

Forschungskomplex

**EFFIZIENTER
UMWELTENERGIEEINSATZ
BEI WOHNBAUTEN**

Forschungsthema

**WÄRMETECHNISCHER VERGLEICH
AUSGEWÄHLTER BAUTECHNIKEN
UND BETRIEBSWEISEN VON WOHNBAUTEN**

Kurzbericht

Herbst 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Definition der Entwurfstage	3
3	Testraum und modellierte Heiz- Kühlanlage	7
4	Simulationsmodell und -durchführung	7
5	Zusammenfassung der Simulationsbedingungen	8
6	Bauweisen und Hauptergebnisse	10
7	Diskussion der Hauptergebnisse im Vergleich	18
8	Besonderheiten beim thermischen Verhalten der Raumumfassungen	24
9	Einfluss der Phasenwandeltemperatur	29
10	Einfluss der Phasenwandelenthalpie	30
11	Variation der Originalbauweisen	32
12	Variation der Randbedingungen	36
13	Wärmephysiologische Behaglichkeit	39
14	Fazit	40
	Literaturzusammenstellung	42

Außer diesem Kurzbericht liegt ein ausführlicher Forschungsbericht (335 Seiten) mit Anhängen (517 Seiten) vor.

Der Forschungsbericht ist veröffentlicht:

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

<http://www.berndglueck.de/Bautechniken>

Die Untersuchung wurde von der ROM-Umwelt-Stiftung initiiert und gefördert, wofür sich der Autor herzlich bedankt.

Besonderer Dank gebührt dem Projektleiter Herrn BURKHARD HEYDEN, der als Architekt bei der thematischen Bearbeitung stets ein sehr wertvoller Gesprächspartner war.

Wohnbauten verkörpern einen sehr hochwertigen Gebrauchsgegenstand, dessen thermisch-energetische Nutzeigenschaften für ein ganzheitliches Urteil über den gesamten Jahresgang zu bewerten sind. Für vier ausgewählte Entwurfstage werden mit Hilfe des "Dynamischen Raummodells" [1, 2] unterschiedliche Beton-, Ziegel- sowie Holzleicht- und Massivholzbauweisen untersucht. Ergänzend kommen bei den Holzbauten Latentspeichermaterialien – sogenannte PCM – zum Einsatz. Die den Entwurfstagen zugeordneten Hauptkriterien werden in übersichtlichen Diagrammen gegenübergestellt.

1 Einführung

Zur technischen Charakterisierung eines Autos, das gegenüber einem Wohngebäude nur einen sehr kurzlebigen Gebrauchsgegenstand verkörpert, gibt man vielseitige Kriterien (Motorleistung, Drehmoment, Kraftstoffverbrauch, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsverhalten, Zuladung usw.) an. Demgegenüber sind die technischen Angaben für Wohnbauten mehr als spärlich. Die zwar umfangreichen Normen orientieren primär auf einen niedrigen Jahresenergiebedarf bzw. Jahresprimärenergiebedarf bei üblicher Nutzung. Sekundär versuchen sie, unzumutbare Raumtemperaturen im Sommer ohne das Wirken von Kühlanlagen zu vermeiden.

Wohnbauten in unseren Breiten sind sehr wechselnden meteorologischen Randbedingungen ausgesetzt, sodass die bau- und anlagentechnischen Kombinationen oftmals nur während begrenzter Zeitabschnitte sinnvoll arbeiten. In der übrigen Zeit können die getroffenen Maßnahmen sogar kontraproduktiv wirken. So ist z. B. der solare Energieeintrag über große transparente Raumumfassungen im Winter energetisch sehr positiv, aber bereits an heiteren Frühlingstagen muss ein Teil der "nicht nutzbaren solaren Gewinne weggelüftet" werden, was oftmals mit Behaglichkeitsdefiziten verbunden ist.

Während im Norden Europas die Gebäude vornehmlich eine wirkungsvolle Wärmedämmung und im Süden eine große Wärmespeicherfähigkeit besitzen müssen, bedarf es hierzulande der "richtigen Mischung" aus beiden Eigenschaften. Die vorrangige Entwicklung der Gebäudedämmung, die durch die Energieeinsparverordnungen befördert wurde, vernachlässigte die Wärmespeicherkapazität der Raumumfassungen. Der Einsatz von Latentspeichermaterialien (PCM) – beispielsweise durch mikroverkapselte Paraffine in Putzen und Bauplatten – soll diesen Nachteil beheben. Die Werbung vergleicht die Wärmespeicherkapazitäten von PCM-Bauplatten mit denen bestimmter Beton- oder Ziegelwanddicken und suggeriert beim Einsatz dieser Produkte auch das analoge energetische Verhalten und eine vergleichbare thermische Behaglichkeit wie in konventionellen Bauten. Wie gezeigt wird, sind diese Eigenschaften aber nicht a priori in derselben Weise gegeben, da die Phasenwandeltemperatur entscheidenden Einfluss nimmt.

2 Definition der Entwurfstage

Um die wärmetechnischen Eigenschaften der zu untersuchenden Gebäude zu demonstrieren, werden vier Entwurfstage – je zwei Winter- und Sommertage – definiert. Generell werden die Außentemperaturen für den Standort Kassel und die Gesamtstrahlungsdaten für 50° nördlicher Breite jeweils nach DIN 4710:2003-01 verwendet. Es gelten die nachfolgenden Detaillierungen.

Entwurfstag 1:

Es handelt sich um einen Wintertag (Auslegungsfall) bei statistisch tiefster, konstanter Außenluft-

temperatur von -12 °C nach EN 12831: 2004, Beiblatt 1 ohne Besonnung und ohne innere Last. Die Raumtemperatur beträgt durchgehend 22 °C . Für den Außenluftwechsel gilt $0,5\text{ h}^{-1}$. Das Simulationsergebnis liefert Aussagen zum Dämmstandard und zur Bewertung von möglicherweise unterschiedlichen Heizungsanlagen. Die **bodenflächenbezogene Heizlast** stellt das Hauptkriterium dar.

Entwurfstag 2:

Untersucht wird ein heiterer Februartag. Es gelten der zugehörige Außenlufttemperaturverlauf und die Gesamtsonnenstrahlung am 20. Februar beim Trübungsfaktor $T_L = 4,1$ (Monatsmittelwert) nach Bild 1 sowie die definierte innere Last gemäß Bild 2. Eine Minderung der Solarstrahlung durch Verschattungseinrichtungen erfolgt nur im Sonderfall beim Anstieg der Raumtemperatur auf $>25\text{ °C}$. Die Mindestwerte der Raumtemperatur betragen tags ($7^{00} \dots 22^{00}$ Uhr) 22 °C und nachts 18 °C . Sie werden durch eine Heizungsanlage garantiert. Der Außenluftwechsel von $0,5\text{ h}^{-1}$ gelte ganztägig. Mit dem Simulationshauptergebnis – **täglicher Heizenergiebedarf** – lassen sich indirekt auch die nutzbaren solaren Gewinne und die Wärmespeicherfähigkeit des Raumes bewerten.

