schichtanordnungen und -dicken
- vielgestaltiger *Anlagentechniken* einschließlich bauteilintegrierter Lösungen

auf den Energiebedarf und auf die thermische Behaglichkeit im Raum.

Speziell dafür wurde das „Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung" [1; 2] entwickelt, das dankenswerter Weise durch die *RUD. OTTO MEYER-UMWELT-STIFTUNG* gefördert wurde. Der zugehörige Forschungsbericht enthält umfangreiche theoretische Ableitungen, die programmtechnische Umsetzung, die Verifikation der Algorithmen und zahlreiche Beispielanwendungen. Er ist in fachspezifische Bausteine gegliedert: Geometriemodell, wärmephysiologisches Prüfmodell, Simulation der Interieurwärmequellen, Behaglichkeitssimulation, Berechnung der Strahlungs-

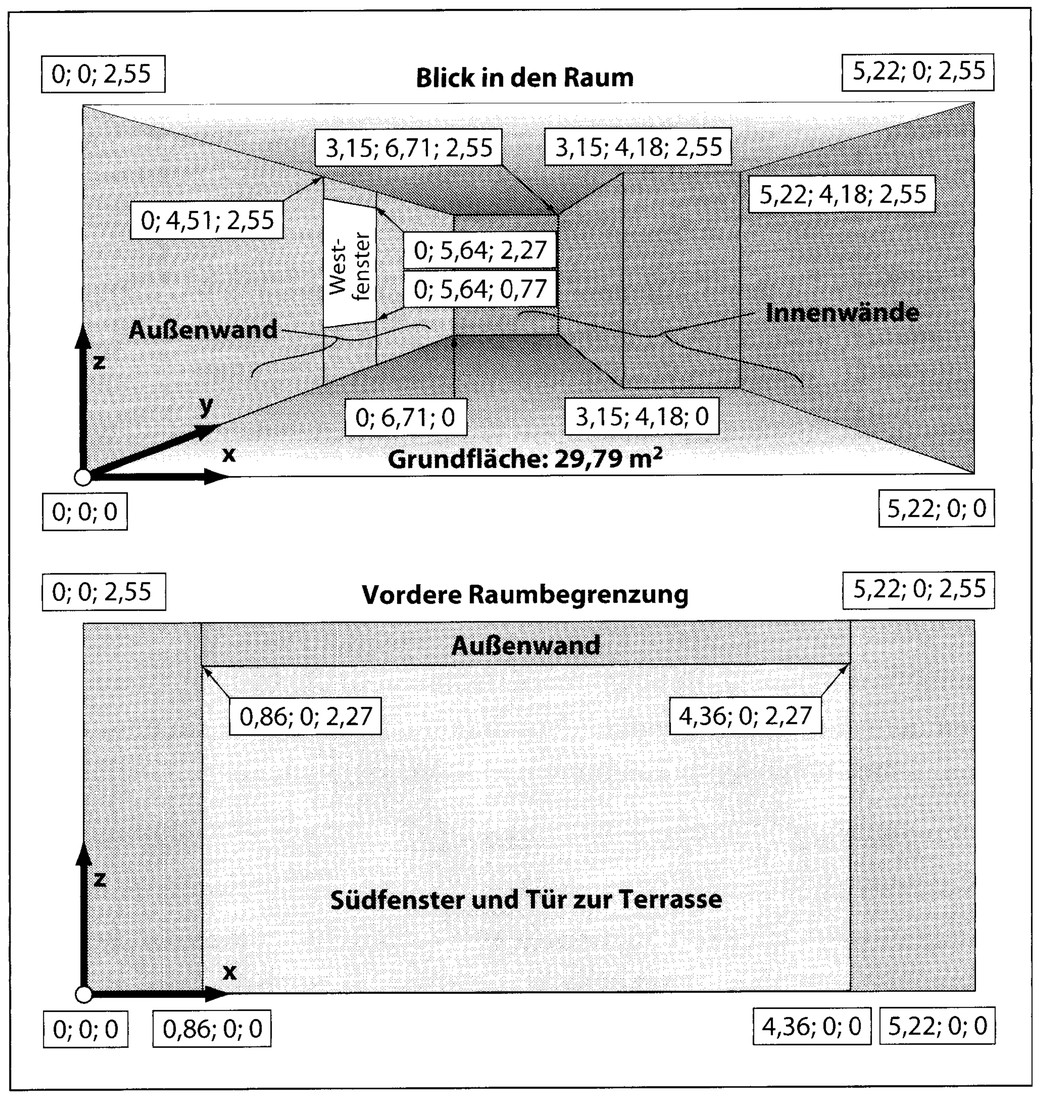

Bild 1. Die Raumgeometrie wird im rechtwinkligen Koordinatensystem abgebildet. Jede dargestellte Rechteckfläche besteht gemäß Eingabe aus zwei Dreiecken. Dreiecke haben den Vorteil, dass beliebige Raumgeometrien darstellbar sind, wobei die Eingabe der Eckpunkte die Größe, Form und die Lage der Fläche eindeutig charakterisieren. Zur numerischen Berechnung der Einstrahlzahlen unter Beachtung von Verschattungen werden die Flächen programmintern in kleinere Elementflächen zerlegt. Somit sind der Strahlungswärmeaustausch und die daraus folgenden standortbezogenen Größen Strahlungstemperatur und Strahlungstemperatur-Asymmetrie genau ermittelbar. Die Oberflächentemperaturen werden iterativ bestimmt, im Sonderfall sind sie fest vorgegeben oder die Flächen weisen eine determinierte Wärmestromdichte auf. Heiz- oder Kühlflächen können ebenfalls dargestellt werden.
Die ausgewählten Koordinatenpunkte (Maße in m) kennzeichnen die reale Raumgeometrie des simulierten Beispielraumes.

wärmeströme, Modellierung der Konvektionswärmeströme und daraus resultierender Lufttransport sowie Wärmeleitung in den Raumumfassungen. Letztere kann stationär und instationär untersucht werden. Im allgemeinsten Fall sind *mehrschichtige Bauteile mit wasserbeaufschlagten Rohrregistern* zum Heizen- und/oder Kühlen nachbildbar, wobei einzelne Schichten auch aus *Latentspeichermaterial mit definiertem Phasenwechsel* bestehen können. Die

Tabelle 1. Teilwärmedurchgangskoeffizienten der Außenumfassungen des Modellraumes.

Fläche	Teilwärmedurchgangskoeffizient κ W/(m²K)	U-Wert W/(m²K)
Außenwand (Westen)	0,241	0,234
Außenwand (Süden)	0,232	0,225
Fenster (Westen)	1,76	1,432
Fenster (Süden)	1,58	1,311

dreidimensionale numerische Betrachtungsweise mit Hilfe einer speziell entwickelten Finite-Volumen-Methode ermöglicht eine genaue Darstellung der Temperaturverläufe und der Phasenzustände im Baukörper [3]. Die Wirkungen der Außenatmosphäre und der Besonnung auf den Raum werden in den Beispielen vereinfacht nachgebildet. Genauere Nachbildungen finden sich in [1, Teil D]. Die inneren Wärmequellen sind standortabhängig unter Beachten der Strahlungs- und Konvektionswärmeabgabe sehr genau darstellbar. Die höhenabhängige Lufttemperatur wird in der Regel mit einem 10-Zonen-Schichtmodell nachgebildet. Die Behaglichkeitsgrößen können wahlweise nach Normvorgaben oder nach zwischenzeitlich vom Autor weiterentwickelten Aussagen definiert sein.

Anschließend werden die Simulationsmöglichkeiten anhand von vier Demonstrationsfällen, die zugleich signifikante Nutzfälle darstellen, gezeigt. Veränderungen des Baustoffeinsatzes, der Nutzung, der Anlagentechnik usw. sind zusätzlich überlagert [5].

4. Beispielraum und Heizlast

Bild 1 zeigt das Wohnzimmer in einer Doppelhaushälfte. Das Raummodell erlaubt es, die Strahlungswärmeströme zwischen den Raumoberflächen und die Konvektionswärmeströme zwischen der Raumluft und den Oberflächen separat zu ermitteln. Der Teilwärmedurchgangskoeffizient κ ist von der raumseitigen Oberfläche nach außen oder zum Nebenraum definiert. Die Angaben finden sich in *Tabelle 1*. Um den Vergleich zum herkömmlichen Wärmedurchgangskoeffizienten zu haben, sind in der Tabelle die U-Werte – gebildet mit normgerechten Wärmeübergangskoeffizienten – ergänzt. Diese Wärmedurchgangskoeffizienten gelten für alle Berechnungen, wobei in den späteren

Tabelle 2. Reale Heizlasten und charakteristische Temperaturen im Auslegungsfall (Außentemperatur –15 °C, Raumtemperatur 23 °C, keine Solarstrahlung, keine inneren Lasten).