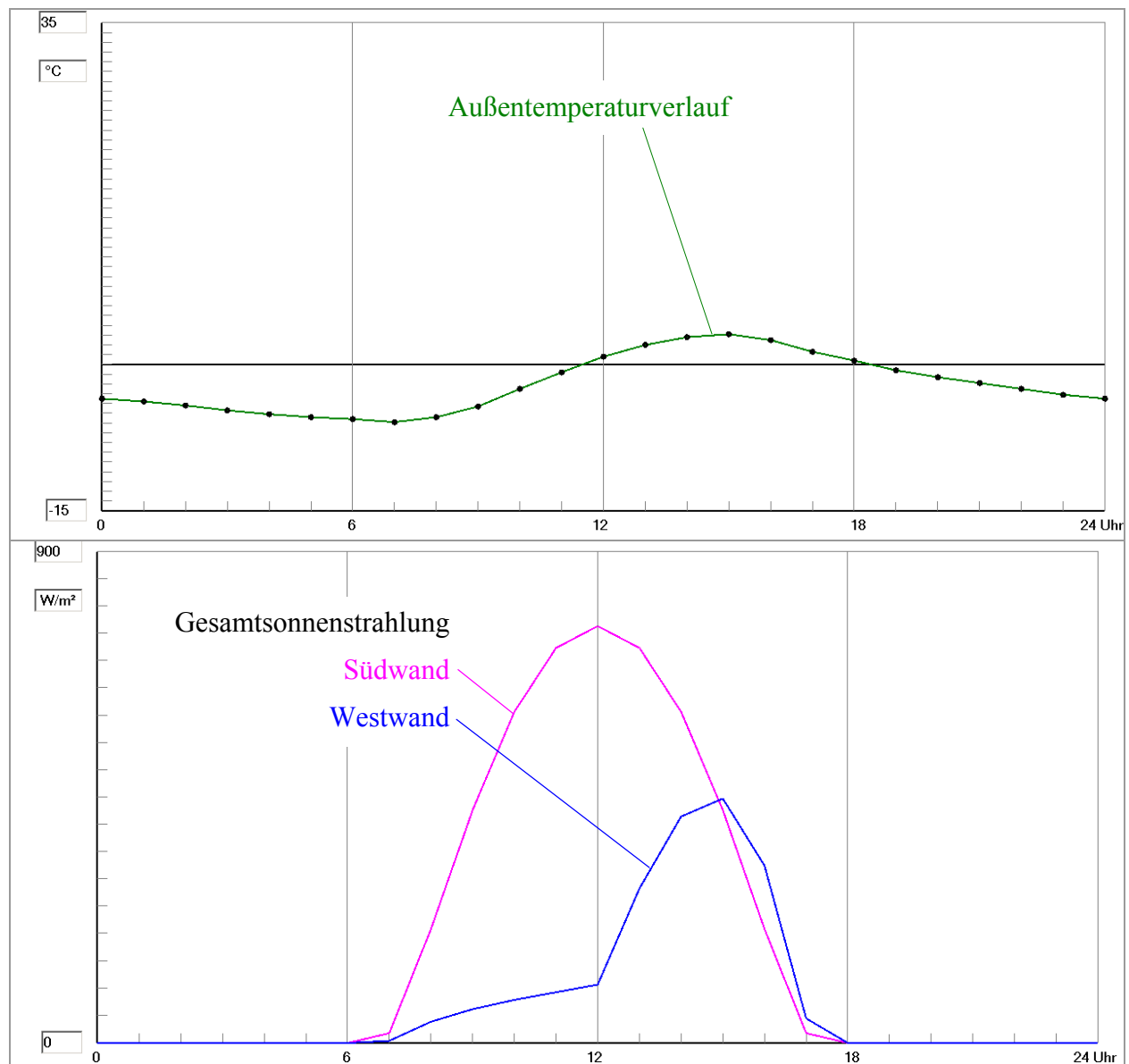


Bild 1 Meteorologische Daten für den Entwurfstag 2 (heiterer Februartag)

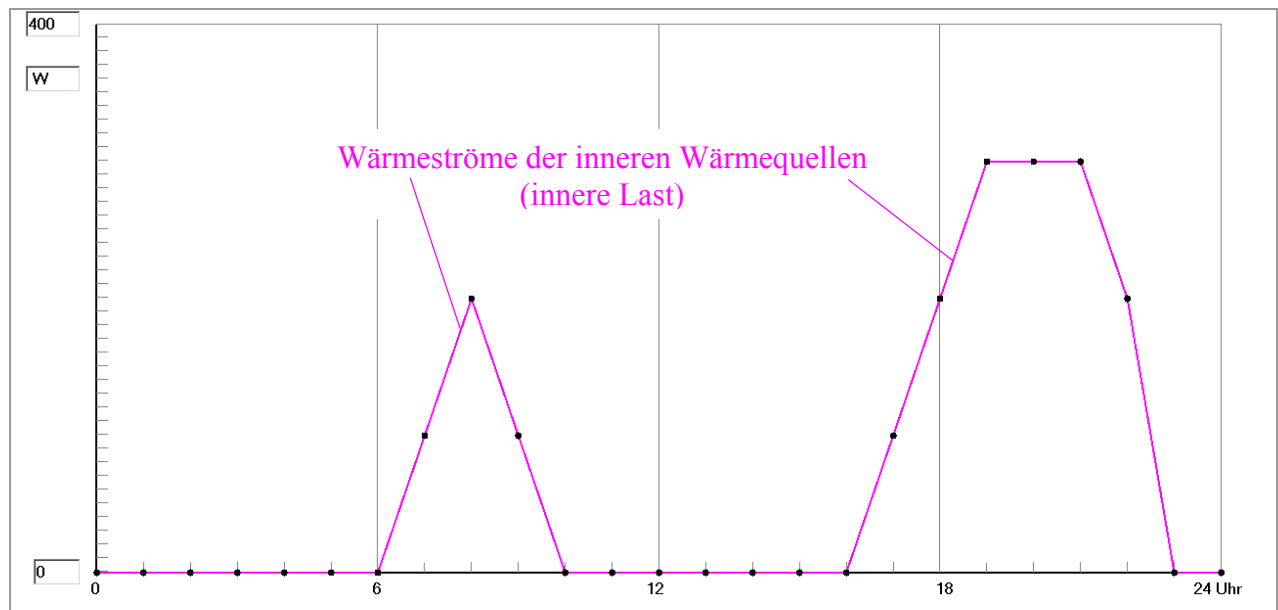


Bild 2 Zeitlicher Leistungsverlauf der inneren, standortlosen Konvektionswärmequellen

Entwurfstag 3:

Es wird ein heiterer Julitag betrachtet. Die zugehörige Außenlufttemperatur und die Gesamtsonnenstrahlung am 23. Juli beim Trübungsfaktor $T_L = 4,3$ (Monatsmittelwert *minus* Standardabweichung $\equiv$ höchste Einstrahlung) sind Bild 3 zu entnehmen. Es erfolgt keine Verschattung durch Sonnenschutzvorrichtungen und die Raumtemperatur schwingt vollkommen frei (kein Anlagenbetrieb). Das innere Wärmeaufkommen entspricht wiederum Bild 2. Für den Außenluftwechsel gelten am Tage (9⁰⁰ ... 18⁰⁰ Uhr) der Mindestwert 0,5 h⁻¹ und außerhalb dieser Zeit zur intensiven Nachtkühlung 2 h⁻¹. Mit dem Simulationsergebnis lassen sich die Wirksamkeit der nächtlichen freien Kühlung, die Wärmespeicherfähigkeit der Raumumfassungen sowie die Fenstergrößen und Glaseigenschaften beurteilen. Als Hauptergebnis werden die Raumtemperaturüberschreitungen bezogen auf 26 °C ermittelt und mit der Stundenzahl multipliziert. Das Produkt – **Tageshochgradstunden** – beinhaltet somit eine Aussage über die zu erwartende thermische Behaglichkeit im Sommer.

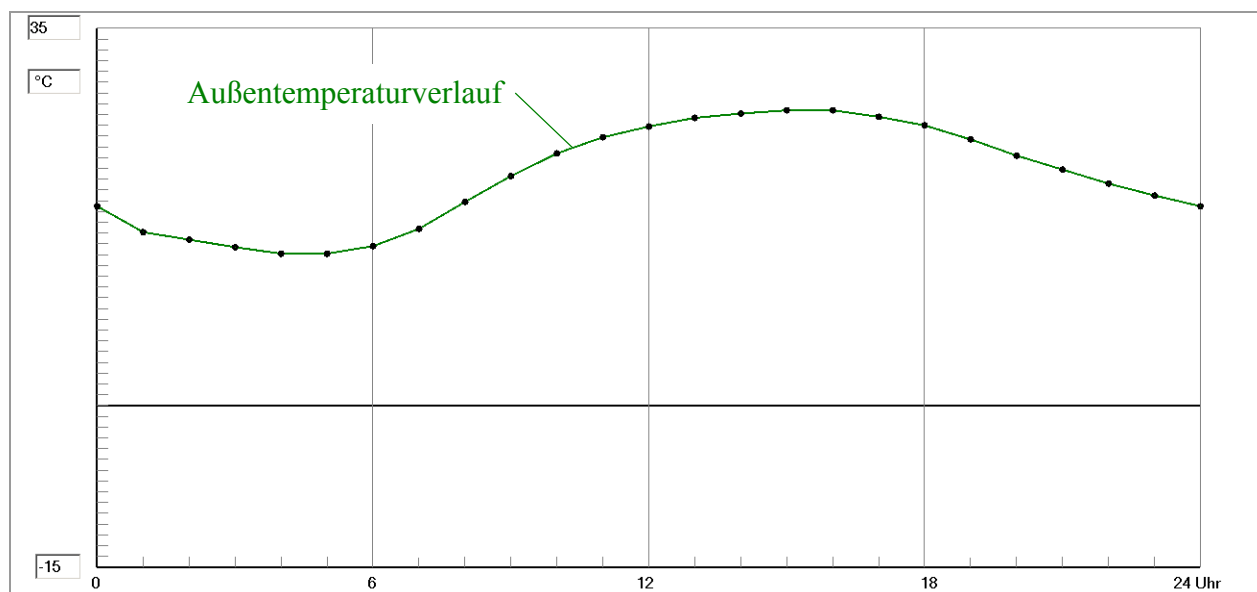
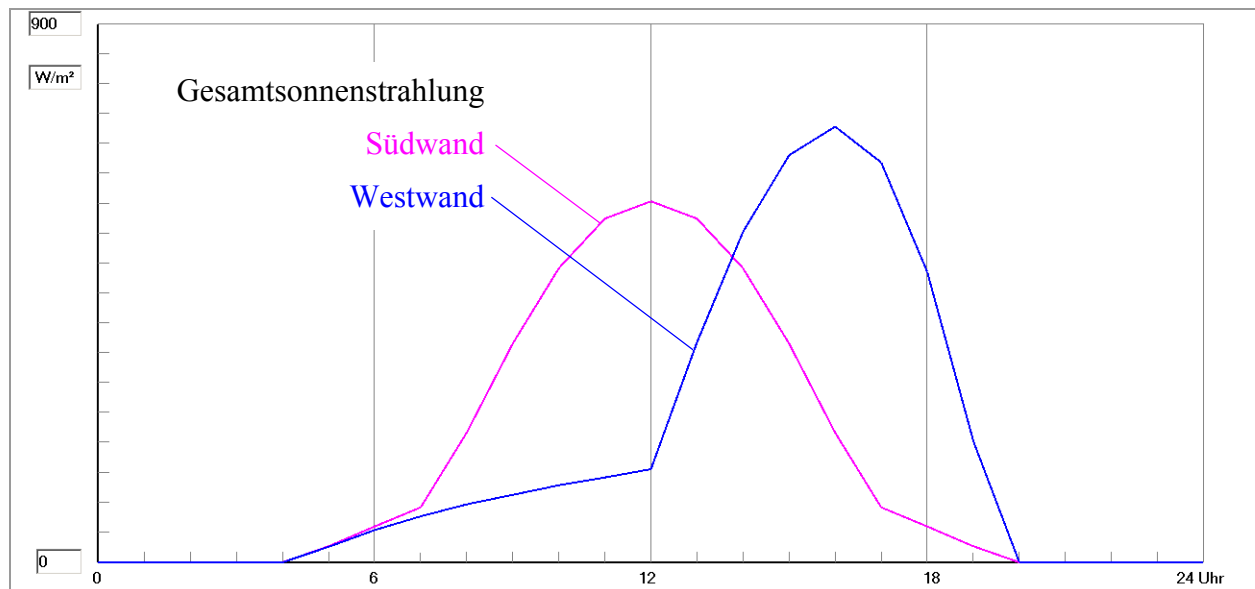