	Heizlast	Konstruktionscharakteristik	mittlere Wassertemperatur
Fußbodenheizung	1257 W	Einsatz von Kunststoff-Kapillarrohrmatten 4,3×0,8 mm, RA 30 mm im Estrich 35 mm; Teppichbelag; $\kappa_{Heizfläche}$ = 5,6 W/(m²K)	31,6 °C
		Einsatz von Kunststoff-Kapillarrohrmatten 4,3×0,8 mm, RA 30 mm im Estrich 35 mm; Fliesenbelag; $\kappa_{Heizfläche}$ = 22,9 W/(m²K)	27,2 °C
Deckenheizung	1280 W (+1,8 %)	Einsatz von Kunststoff-Kapillarrohrmatten 4,3×0,8 mm, RA 20 mm oder 3,4×0,55 mm, RA 15 mm im Deckenputz 14 mm; $\kappa_{Heizfläche}$ = 25,3 W/(m²K)	29,7 °C
			Umlufttemperatur
Umluftheizung	1300 W (+3,4 %)	3-facher Luftwechsel	45,0 °C
Konvektionsheizung (Idealfall)	1256 W (±0 %)	Wärmezufuhr je 1/10 in jeder der 10 horizontalen Raumzonen	

Berechnungsbeispielen die Wärmespeicherkapazitäten variiert werden. Der Zuluftvolumenstrom von 38 m^3/h entspricht einem Außenluftwechsel von 0,5 h^{-1}. Die Zuluft wird dem Raum in der untersten Zone zugeführt. Die Abluft verlässt ihn in der obersten Zone. Ein Wärmerückgewinner ist nicht vorhanden. Damit liegen die ungünstigsten Verhältnisse vor. Weiterhin wird angenommen, dass alle Nebenräume auch die Raumtemperatur besitzen. Für den Auslegungsfall liefert die Simulation die in *Tabelle 2* verzeichneten Werte. Die Größen zur thermischen Behaglichkeit sind differenziert zu sehen. Die Schwankung der Empfindungstemperatur über dem Raumgrundriss (0,6 … 0,9 K) und die Strahlungstemperatur-Asymmetrie (3,6 … 6,0 K) stellen sich bei allen Heizvarianten unkritisch dar, die Lufttemperatur im Knöchelbereich ist bei der Decken- und der Umluftheizung mit 18,7 °C bzw. 18,0 °C am niedrigsten, ansonsten beträgt sie stets über 20,5 °C. Der vertikale Lufttemperaturgradient überschreitet bei der Decken-, Umluft- und Konvektionsheizung die zulässigen Werte. Es sei angemerkt, dass dies nur für $t_a = -15$ °C mit dem Außenlufteintritt im bodennahen Bereich gilt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Beispielraum dem Niedrigenergiehaus-Standard entspricht und dass die Heizlast aufgrund der vorhandenen Dämmung fast systemunabhängig gilt.

5. Raumverhalten an einem heiteren Wintertag

Generell wird bei den weiteren Simulationen angenommen, dass im Raum eine zeitabhängige Wärmequelle entsprechend *Bild 2* wirkt, dass der Außentemperaturtagesgang nach *Bild 3* gilt und dass an den unverschatteten Fensterinnenflächen die Wärmestromdichten gemäß *Bild 4* zutreffen. Die Untersuchungen werden beginnend um 0.00 Uhr über 72 h geführt (Zeitschritt 20 s). Um einen angenähert eingeschwungenen Zustand zu haben, kommen die Ergebnisse des dritten Tages zur Auswertung.

Beispiel 1: keine Wärmespeicherung, keine Verschattung, konstante Raumtemperatur von 23 °C

Bei diesem Ausgangsbeispiel besitzt der Raum *keinerlei Speicherkapazität* und die gewünschte Raumtemperatur wird durch das trägheitsfrei arbeitende, konvektive Heiz- bzw. Kühlsystem stets eingehalten. Die detaillierten Ergebnisse zeigen eine zeitliche Schwankung der mittleren Empfindungstemperatur von 0,1 K, die Schwankung der Empfindungstemperatur über dem Grundriss kann infolge der unverschatteten Sonneneinstrahlung jedoch sehr groß sein (z. B. um 12.00 Uhr 6,9 K).

Dieser betrachtete theoretische Sonderfall liefert einen Eindruck, welche Heiz- und Kühlenergien im ungünstigsten Fall zur Einhaltung der Raumsolltemperatur erforderlich wären:

Heizenergie 11,5 kWh/d; Kühlenergie 26,0 kWh/d.

Selbstverständlich werden sich in der Realität nicht diese Verbrauchswerte einstellen, da stets eine Wärmekapazität vorhanden ist – beispielsweise auch durch das Mobiliar gegeben – und man die Raumtemperatur in einem vorgegebenen Bereich gleiten lässt. Weiterhin kann die rechnerisch erforderliche Kühlenergie durch verstärktes Lüften mit der winterlichen Außenluft – allerdings bei erheblicher Komforteinbuße – eingespart werden. Dennoch wäre es falsch, die Ergebnisse in der beschriebenen Art „wegdiskutieren" zu wollen, denn viele Bauweisen präferieren die Wärmedämmung ohne Speichermasse und so nähert man sich in der Wirklichkeit doch den gering wärmespeichernden Bauten an. Somit bleibt das Defizit, die solaren Gewinne nicht nutzen zu können.

Beispiel 2: Wärmespeicherung, keine Verschattung, konstante Raumtemperatur von 23 °C

Die Außenwände bestehen aus $1^1/_2$-Stein Ziegelmauerwerk mit Innenputz (δ = 380 mm, ρ = 1850 kg/m³, λ = 0,81 W/(m K), c = 920 J/(kg K)) und einer äußeren Dämmschicht, die im Gesamtaufbau wiederum den κ- bzw. U-Werten der *Tabelle 1* entspricht. Für die Innenwände wird 1-Stein Ziegelmauerwerk mit Innenputz (δ = 270 mm) angenommen und die Decke zum Obergeschoss be-

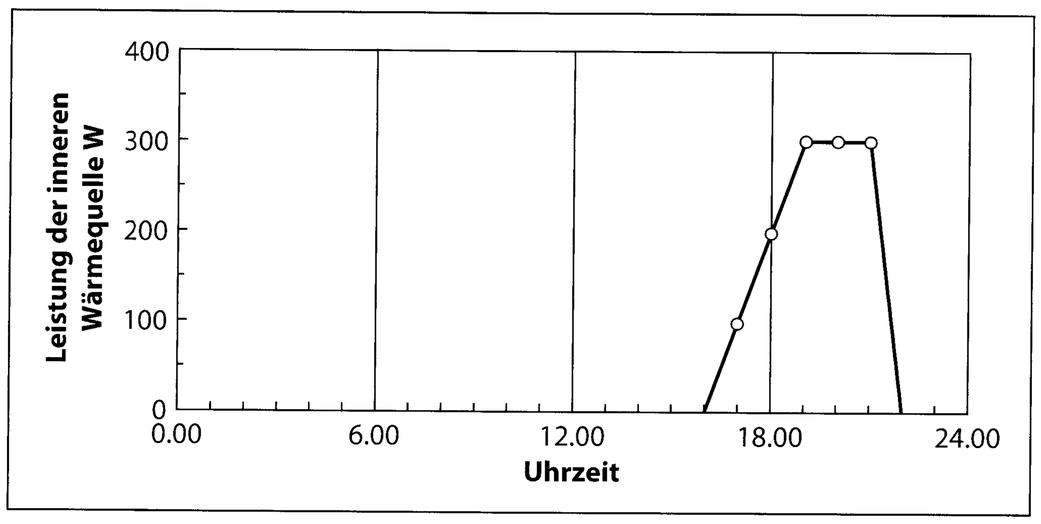

Bild 2. Leistungsverlauf für die innere Wärmequelle [*Beispiele 1 bis 8*].

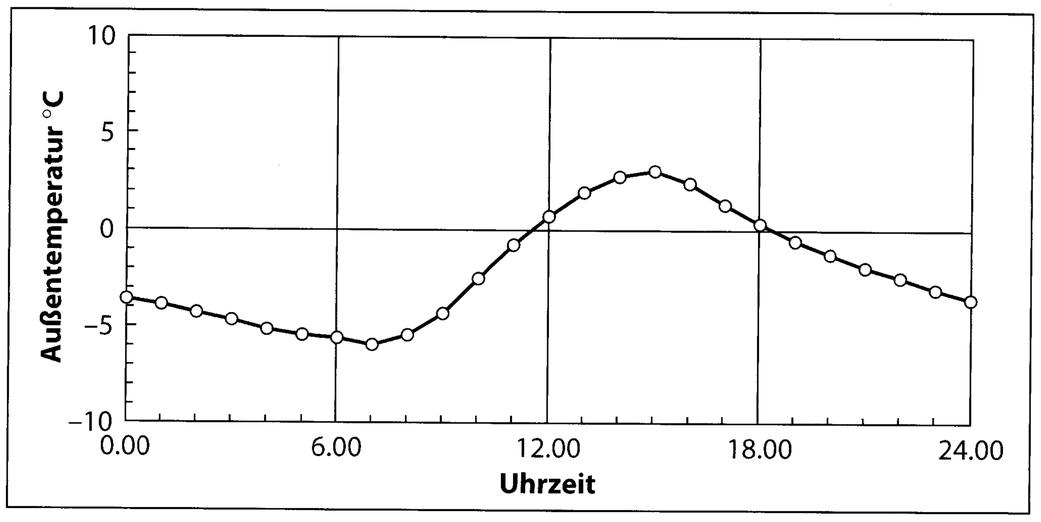

Bild 3. Außentemperaturgang während eines heiteren Tages im Februar, Standort Kassel (Quelle DIN 4710) [*Beispiele 1 bis 5*].