Bild 3 Meteorologische Daten für den Entwurfstag 3 (heiterer Julitag) [Fortsetzung auf nächster Seite]



Entwurfstag 4:

Hiermit wird ein extremer Sommertag im Juli kreiert, an dem die Gesamtsonnenstrahlung dem Maximum gemäß Bild 3 entspricht. Es werde jedoch eine intensive Verschattung vorgenommen, bei einer flächenorientierten Gesamtstrahlung von $>150 \text{ W/m}^2$ gelte der Minderungsfaktor $F_C = 0,2$. Damit ergibt sich die solare Belastung auf die transparenten Flächen nach Bild 4. Der Lufttemperaturverlauf ist synthetisch erstellt, wobei dieser sich an dem stündlichen Spitzenwert nach DIN 4710:2003-01 für Kassel orientiert (Bild 4). Die innere Last folgt wieder Bild 2. Der Außenluftwechsel beachtet den hohen Außentemperaturverlauf und ist gegenüber dem Entwurfstag 3 verändert. Am Tage wirkt der Mindestwert von $0,5 \text{ h}^{-1}$ länger ($8^{00} \dots 21^{00}$ Uhr), wodurch sich die Zeit mit dem Außenluftwechsel von 2 h^{-1} zur wirkungsvollen Nachtkühlung verkürzt. Die Raumtemperatur darf während der täglichen Nutzzeit ($7^{00} \dots 22^{00}$ Uhr) 26°C nicht übersteigen. Zur Einhaltung dieses Grenzwertes wird eine Raumkühlung aktiviert. Gegen diese ist grundsätzlich nichts einzuwenden, wenn die installierte Heizungsanlage oder Teile dieser (z. B. thermisch aktive Flächen) Verwendung finden und Umweltenergiequellen genutzt werden.

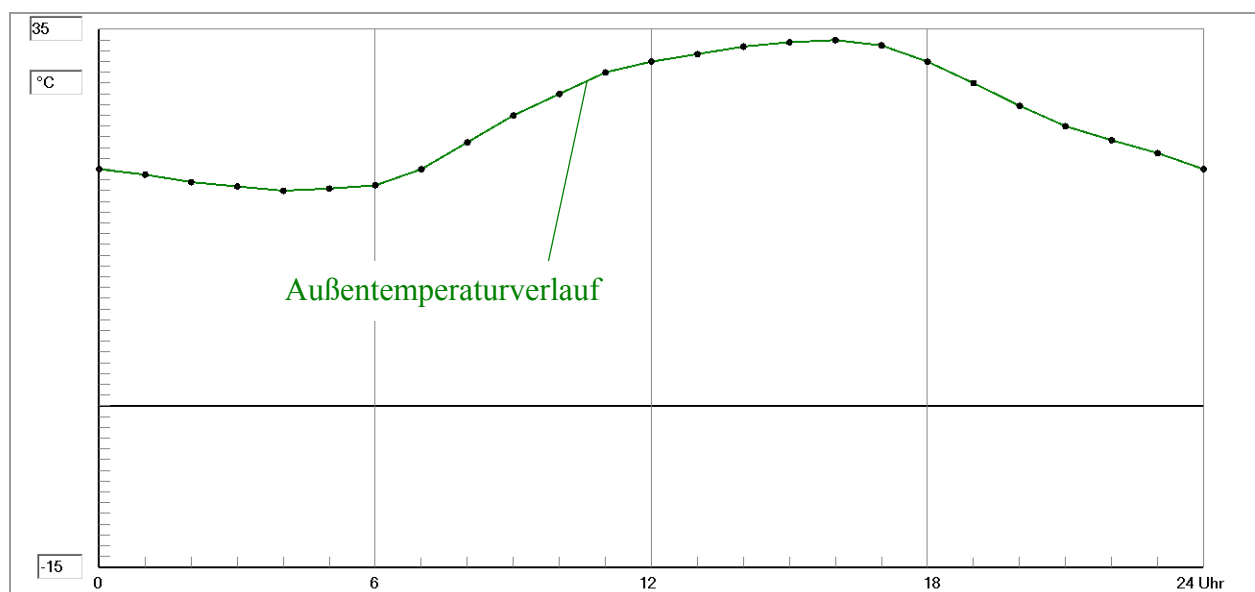
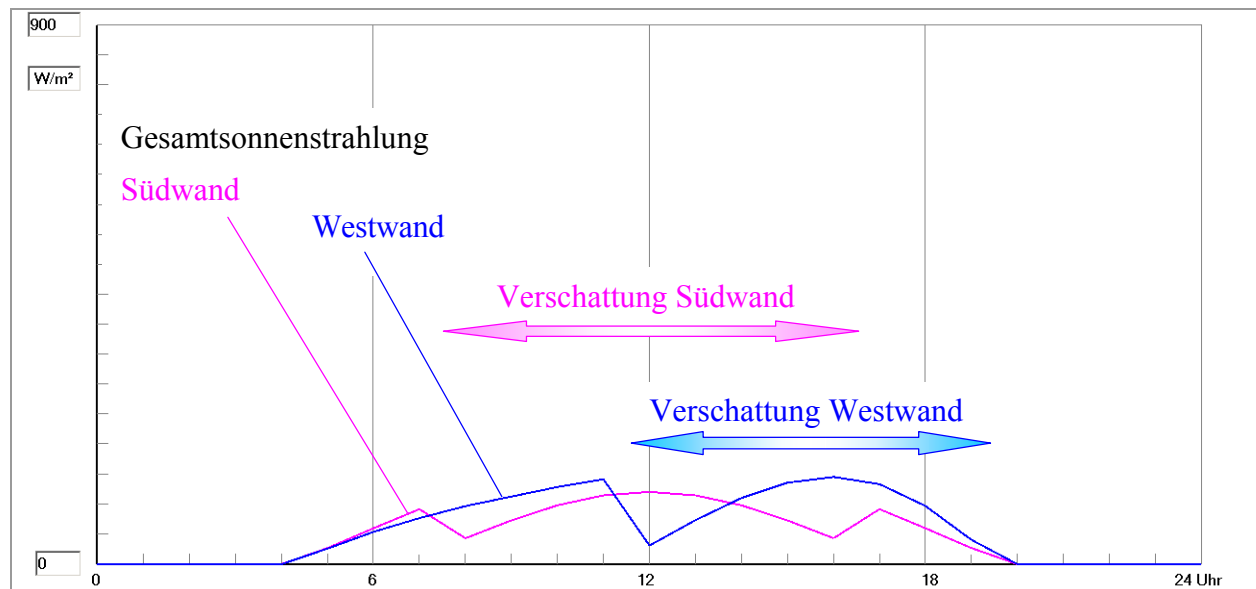


Bild 4 Meteorologische Daten für den Entwurfstag 4 (extremer Sommertag) [Fortsetzung auf nächster Seite]



Ob diese Möglichkeiten gegeben sind, hängt vor allem von der Größe des Tageskühlbedarfs beim Wirken der intensiven Verschattung ab. Der **bodenflächenspezifische Tageskühlbedarf** wird deshalb als Hauptkriterium der Simulation ermittelt.

3 Testraum und modellierte Heiz- Kühlanlage

Als Testraum für die umfassenden wärmetechnischen Simulationen wird das **Wohnzimmer** in einer Doppelhaushälfte gewählt (Bild 5). Neun unterschiedliche Raumumfassungsarten finden Beachtung: Süd-Außenwand, West-Außenwand, Trennwand zur benachbarten Doppelhaushälfte mit Schallschutz für gereichte Häuser nach DIN 4109, Innenwand, Treppenhauswand, Boden (Decke zum Kellergeschoss), Decke (Decke zum Obergeschoss), Fenster und Terrassentüre, Innentüren. Allen zu simulierenden Bauweisen wird die im Bild gezeigte **einheitliche Raumgeometrie** zugrunde gelegt. Zur eindeutigen Ergebnisbewertung der unterschiedlichen Bauweisen kommt in den nachfolgenden Beispielfällen ein **einfaches Luftheiz- und -kühlsystem** zum Einsatz, dass den gesamten Wärmestrom rein konvektiv und über alle Zonen gleichverteilt dem Raum zu- bzw. abführt. Selbstverständlich können bei speziellen Untersuchungen auch andere Heiz-/Kühlsysteme – z. B. Fußbodenheizungen – berücksichtigt werden.

4 Simulationsmodell und -durchführung

Es wird das "Dynamische Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung" [1, 2] verwendet. Es kommt dabei die **stationäre Komplexsimulation** unter Beachten von **Latentspeichermaterial (PCM)** zum Einsatz, wobei das Verfolgen der Materialtemperatur und der Phasenzustände detailliert geschieht und deren grafische Darstellung ergänzt wurde. Die Flächenaufteilung der Umfassungen (Dreiecksdarstellung) sind Bild 5 zu entnehmen. Die höhenabhängige Lufttemperatur wird durch ein 10-Zonen Schichtmodell nachgebildet.

Die Simulation umfasst 91 Stunden (Start: 0⁰⁰ Uhr), die Zeitintervalle betragen 10 s. Als **Auswertzeitraum werden die 67. bis 91. Stunde** herangezogen (19⁰⁰ Uhr des 3. Tages bis 19⁰⁰ Uhr des 4. Tages). Die Heizlast des Entwurfstages 1 gilt am Simulationsende, die Hauptkriterien der Entwurfstage 2 bis 4 werden für die letzten 24 Stunden gebildet. Als Startbedingungen für die Raumumfassungen gelten: $t_{\text{Start}} = 22\text{ °C}$; $\text{Phase}_{\text{Start}} = 0$ (PCM liegt in der festen Phase vor).

Die Behaglichkeitsgrößen (Empfindungstemperatur, Strahlungstemperatur, Strahlungstemperatur-Asymmetrie, vertikaler Lufttemperaturgradient) können am Ende der Simulationszeit bestimmt werden. Deshalb wurde das Ende der Simulation auf 19⁰⁰ Uhr (Hauptnutzzeit des Raumes) gelegt.

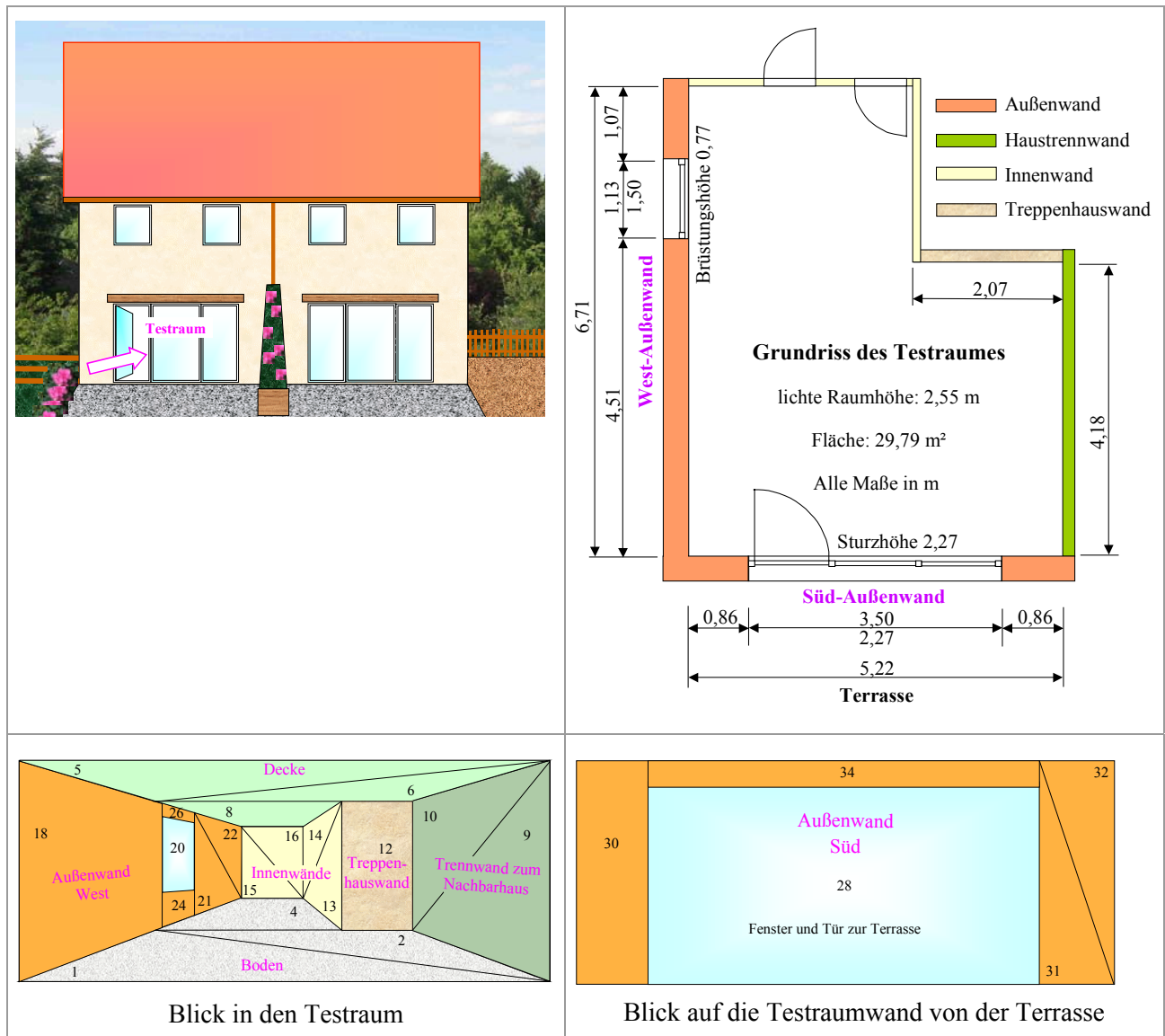
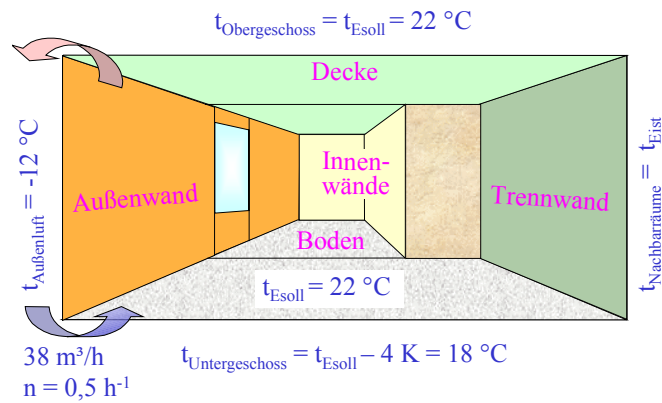


Bild 5 Ansicht des Doppelhauses, Grundriss des Wohnzimmers (Testraum) und Flächeneinteilung für die Simulation (Näherungsweise wird anstelle der beiden Innentüren die Fläche 16 wärmetechnisch wie eine Tür behandelt.)

Jede Rechteckfläche besteht aus zwei Dreiecken (zweite Nummer ist die ungerade Zahl vor der bezeichneten Fläche). Für die Rechteckflächen, die bereits in Dreiecke i zerlegt sind, erfolgen später detaillierte wärmetechnische Betrachtungen. Es repräsentieren: $i = 2$ Boden; $i = 6$ Decke; $i = 14$ Innenwand; $i = 10$ Trennwand; $i = 32$ Südaußenwand; $i = 22$ Westaußenwand.

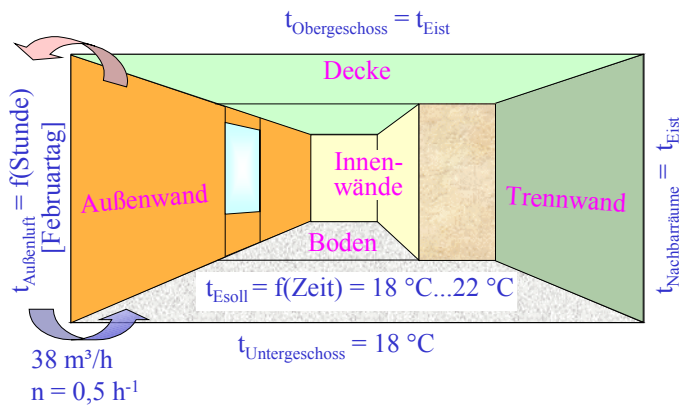
5 Zusammenfassung der Simulationsbedingungen

Die Außentemperatur-, Solarstrahlungs- und Wärmestromverläufe sind in Stundenintervallen vorgegeben und werden linear interpoliert. Der Zuluftvolumenstrom (Außenluftwechsel) ändert sich maximal zweimal pro Tag zur festen Stunde. Die Temperaturen der Nachbarräume sind fest vorgegeben oder an die Isttemperatur des Testraumes gekoppelt. Die Raumsolltemperatur kann als stündliche Angabe in Abhängigkeit der Regelungsart erfolgen. Die Zusammenfassungen dieser Daten sind geordnet nach Entwurfstagen den Bildern 6 bis 9 zu entnehmen.