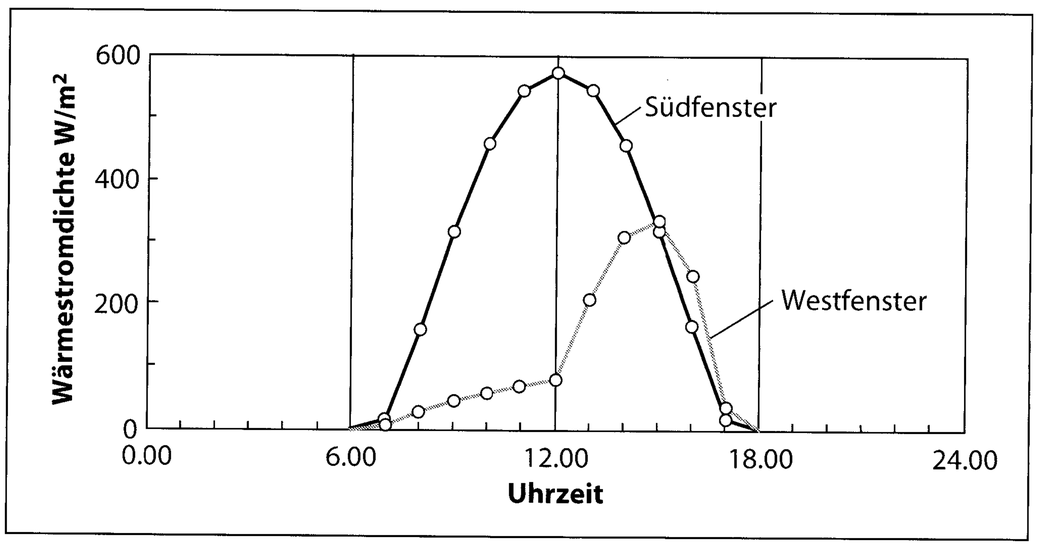

Bild 4. Wärmestromdichten, die an den inneren, unverschatteten Fensterflächen wirken, im Tagesgang (g = 0,75) während eines heiteren Tages im Februar, 50°N (Quelle DIN 4710) [*Beispiele 1 und 2*].

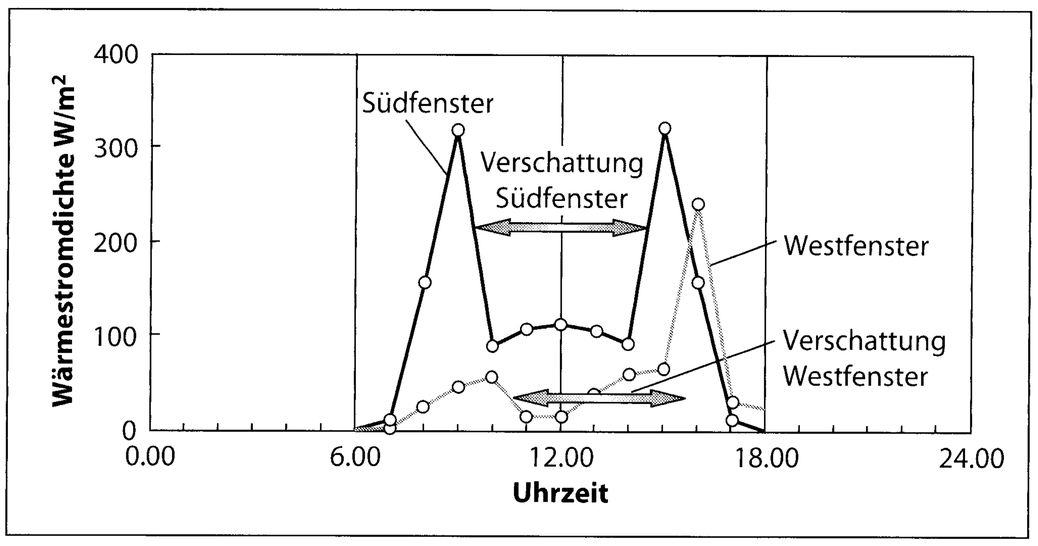

Bild 5. Wärmestromdichten, die an den inneren, zeitweise verschatteten Fensterflächen wirken, im Tagesgang (keine Verschattung: g = 0,75; Verschattung: g_{total} = 0,15) [*Beispiele 3 und 4*].

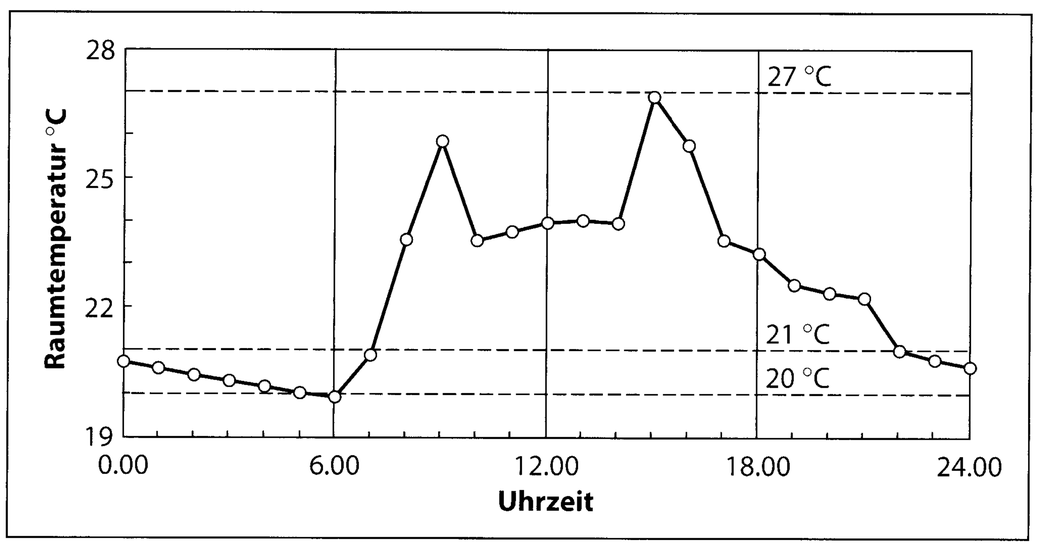

Bild 6. Empfindungstemperatur im Modellraum mit Massivspeicherbauteilen (Außen- und Innenwände, Decke wie im *Beispiel 2*) bei zeitweiser Verschattung der Fenster gemäß *Bild 5* ohne Wirken eines Heiz-/Kühlsystems [*Beispiel 3*].

steht aus einem Betonfertigteil (δ = 180 mm, ρ = 2350 kg/m³, λ = 1,47 W/(m K), c = 1050 J/(kg K)) mit obenliegendem Fußbodenaufbau (R_a = 0,78 m²K/W). Lediglich der Boden des Raumes bleibt noch ohne Wärmespeicherkapazität. Das Simulationsergebnis lautet:

Heizenergie 5,8 kWh/d; Kühlenergie 19,1 kWh/d.

Gegenüber *Beispiel 1* sinkt die erforderliche Heizenergie auf die Hälfte. Die Schwankungen der Empfindungstemperatur über dem Grundriss bleiben sehr groß (z. B. um 12.00 Uhr 6,2 K), da die Fensterfläche nach Süden wiederum unverschattet ist.

Beispiel 3: Wärmespeicherung, Verschattung, kein Anlagenbetrieb, gleitende Temperatur

Die bautechnischen und wärmetechnischen Gegebenheiten entsprechen *Beispiel 2* (Außen- und Innenwände aus Ziegelmauerwerk, Decke als Betonfertigteil, Fußboden ohne Wärmekapazität, Dämmung auf der Außenwand, Nebenraumtemperaturen gleich der Raumisttemperatur). Die Untersuchung erfolgt jedoch für eine *passive Raumnutzung ohne Wirken eines Heiz-/Kühlsystems.* Die solare Einstrahlung durch die Fenster wird durch sehr wirksame Verschattungseinrichtungen über jeweils 5 Stunden reduziert (Wärmestromdichten an den Innenflächen der transparenten Bauteile nach *Bild 5*).

Die Empfindungstemperatur (*Bild 6*) stellt das Ergebnis eines frei schwingenden Systems dar. Sie bewegt sich zwischen 20 °C und 27 °C. Die Schwankungen der Empfindungstemperatur über dem Grundriss sind gegenüber den

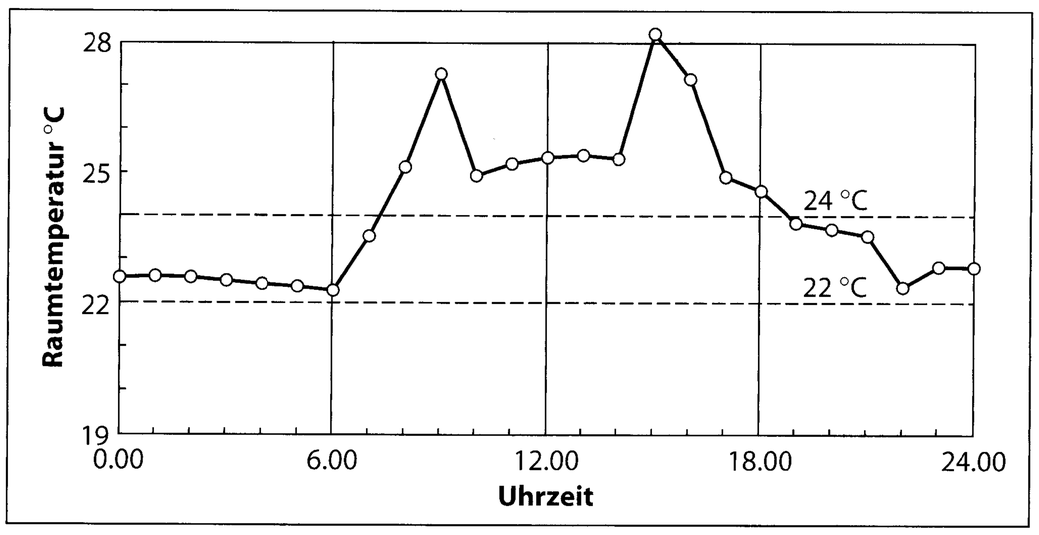

Bild 7. Empfindungstemperatur im Modellraum mit Massivspeicherbauteilen (Außen- und Innenwände, Decke wie im *Beispiel 2*) bei zeitweiser Verschattung der Fenster gemäß *Bild 5* sowie bei Abschalten der Nachtlüftung ohne Wirken eines Heiz-/Kühlsystems [*Beispiel 4*].

unverschatteten Varianten stark reduziert (um 9.00 Uhr 4,0 K und um 15.00 Uhr 4,1 K). Obwohl es sich um einen heiteren Wintertag mit der mittleren Tagestemperatur von –2 °C handelt, sind *keine Energieaufwendungen* nötig. Zur Beanstandung könnte die niedrige Empfindungstemperatur in den Morgen- und Abendstunden (20 °C … 21 °C) Anlass geben. Deshalb werden nachfolgend weitere Änderungen vorgenommen.

Beispiel 4: Wärmespeicherung, Verschattung, kein Anlagenbetrieb, gleitende Temperatur, reduzierte Nachtlüftung

Um die Raumtemperatur in den Morgen- und Abendstunden anzuheben, wird unter Beibehaltung aller im *Beispiel 3* geltenden Gegebenheiten zusätzlich die Nachtlüftung ausgesetzt. D. h., zwischen 23.00 und 8.00 Uhr erfolgt kein Luftwechsel. Außerhalb dieses Zeitraumes beträgt er nach wie vor 0,5 h^{-1}.

Der im *Bild 7* gezeigte Verlauf der Empfindungstemperatur ist gegenüber *Bild 6* deutlich angehoben. Somit ergeben sich in den Morgen- und Abendstunden angenehme Raumtemperaturen zwischen 22 °C und 24 °C. Wenn der Raum jedoch nachmittags (14.00 … 16.00 Uhr) genutzt werden soll, muss unbedingt eine intensive Lüftung zur Kühlung erfolgen. Dies würde aber zu einer geringeren Energiespeicherung führen, sodass die gewünschte Temperatur am Abend und am folgenden Morgen nicht erreichbar wäre. Der Verlauf der Empfindungstemperatur sollte eine Vergleichmäßigung erfahren.

Beispiel 5: erhöhte Wärmespeicherung, verlängerte Verschattung, kein Anlagenbetrieb, gleitende Temperatur, reduzierte Nachtlüftung

Um die Raumtemperaturschwankungen zu verringern, werden die Speicherung vergrößert und die Verschattung des Südfensters verlängert. Zusätzlich gelten alle bisherigen Maßnahmen weiterhin. Zusammenfassend sind dies:

- Außenwände aus Ziegelmauerwerk mit Außendämmung gemäß *Beispiel 2*
- Innenwände aus Ziegelmauerwerk gemäß *Beispiel 2*
- Decke aus Betonfertigteilen mit Fußbodenaufbau gemäß *Beispiel 2*
- Fußboden mit Latentspeicherschicht auf Dämmung und Rohdecke nach *Bild 8*
- alle Nebenraumtemperaturen entsprechen der Raumisttemperatur

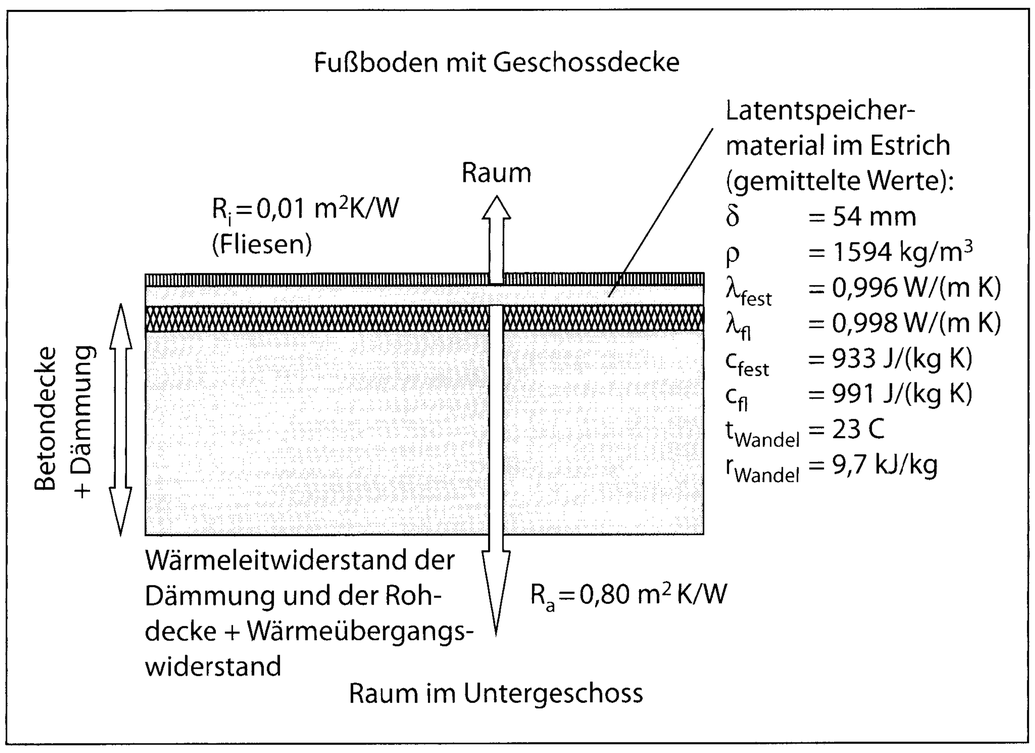

Bild 8. Fußboden mit Latentspeicherschicht [*Beispiele 5 bis 7*].

- Wärmeeintrag durch Fenster bei zeitweiser Verschattung gemäß *Bild 9*
- Außenluftwechsel 0,5 h^{-1}, Abschalten der Lüftung von 23.00 Uhr bis 8.00 Uhr.

Das Latentspeichermaterial (Paraffin in Kunststoffmikrokapseln) ist dem Estrich beigemischt (ca. 20 % Vol.). Die Phasenwandeltemperatur beträgt 23 °C.

Der Verlauf der Empfindungstemperatur (*Bild 10*) ist unter der Randbedingung, dass keine Heiz- oder Kühlenergie eingebracht wird, nahezu ideal. Die Empfindungstemperatur liegt stets über 22 °C und tangiert die Grenztemperatur von 26 °C nur kurzzeitig. Die Schwankungen der Empfindungstemperatur über dem Grundriss haben sich weiter reduziert. Die Maximalwerte ergeben sich um 9.00 Uhr zu 3,5 K und um 16.00 Uhr zu 2,0 K. In den Abend- und Morgenstunden ist die Schwankung ≤ 0,5 K. Diese wärmephysiologische Verbesserung wird durch die Verlängerung der Verschattungszeit und die ausgeglichenere Fußbodentemperatur (Wirkung des Latentspeichers) erreicht.

Fazit für heiteren Wintertag

Es wurde der Nachweis erbracht, dass beispielsweise an einem heiteren Wintertag durch passive Solarenergienutzung ohne Zusatzenergie ein wärmephysiologisch behaglicher Raumzustand ganztägig erreichbar ist. Mit Hilfe des Simulationsprogramms kann durch Variantenvergleiche eine schrittweise Optimierung der bautechnischen Ausgestaltung des Raumes sowie des Verschattungs- und Lüftungsregimes durchgeführt werden.