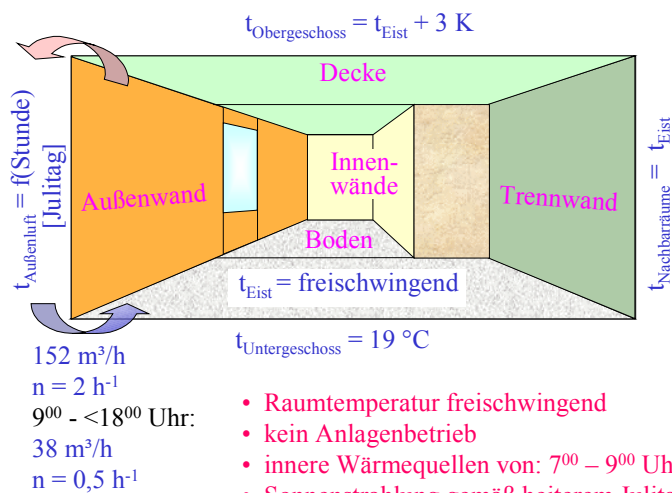
- Konvektionsheizung ganztägig
- keine inneren Wärmequellen
- keine Sonnenstrahlung
- keine Verschattung

Bild 6 Übersichtsinformation zum Entwurfstag 1



- Raumtemperatur nach oben freischwingend; Konvektionsheizung von:
 $7^{00} - 22^{00}$ Uhr, wenn Raumisttemperatur $< 22\text{ °C}$
in der Nachtzeit, wenn Raumisttemperatur $< 18\text{ °C}$
- innere Wärmequellen von: $7^{00} - 9^{00}$ Uhr und $17^{00} - 22^{00}$ Uhr
- Sonnenstrahlung gemäß heiterem Februartag
- Verschattung bei Raumisttemperatur $> 25\text{ °C}$

Bild 7 Übersichtsinformation zum Entwurfstag 2



- Raumtemperatur freischwingend
- kein Anlagenbetrieb
- innere Wärmequellen von: $7^{00} - 9^{00}$ Uhr und $17^{00} - 22^{00}$ Uhr
- Sonnenstrahlung gemäß heiterem Julitag
- keine Verschattung

Bild 8 Übersichtsinformation zum Entwurfstag 3

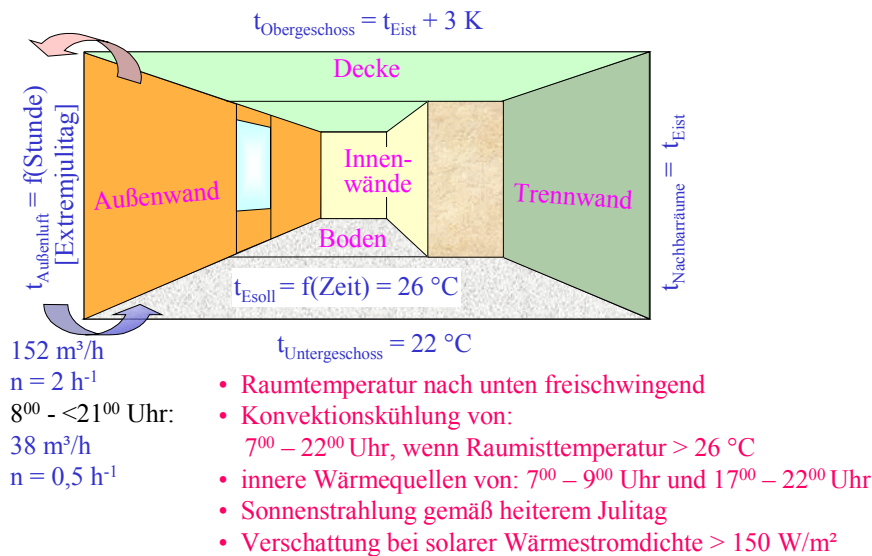


Bild 9 Übersichtsinformation zum Entwurfstag 4

6 Bauweisen und Hauptergebnisse

Es wurden **sechs unterschiedliche Bauweisen** untersucht. Die Wandaufbauten mit den verschiedenartigsten Materialien sind in Datenblättern zusammen mit den Hauptergebnissen dargestellt:

Bautyp 1 (Bild 10): Fertighaus in Massivbauweise (Beton)

Bautyp 2 (Bild 11): Fertighaus in Holzbauweise (Rahmen-/Tafelbau)

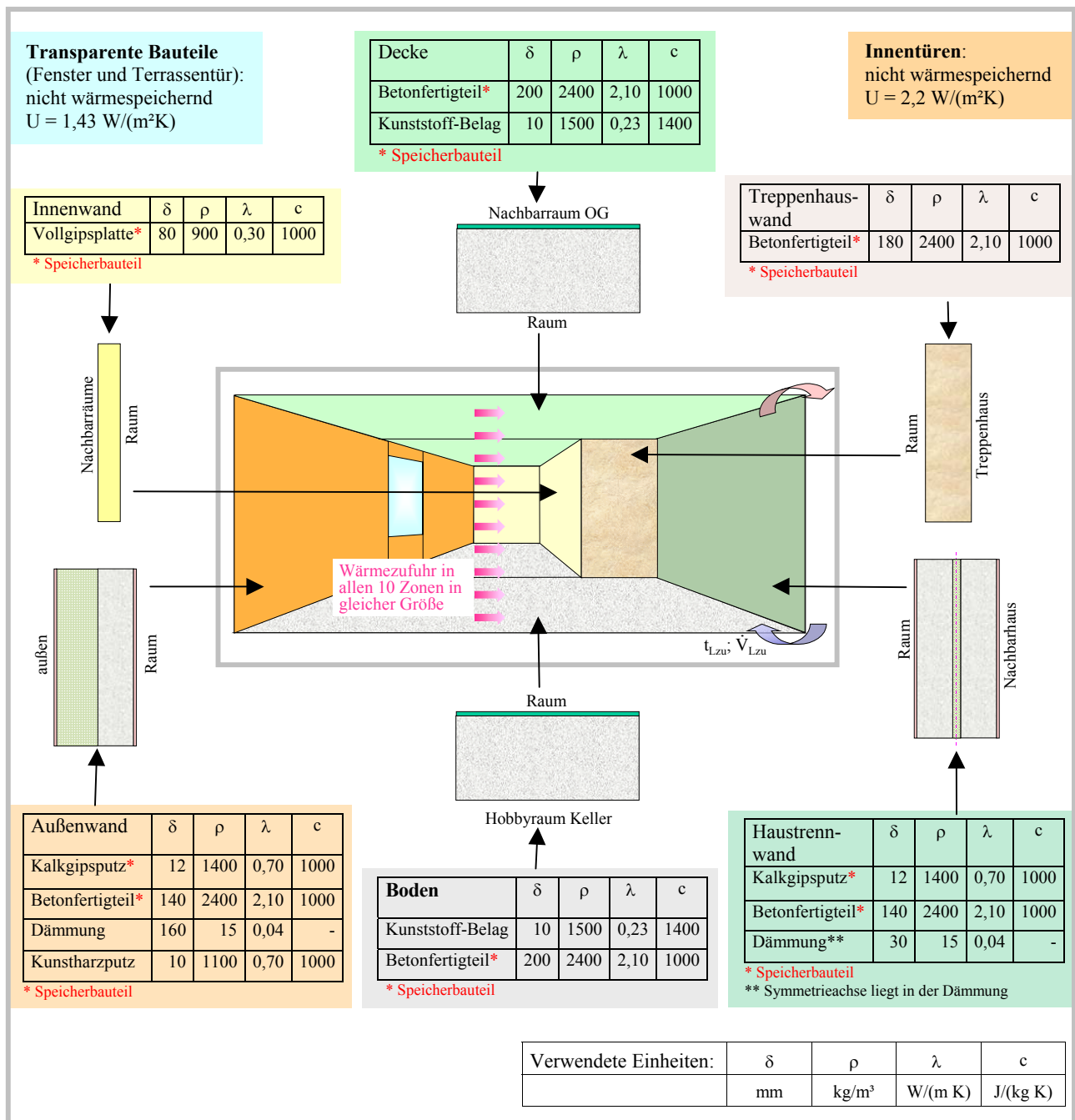
Bautyp 3 (Bild 12): Fertighaus in Massivholzbauweise

Bautyp 4 (Bild 13): Massivhaus in moderner Ziegelbauweise

Bautyp 5 (Bild 14): Fertighaus in Holzbauweise (Rahmen-/Tafelbau) mit PCM-Gipsbauplatte