6. Raumverhalten an einem heiteren Sommertag (Beispiel 6)

Es wird weiterhin der Modellraum (*Bild 1*) und der wärmetechnische Aufbau der Raumumfassungen entsprechend *Beispiel 5* zugrunde gelegt. Die Temperaturen in den angrenzenden Räumen weisen ebenfalls die Raumisttemperatur auf. Die *inneren Wärmequellen* bewirken in der Zeit von 17.00 Uhr bis 21.00 Uhr einen Wärmestrom an den Raum, der mit den interpolierten Übergangsleistungen einen Verlauf gemäß *Bild 2* aufweist. Der *Zuluftvolumenstrom* entspricht einem 1-fachen Außenluftwechsel

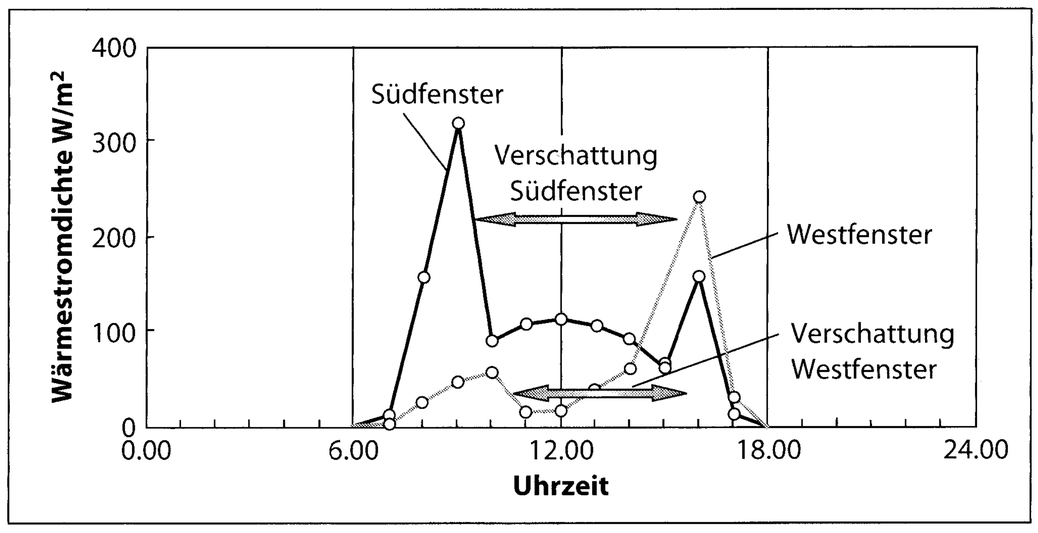

Bild 9. Wärmestromdichten, die an den inneren, zeitweise verschatteten Fensterflächen wirken, im Tagesgang (keine Verschattung: g = 0,75; Verschattung: g_{total} = 0,15) [*Beispiel 5*].

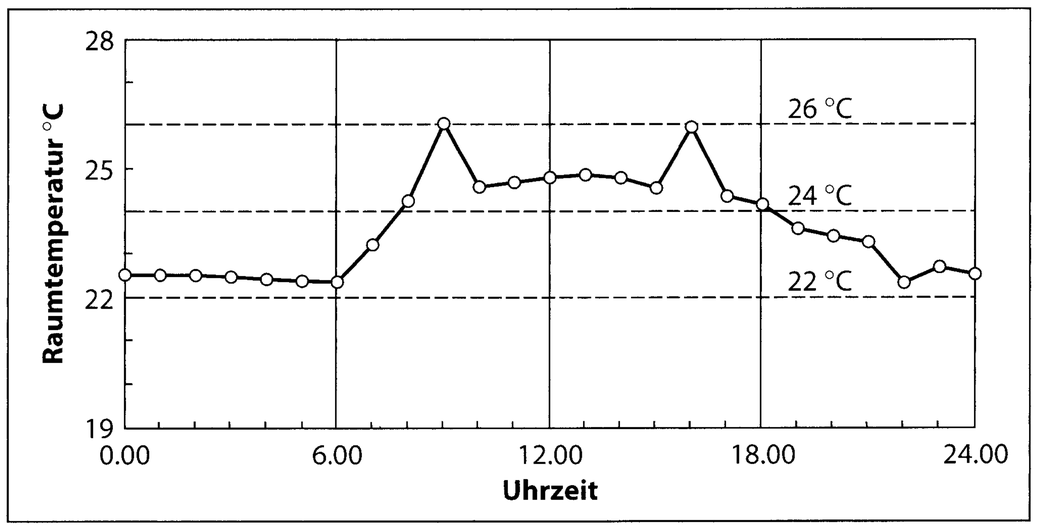

Bild 10. Empfindungstemperatur im Modellraum mit Massivspeicherbauteilen (Außen- und Innenwände, Decke wie im Beispiel 2, Fußboden mit Latentspeicher nach *Bild 8*) bei verlängerter Verschattung der Fenster gemäß *Bild 9* sowie bei Abschalten der Nachtlüftung ohne Wirken eines Heiz-/Kühlsystems [*Beispiel 5*].

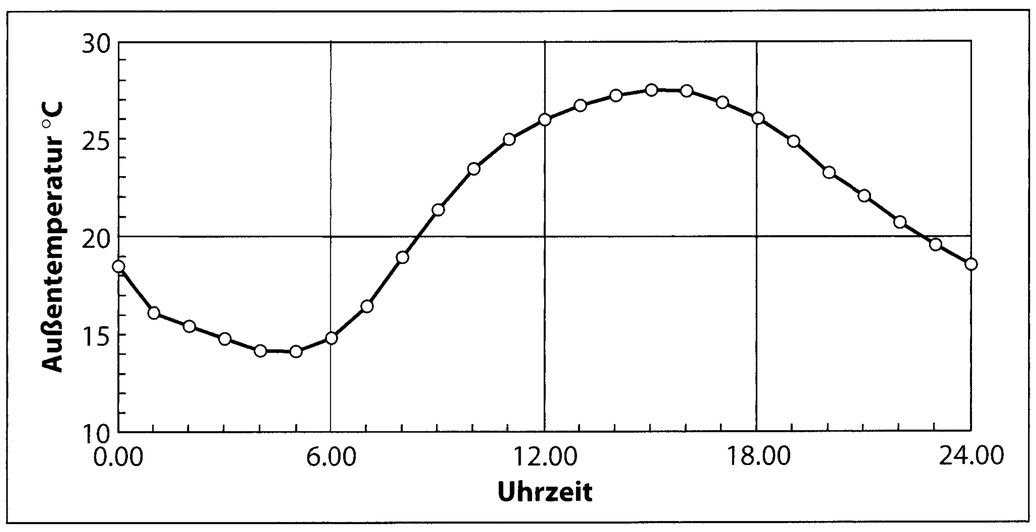

Bild 11. Außentemperaturgang während eines heiteren Tages im Juli, Standort Kassel (Quelle DIN 4710) [*Beispiel 6*].

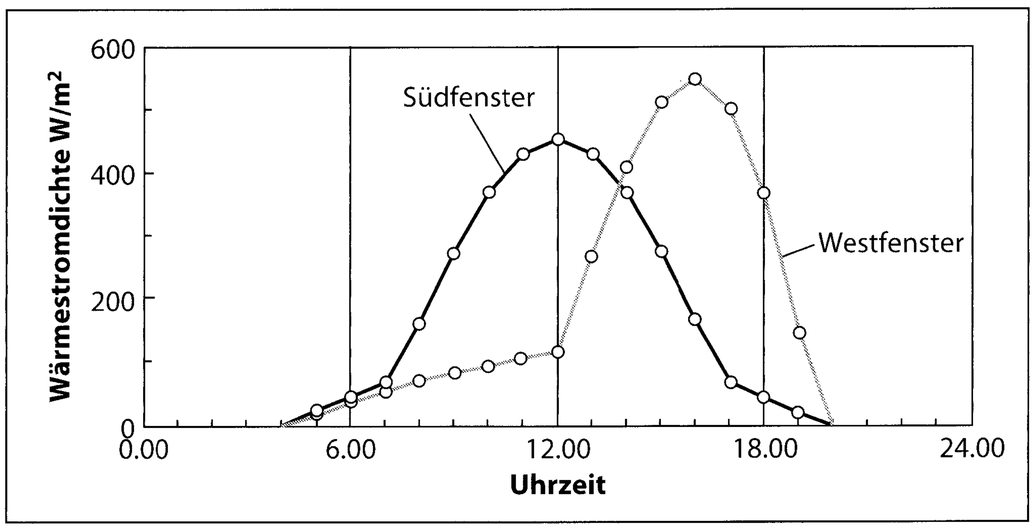

Bild 12. Wärmestromdichten, die an den inneren, unverschatteten Fensterflächen wirken, im Tagesgang (g = 0,75) während eines heiteren Tages im Juli, 50°N (Quelle DIN 4710) [*Beispiele 6 bis 8*].

pro Stunde (76 m^3/h). Dies dürfte für eine Nachtlüftung den ungünstigsten Fall darstellen, da bei üblichen Querlüftungen höhere Werte realisierbar sind. Die meteorologischen Tagesgänge finden sich in den *Bildern 11* und *12*. Durch eine intensive Verschattung (*Bild 13*), die am Südfenster über 9 Stunden und am Westfenster über 8 h währt, ergeben sich die besten Voraussetzungen, auch im Sommerfall thermisch behagliche Verhältnisse zu erzielen. Zuerst wird die Phasenwandeltemperatur wie bisher mit 23 °C angenommen.

Die Empfindungstemperatur (*Bild 14*) zeigt ein sehr gutes Ergebnis, da sie sich zwischen ca. 23 °C und 26 °C bewegt. Die Schwankung der Empfindungstemperatur über dem Prüfraster (Raumgrundriss) schwankt tageszeitabhängig

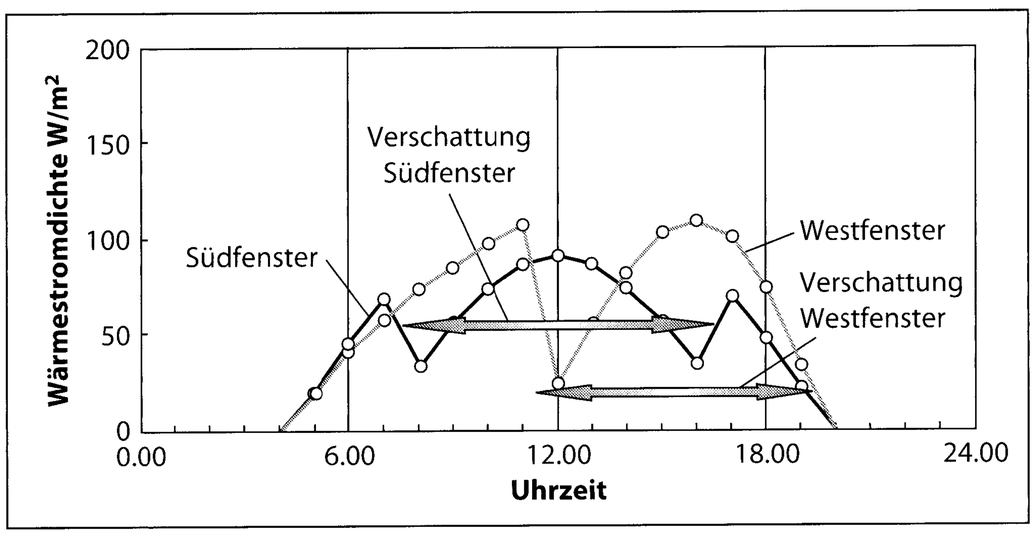

Bild 13. Wärmestromdichten, die an den inneren, zeitweise verschatteten Fensterflächen wirken, im Tagesgang (keine Verschattung: g = 0,75; Verschattung: g_{total} = 0,15) [*Beispiele 6 bis 8*].

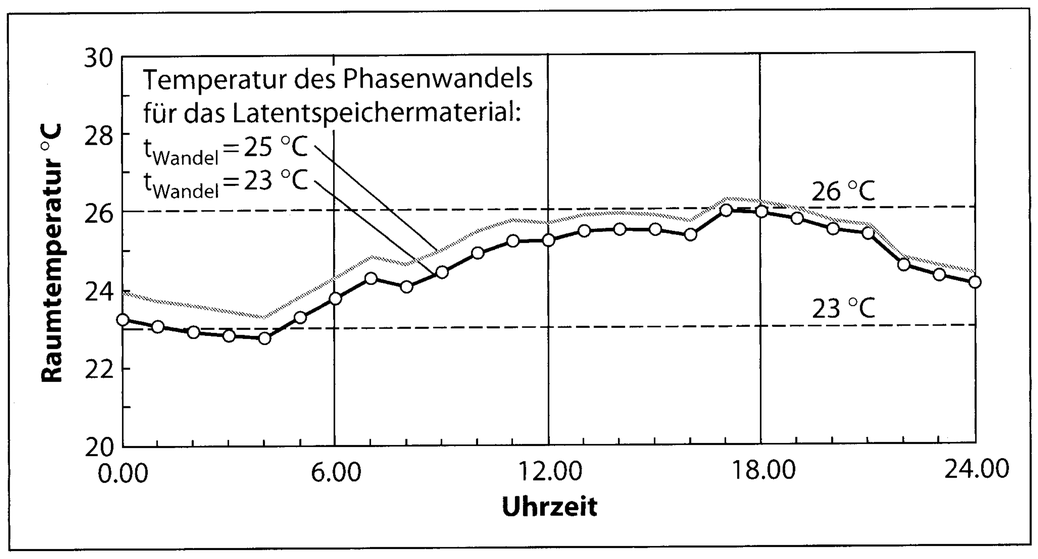

Bild 14. Empfindungstemperatur im Modellraum mit Massivspeicherbauteilen (Außen- und Innenwände, Decke gemäß Beispiel 2, Fußboden mit Latentspeicherschicht nach *Bild 8* sowie t_{Wandel} = 23 °C bzw. 25 °C) bei zeitweiser Verschattung der Fenster gemäß *Bild 13* ohne Wirken eines Heiz-/Kühlsystems [*Beispiel 6*].

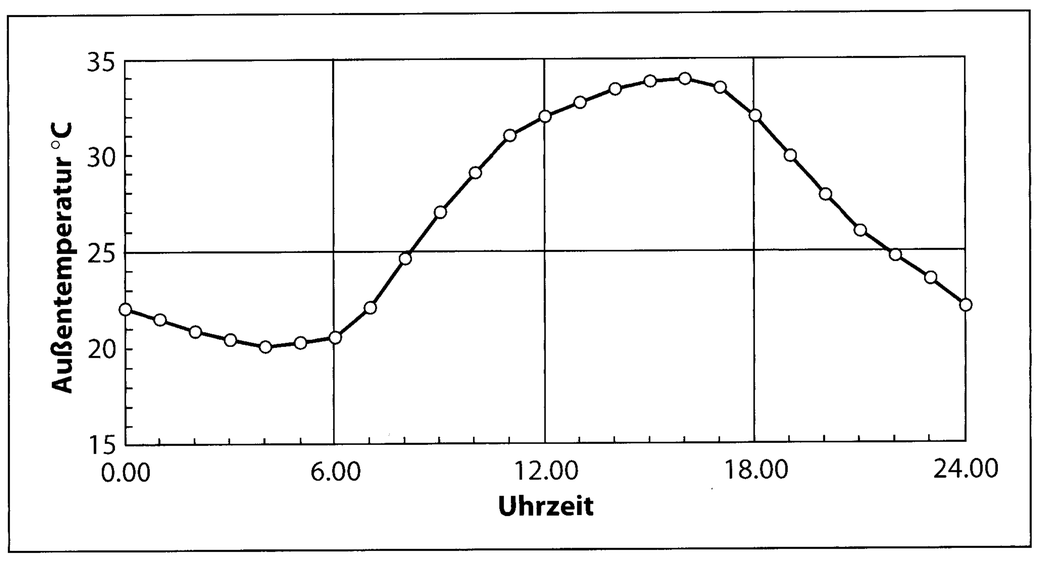

Bild 15. Außentemperaturgang während eines Extremsommertages [*Beispiele 7 und 8*].

zwischen 0,1 K und 1,3 K. Der Maximalwert – er tritt um 12.00 Uhr auf – ist sehr klein. Es ist festzustellen, dass auch am dritten Simulationstag noch kein eingeschwungener Zustand besteht, denn die Raumtemperatur am Ende des dritten Tages (24.00 Uhr) liegt höher als am Ende des zweiten Tages (im Diagramm: 0.00 Uhr). Dies bedeutet, dass beispielsweise auch die Startbedingungen – hier t_{Start} = 23 °C und $Phase_{Start}$ = 0 (festes Paraffin) – noch nachwirken.

Von Interesse ist, ob sich der Tagestemperaturverlauf noch glättet, wenn die Phasenwandeltemperatur von 23 °C auf 25 °C erhöht wird. Eine erneute Simulation ergibt den im *Bild 14* grau dargestellten Raumtemperaturverlauf. Er ist nach oben verschoben und kommt dem eingeschwungenen Zustand näher. Die Amplitude der Raumtemperaturschwankung nimmt geringfügig ab. Jedoch ist kein markanter Einfluss der Phasenwandeltemperatur im untersuchten Bereich (23 °C … 25 °C) feststellbar.