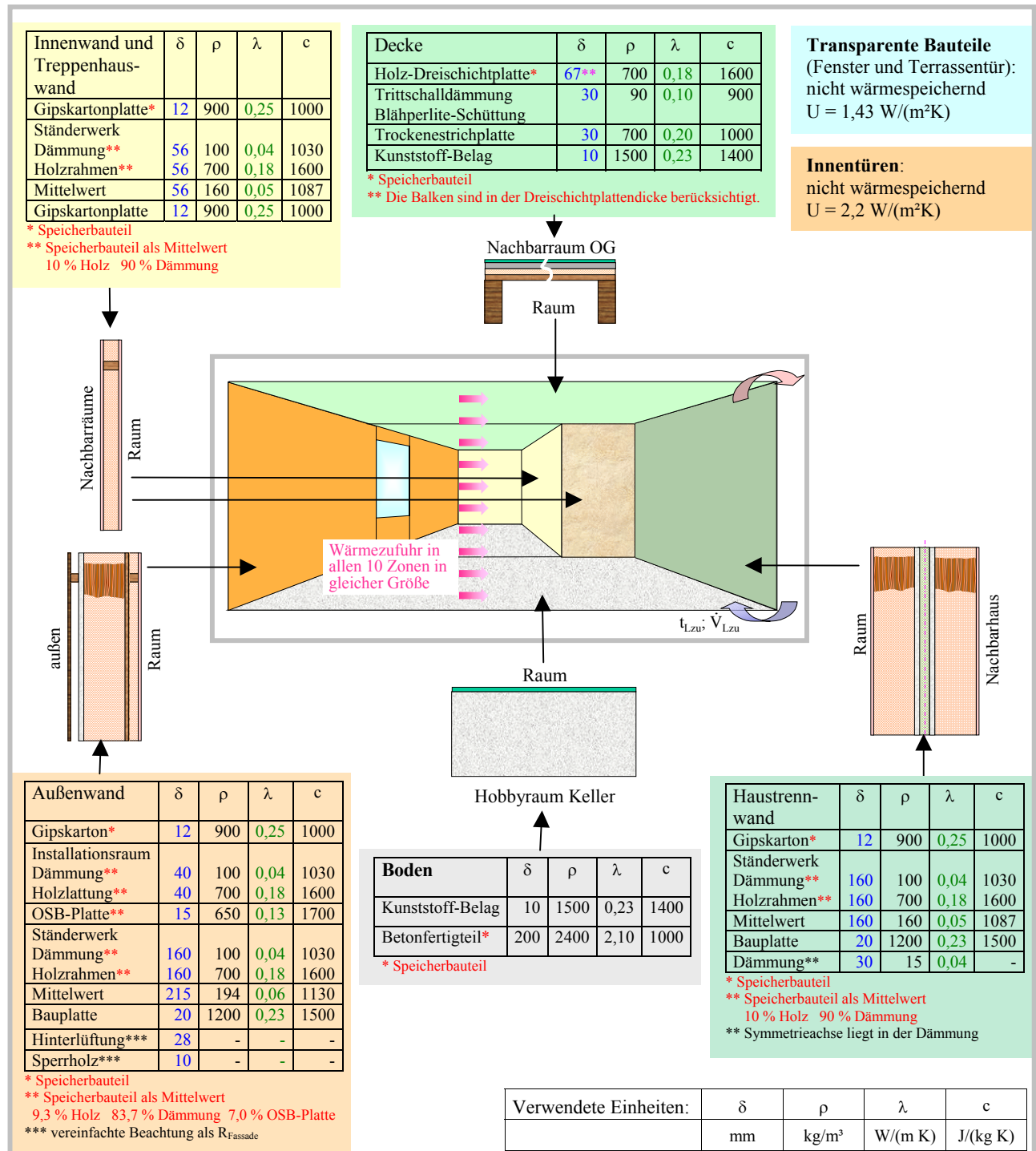
Bautyp 6 (Bild 15): Fertighaus in Massivholzbauweise mit PCM-Lehmhauplatte.

Ein gemeinsames Merkmal der Bautypen 1 bis 6 ist eine **gut wärmespeichernde Betondecke zum Kellergeschoss**, die nur mit einem raumseitigen Kunststoffbelag bedeckt, eine sehr gute thermische Ankopplung an den Raum gewährleistet. Sie bildet damit eine "große wärmetechnische Trägheit" im gesamten System der Raumumfassungen, die thermisch stabilisierend wirkt. Dieser Umstand sei besonders hervorgehoben, da dieses Faktum später noch eine Variation erfährt. Die Bautypen 2 und 5 (leichte Holzbauweise) unterscheiden sich nur durch die Substitution der 12 mm Gipskartonplatte durch eine spezielle 15 mm Gipsbauplatte mit PCM-Anreicherung. Diese Verkleidung betrifft alle Raumwände (Innen- und Außenwände). Analoges gilt für die Bautypen 3 und 6 (Massivholzbauweise) bei der die 30 mm Lehmhauplatte durch eine Lehmhauplatte mit PCM-Beimischung gleicher Dicke ersetzt wird. Die Bestückung mit der Lehmhauplatte betrifft aber nur die Außenwände und die Trennwand zum Nachbarhaus, nicht aber die dünnen Innenwände, die bei beiden Bautypen eine Holztäfelung besitzen. Kennzeichnend für die beiden Bautypen 5 und 6 ist die Verwendung von mikroverkapseltem Paraffin mit der Phasenwandeltemperatur von 25 °C (Bautyp 5) bzw. $25,5 \text{ °C}$ (Bautyp 6).

Bautyp 1: Fertighaus in Massivbauweise**Simulationsergebnisse für die Entwurfstage gemäß der definierten Hauptkriterien**

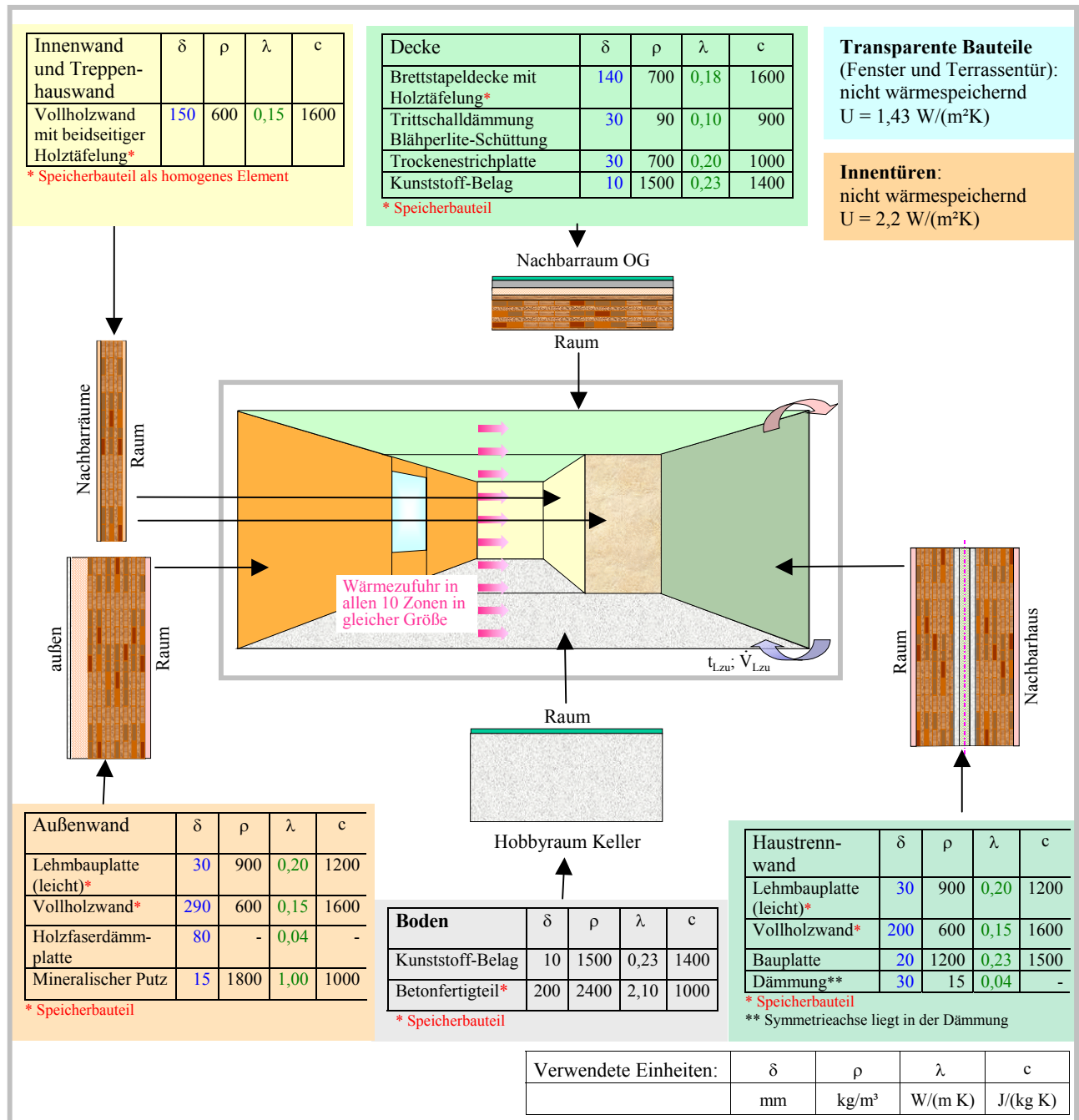
Entwurfstag 1 (Winter – Heizlast)	Entwurfstag 2 (heiterer Februartag)	Entwurfstag 3 (heiterer Julitag)	Entwurfstag 4 (Sommer – Extremtag)
Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
42,9 W/m ²	176,7 Wh/(m ² d)	3,5 Kh/d	52,1 Wh/(m ² d)

Bild 10 Raumumfassungen des Bautyps 1 und Simulationshauptergebnisse

Bautyp 2: Fertighaus in Holzbauweise (Rahmen-/Tafelbau)**Simulationsergebnisse für die Entwurfstage gemäß der definierten Hauptkriterien**

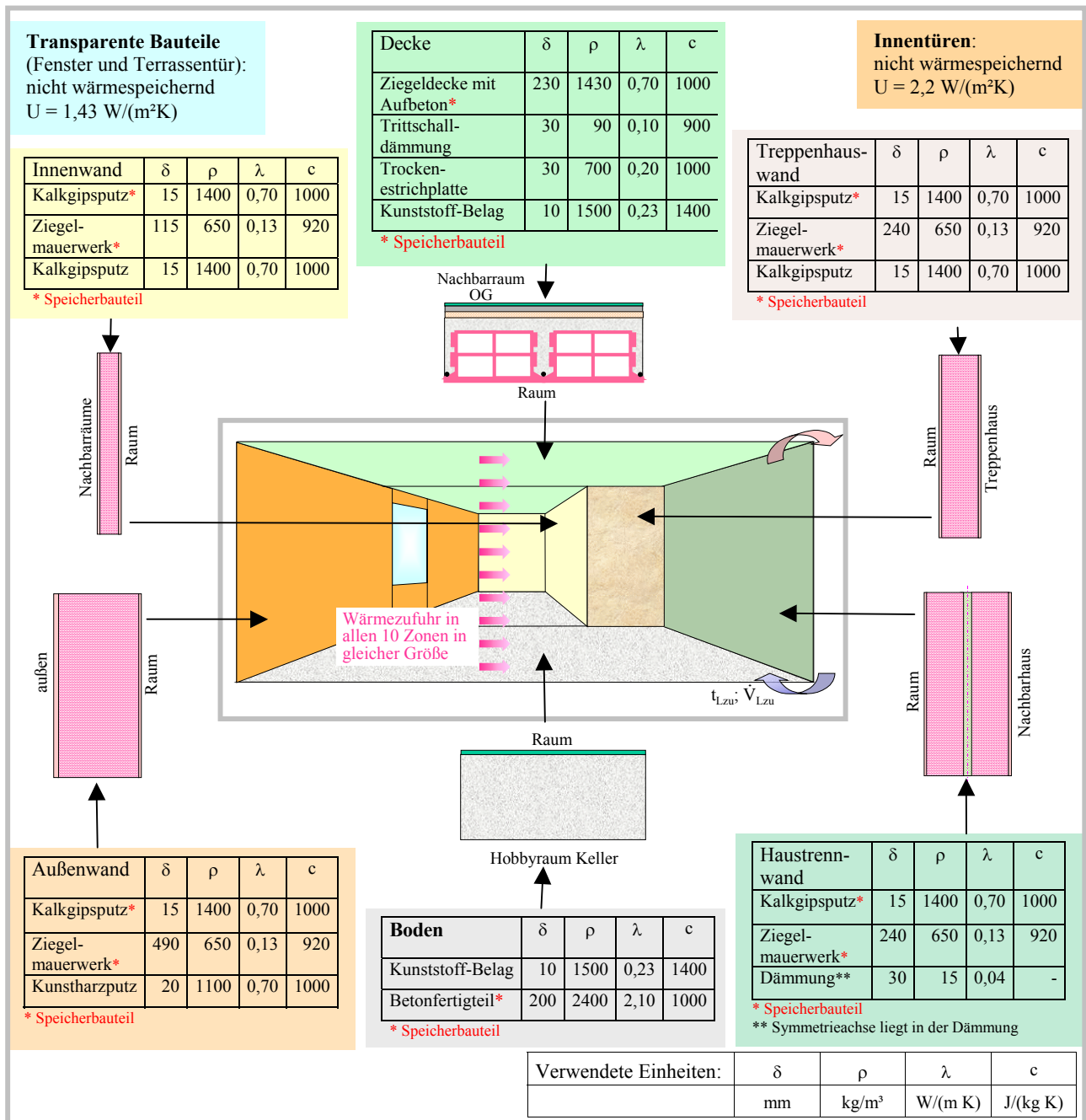
Entwurfstag 1 (Winter – Heizlast)	Entwurfstag 2 (heiterer Februartag)	Entwurfstag 3 (heiterer Julitag)	Entwurfstag 4 (Sommer – Extremtag)
Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
44,4 W/m ²	153,4 Wh/(m ² d)	25,2 Kh/d	76,4 Wh/(m ² d)

Bild 11 Raumumfassungen des Bautyps 2 und Simulationshauptergebnisse

Bautyp 3: Fertighaus in Massivholzbauweise**Simulationsergebnisse für die Entwurfstage gemäß der definierten Hauptkriterien**

Entwurfstag 1 (Winter – Heizlast)	Entwurfstag 2 (heiterer Februartag)	Entwurfstag 3 (heiterer Julitag)	Entwurfstag 4 (Sommer – Extremtag)
Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
42,8 W/m ²	104,2 Wh/(m ² d)	11,8 Kh/d	36,7 Wh/(m ² d)

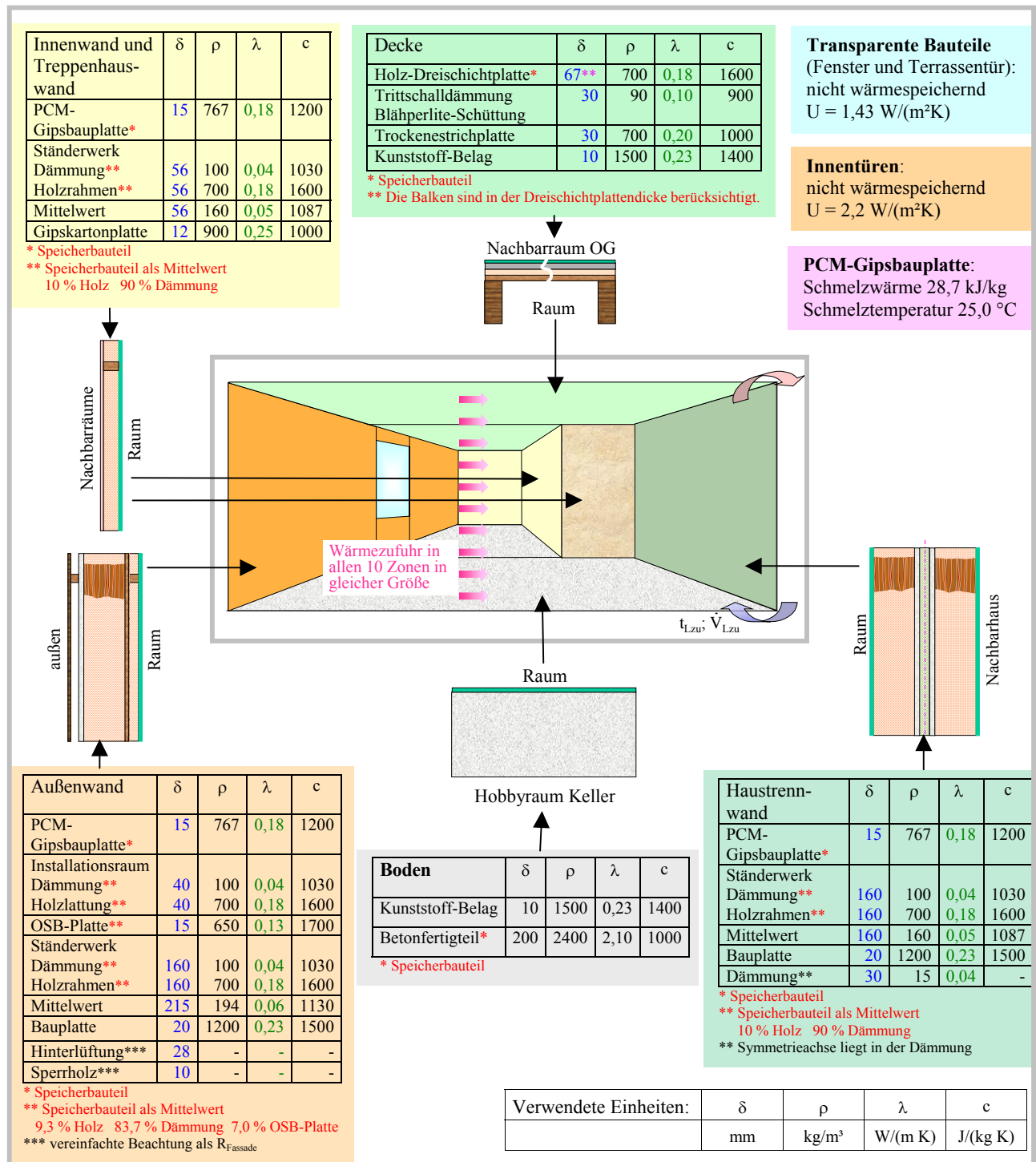
Bild 12 Raumumfassungen des Bautyps 3 und Simulationshauptergebnisse

Bautyp 4: Massivhaus in moderner Ziegelbauweise**Simulationsergebnisse für die Entwurfstage gemäß der definierten Hauptkriterien**

Entwurfstag 1 (Winter – Heizlast)	Entwurfstag 2 (heiterer Februartag)	Entwurfstag 3 (heiterer Julitag)	Entwurfstag 4 (Sommer – Extremtag)
Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
43,4 W/m ²	111,3 Wh/(m ² d)	9,6 Kh/d	37,8 Wh/(m ² d)