Fazit für heiteren Sommertag

Die große Wärmespeicherkapazität des Raumes und das stringente Verschattungsregime gewährleisten bei angepasster Kleidung auch an einem heiteren Sommertag *behagliche Raumverhältnisse ohne Energieaufwand.*

7. Raumverhalten an einem Extremsommertag

In Einzelfällen treten Extremsommertage auf. Der Verlauf der Gesamtstrahlung entspricht hierbei wiederum dem *Bild 12*, und bei intensiver Verschattung im Raum wirken die Wärmestromdichten gemäß *Bild 13*. Die Lufttemperatur liegt an diesen Extremtagen aber höher als der in der DIN 4710 dargestellte mittlere Verlauf gemäß *Bild 11*. Es wird deshalb der im *Bild 15* dargestellte „synthetische" Lufttemperaturgang kreiert. Weiterhin werde auch in diesem Beispiel ein 1-facher Außenluftwechsel pro Stunde über den gesamten Tag (24 Stunden) für die Simulation angenommen.

Beispiel 7: große Wärmespeicherung, intensive Verschattung, kein Anlagenbetrieb, gleitende Temperatur

Die Empfindungstemperatur liegt an dem Extremsommertag um fast 2 K höher als am heiteren Sommertag nach

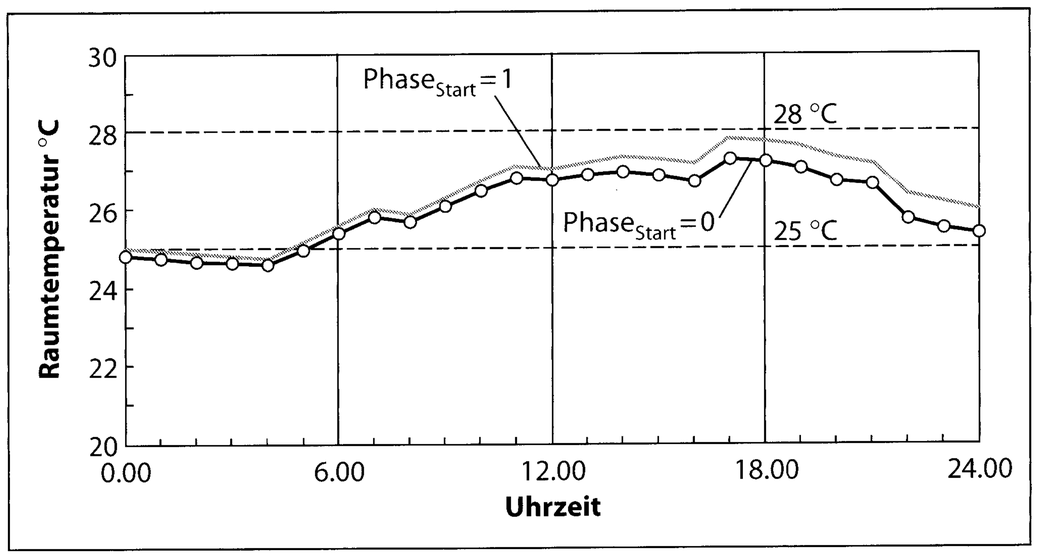

Bild 16. Empfindungstemperatur im Modellraum mit Massivspeicherbauteilen (Außen- und Innenwände, Decke gemäß *Beispiel 2*, Fußboden mit Latentspeicherschicht nach *Bild 8* sowie t_{Wandel} = 25 °C) bei zeitweiser Verschattung der Fenster gemäß *Bild 13* ohne Wirken eines Heiz-/Kühlsystems [*Beispiel 7*].

DIN 4710 (*Beispiel 6*). Im *Bild 16* sind zwei Verläufe für unterschiedliche Startbedingungen dargestellt. Im ersten Fall startet das Latentspeichermaterial von der „festen" Phase ($Phase_{Start} = 0$), im zweiten Fall von der „flüssigen" Phase ($Phase_{Start} = 1$) aus. Welche Startbedingungen realistischer sind, hängt vom zeitlichen „Vorleben" des Speichers ab. Der eingeschwungene Zustand ist auch am dritten Tag noch nicht erreicht.

Grundsätzlich bietet der Raum mit der hohen Wärmespeicherkapazität bei Verschattung der Fenster auch an einem Extremsommertag *thermisch erträgliche Raumbedingungen ohne Energieaufwand.*

Beispiel 8: große Wärmespeicherung, intensive Verschattung, nächtliche Fußbodenkühlung aus einem Umweltenergiereservoir, gleitende Temperatur

Um den im *Bild 16* dargestellten Raumtemperaturgang zu verbessern, wird unter Beibehaltung der bisherigen baulichen und wärmetechnischen Randbedingungen die Latentspeicherschicht im Fußboden durch ein Rohrregister (*Bild 17*) thermisch aktivierbar gestaltet. Die nächtliche Kühlzeit ist mit 5 h relativ kurz und die Wassereintrittstemperatur von 19 °C hoch, wodurch Umweltenergie eingesetzt werden kann.

Die Empfindungstemperatur (*Bild 18*) schwankt während der Nutzungszeit zwischen 24 °C und < 27 °C. Infolge aktiver Nachtkühlung wurde gegenüber dem Passivsystem (*Bild 16*) eine durchschnittliche Absenkung der Raumtemperatur um 1 K erreicht. Die Empfindungstemperatur über den Raumgrundriss schwankt zeitabhängig zwischen 0,1 K und 1,2 K. Die Wasseraustrittstemperatur beträgt nach einer Betriebsstunde ca. 22 °C und am Ende der Beladungszeit etwa 20 °C. Damit ist der Wasserdurchsatz richtig gewählt (Wassergeschwindigkeit in den Röhrchen 0,1 m/s).

Fazit für Extremsommertag

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass auch an Extremsommertagen wärmephysiologisch zulässige Raumzustände ganztägig erreichbar sind. Dies ist sogar ohne Einsatz von Zusatzenergie möglich. Unter Nutzung von Umweltwärmesenken wären Raumtemperatur-Tagesgänge realisierbar, die sogar den engeren Normen für Räume mit RLT-Anlagen gerecht würden.

8. Zusammenfassung

Die vorgestellten Beispiele verdeutlichen, dass es unmöglich ist, die wärmetechnische und wärmephysiologische Bewertung für ein ganzes Gebäude beispielsweise mit *einer Kenngröße* zu beschreiben bzw. hinsichtlich *eines Zielkriteriums* zu optimieren. Allgemein gelten:

- Die *Hauptwohnräume* sind jeweils einzeln zu untersuchen, denn die spezielle Geometrie, der Aufbau der opaken Raumumfassungen, die Ausrichtung der Außenbauteile, der Gesamtenergiedurchlassgrad sowie die Verschattungsmöglichkeit der transparenten Bauteile, die typische Raumnutzung usw. nehmen entscheidenden Einfluss auf die charakteristischen Größen.
- Als *charakteristische Größen* gelten der zeitabhängige Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf oder bei passiver Raumnutzung der sich einstellende Raumtemperaturverlauf 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.
- Die *Randbedingungen für die Simulation* sollten in der Regel mittlere meteorologische Extremwerte darstellen, deren Verläufe (sogenannte Designdays) an mindestens drei aufeinander folgenden Tagen gelten. Die Auswertung der charakteristischen Größen erfolgt jeweils für den letzten Tag, um von einem angenähert eingeschwungenen Zustand auszugehen.
- Empfohlen werden Simulationen unter den bereits vorgestellten Bedingungen, wobei aus den Ergebnissen bedeutsame Schlüsse gezogen werden können. Sie seien in Kurzform genannt:
  - *Heizlast bei konstanter Auslegungsaußentemperatur ohne Besonnung und innere Last*

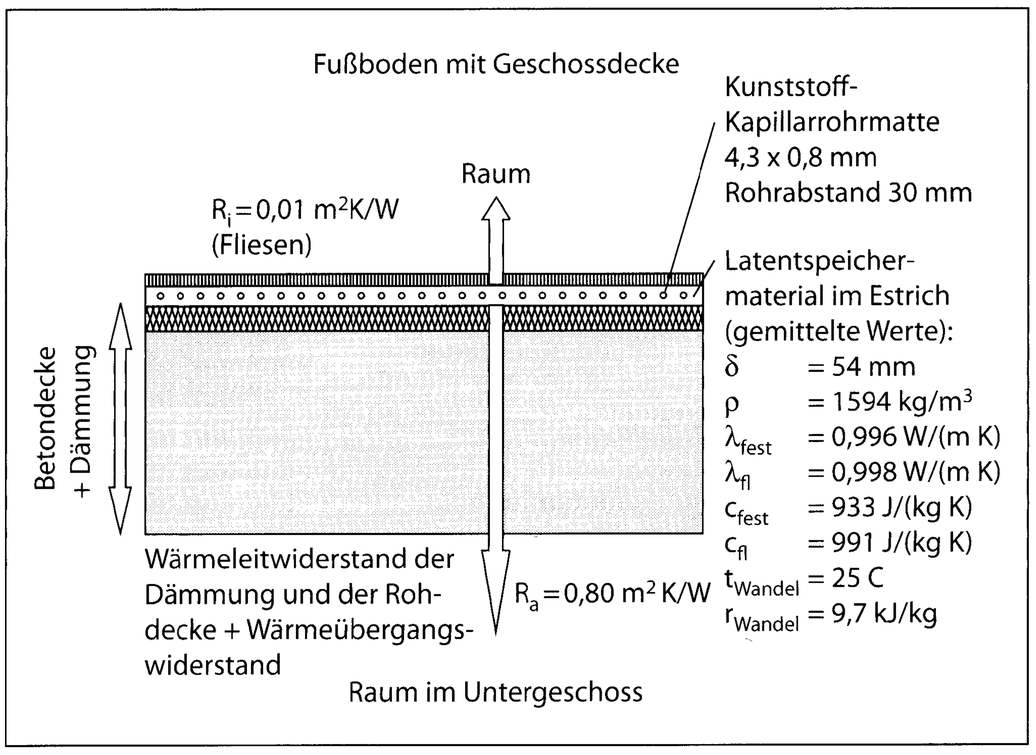

Bild 17. Fußboden mit Latentspeicherschicht [*Beispiel 8*].
Das Rohrregister wird von 2^{00} Uhr bis 7^{00} Uhr mit einem Wasserstrom beaufschlagt. Die Wassereintrittstemperatur beträgt 19 °C und kann somit einer Umweltwärmesenke entnommen werden. Einsetzbar wären beispielsweise Erdkollektoren, ein Kleinstkühlturm u. a. m.

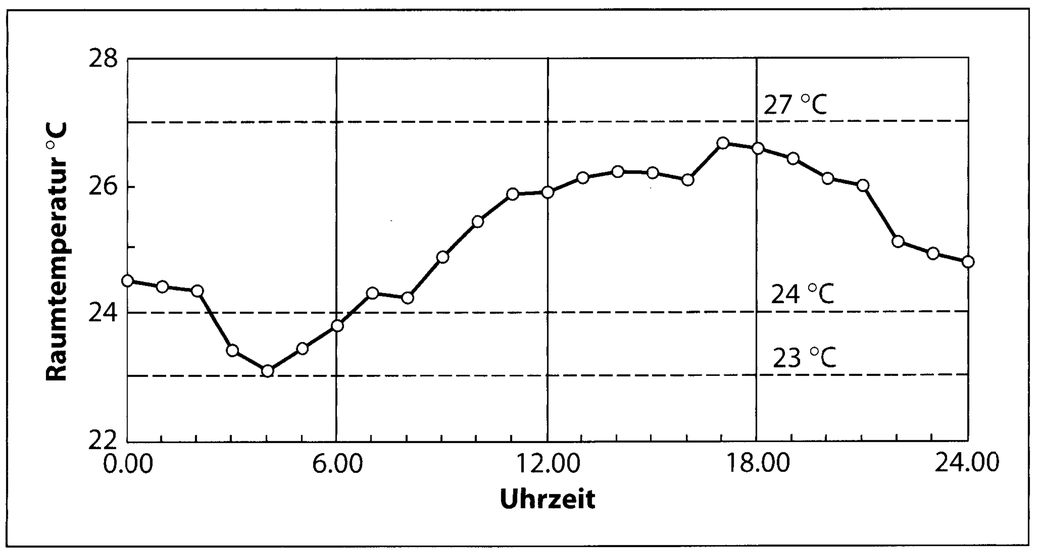

Bild 18. Empfindungstemperatur im Modellraum mit Massivspeicherbauteilen (Außen- und Innenwände, Decke gemäß *Beispiel 2*, thermisch aktiver Fußboden mit Latentspeicherschicht nach *Bild 17* sowie t_{Wandel} = 25 °C) bei zeitweiser Verschattung der Fenster gemäß *Bild 13* und Beladung des Aktivsystems von 2^{00} Uhr bis 7^{00} Uhr [*Beispiel 8*].

⇒ Aussage zum Dämmstandard und Beurteilung der unterschiedlichen Heizungsanlagen

- *heiterer Wintertag im Februar mit Verläufen der Außentemperatur und der Gesamtsonnenstrahlung nach DIN 4710 sowie einer definierten inneren Last*
  ⇒ Bewertung der nutzbaren solaren Gewinne und der Wärmespeicherfähigkeit des Raumes
- *heiterer Sommertag mit den Belastungen wie vorstehend, jedoch für Juli*
  ⇒ Beurteilung der nächtlichen freien Kühlung und der Wärmespeicherfähigkeit des Raumes
- *Extremsommertag mit den Belastungen wie „heiterer Sommertag", jedoch erhöhte Lufttemperatur, die sich an dem stündlichen Spitzenwert nach DIN 4710 orientiert.*
  ⇒ Charakterisierung des Zusammenwirkens von Nachtlüftung und spezieller Zusatzkühlung mit Umweltenergie, Wärmespeicherfähigkeit des Raumes sowie Wirksamkeit der Verschattung.

– Die Untersuchungsergebnisse dienen der *direkten Bewertung,* haben aber auch das Ziel, mittels Parametervariationen *Optimierungen* mit unterschiedlichen Aufgabenstellungen durchzuführen. Die *Beispiele 1 bis 5* zeigten, wie an einem heiteren Februartag durch bautechnische Verbesserungen (z. B. Erhöhung der Speicherfähigkeit) und spezielle Verschattungen behagliche Verhältnisse ohne Energiezufuhr erreichbar sind. Die *Beispiele 6 bis 8* verdeutlichen den Vorteil der Wärmespeicherkapazität auch unter sommerlichen Bedingungen usw.

– Spezielle Untersuchungen zur *Raumumnutzung* könnten aus [4] abgeleitet werden.

– Die *Ergebnisbeurteilung* besitzt zum Teil eine *subjektive Prägung.* Dies ist nach Ansicht des Verfassers kein grundsätzlicher Nachteil, zeigen die Ergebnisse der Designdays doch die Möglichkeiten die das Gebäude mit bestimmten Anlagentechniken bietet und welche eventuellen Einschränkungen damit verbunden sind. Der reduzierte Wärmeeintrag muss beispielsweise mit kleineren Fenstern, geringerem Gesamtstrahlungsdurchlasskoeffizienten und/oder stringenter Verschattung erkauft werden. Die Simulation der ausgewählten Designdays kann als *„Probefahrt im Jahresgang"* verstanden werden, um die Stärken, Schwächen aber auch Möglichkeiten des Wohnraumes bzw. Gebäudes auszutesten. Analog dazu wird dem Automobilinteressierten bei der Probefahrt auch deutlich, ob flotte Überholmanöver möglich sind, welcher Treibstoffverbrauch und Geräuschpegel daraus resultieren usw.

  Demgegenüber reicht die Angabe statistischer Mittelwerte allein nicht aus, um die Eigenschaften des Gebrauchsgegenstandes zu charakterisieren. Niedrigenergiehäuser in „schwerer" und „leichter" Bauweise können z. B. den gleichen Heizenergiebedarf besitzen, aber völlig unterschiedliche thermische Zustände im Sommer oder bei der Raumumnutzung.

– Der *zukünftige Materialeinsatz* in Wohnbauten bedarf dringend des differenzierten Vergleichs. Wenn beispielsweise die ökologisch günstige *Holzbauweise der Ziegelmassivbauweise* gegenübergestellt wird, dann sind auch die Ergebnisse ausgewählter winter- und sommerlicher Lastfälle zu untersuchen. Holzbauten gibt es in sehr unterschiedlichen Konstruktionen. Das wärmetechnische Verhalten könnte z. B. durch Einsatz von Fußböden oder Wänden mit Latentspeichermaterialien optimiert werden.

– Neuartige Materialien oder thermisch aktive Bauteile sind im *Normenwerk* zur gegebenen Zeit zu ergänzen. Die Art ihres Einbeziehens setzt umfassende Untersuchungen – beispielsweise mit dem vorgeschlagenen Simulationsmodell – voraus, um vereinfachte Korrelationen für die „wirksame Wärmespeicherfähigkeit" zu finden, die analog der jetzigen für Massivbauteile zu handhaben sind.

Der Verfasser würde sich freuen, wenn die vorgestellten Überlegungen zu einer intensiven Diskussion führten, in deren Ergebnis ein umfassender Standard für die Bewertungskriterien von Wohnbauten stünde.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. http://www.rom-umwelt-stiftung.de.

[2] *Glück, B.:* Dynamisches Raummodell (Kurzfassung), erscheint in Heizung-Lüftung-Haustechnik 2005.

[3] *Glück, B.:* Modellierung der instationären Wärmeleitung mit Phasenwechsel für ein neues Raumsimulationsmodell, Gesundheits-Ingenieur 126 (2005) H.1, S. 1–11.

[4] *Glück, B.:* Luftheizung oder wasserbeaufschlagte Flächenheizung in Gebäuden mit niedrigem Heizwärmebedarf? Gesundheits-Ingenieur 122 (2001) H. 4, S. 179–188.

[5] Ein Vorschlag zur verbesserten Darstellung und Messung der operativen Raumtemperatur. Erscheint im Gesundheits-Ingenieur 2005.