Bild 13 Raumumfassungen des Bautyps 4 und Simulationsergebnisse

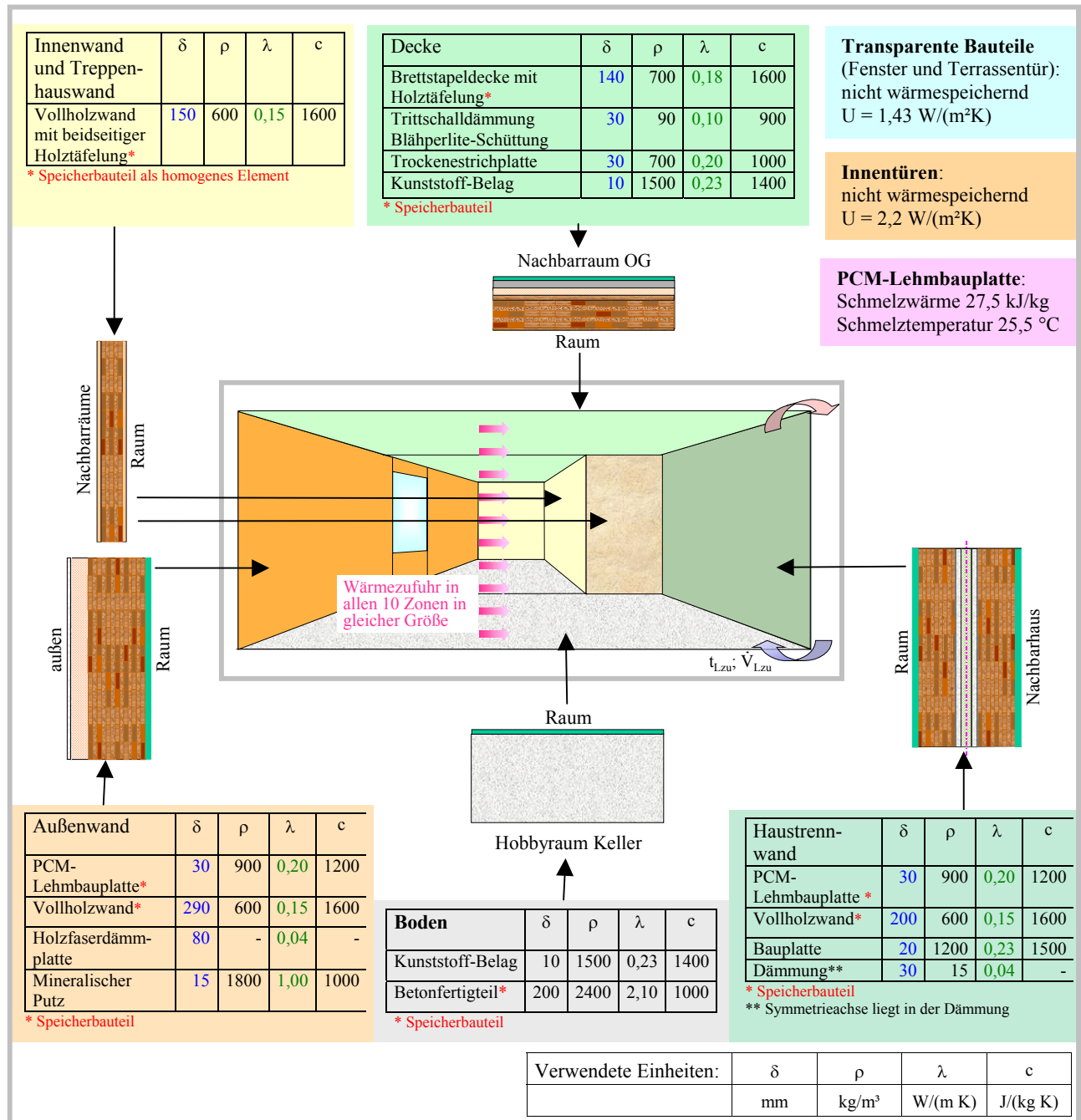
Bautyp 5: Fertighaus in Holzbauweise (Rahmen-/Tafelbau) mit PCM-Gipsbauplatte



Simulationsergebnisse für die Entwurfstage gemäß der definierten Hauptkriterien

Entwurfstag 1 (Winter – Heizlast)	Entwurfstag 2 (heiterer Februartag)	Entwurfstag 3 (heiterer Julitag)	Entwurfstag 4 (Sommer – Extremtag)
Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
44,3 W/m ²	136,2 Wh/(m ² d)	12,8 Kh/d	62,8 Wh/(m ² d)

Bild 14 Raumumfassungen des Bautyps 5 und Simulationshauptergebnisse

Bautyp 6: Fertighaus in Massivholzbauweise mit PCM-Bauplatte**Simulationsergebnisse für die Entwurfstage gemäß der definierten Hauptkriterien**

Entwurfstag 1 (Winter – Heizlast)	Entwurfstag 2 (heiterer Februartag)	Entwurfstag 3 (heiterer Julitag)	Entwurfstag 4 (Sommer – Extremtag)
Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
42,8 W/m ²	103,1 Wh/(m ² d)	5,5 Kh/d	24,6 Wh/(m ² d)

Bild 15 Raumumfassungen des Bautyps 6 und Simulationshauptergebnisse

Da stets identische Randbedingungen gelten, sind die Ergebnisse absolut vergleichbar und für den Jahresgang aussagekräftig. Die **vergleichende Auswertung der Hauptkriterien** für die jeweiligen Entwurfstage ist anhand der Tabelle 1 und Bild 16 leicht möglich.

Tabelle 1 Zusammenstellung der Ergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 gemäß der Originaluntersuchung

Bau- typ	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshoch- gradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung	heiterer Februartag	heiterer Julitag	extremer Sommertag
		W/m ²	Wh/(m ² d)	Kh/d	Wh/(m ² d)
1	Beton-Massivbau	42,9	176,7	3,5	52,1
4	Moderner Ziegelbau	43,4	111,3	9,6	37,8
2	Leichter Holzbau	44,4	153,4	25,2	76,4
5	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte	44,3	136,2	12,8	62,8
3	Massivholzbau	42,8	104,2	11,8	36,7
6	Massivholzbau + PCM-Lehmbauplatte	42,8	103,1	5,5	24,6

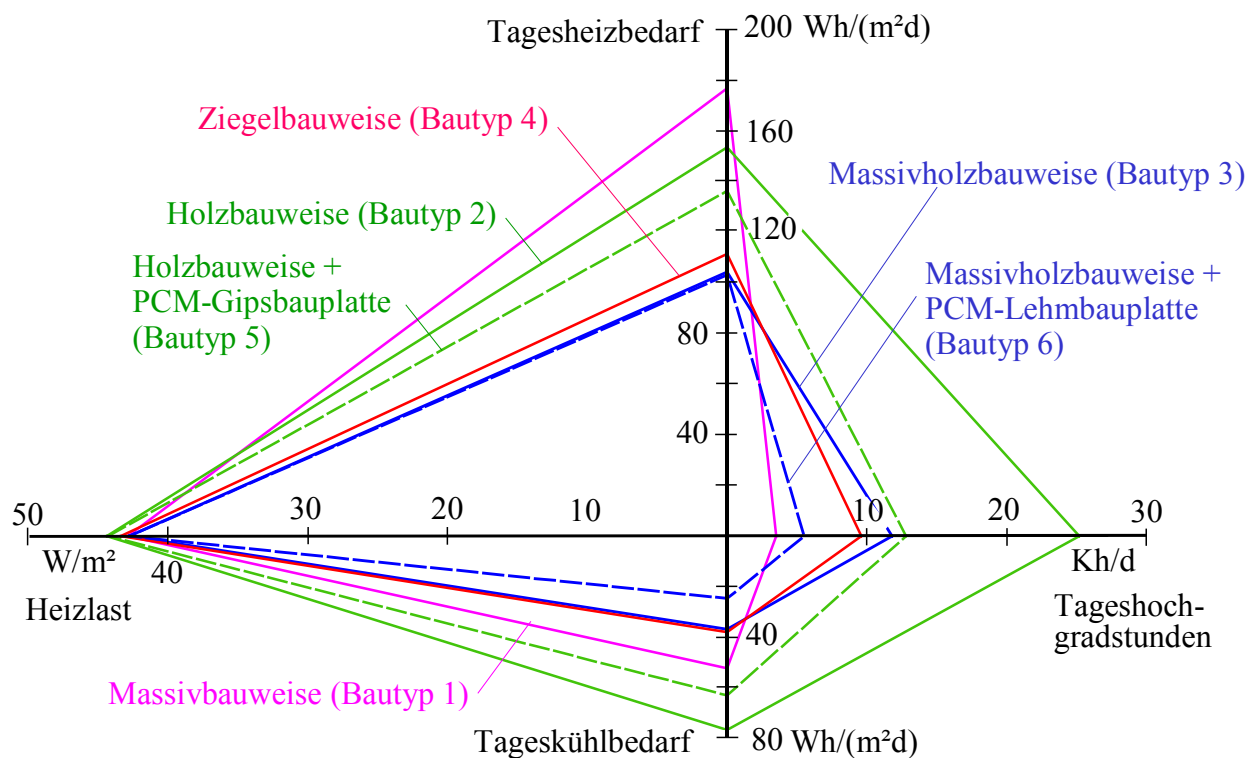


Bild 16 Grafische Darstellung der Hauptergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 gemäß der Originaluntersuchung (Werte entsprechen der Tabelle 1)

7 Diskussion der Hauptergebnisse im Vergleich

Heizlast

Sie wird unter den Randbedingungen nach Bild 6 ermittelt und ist bei allen Varianten in erster Näherung gleich ($43,6 \pm 0,8 \text{ W/m}^2$). Hierbei ist zu beachten, dass der Untersuchung eine Raumtemperatur von 22°C zugrunde gelegt wurde. Die Bauweisen entsprechen einem Niedrigenergiehaus.

Tagesheizbedarf

Dieser zeigt sehr große Unterschiede: $103,1 \dots 176,7 \text{ Wh/(m}^2\text{d)}$. Gemäß den Randbedingungen nach Bild 7 beträgt die Raumsolltemperatur während der Nutzzeit ($7^{00} \dots 22^{00}$ Uhr) 22°C . Außerhalb dieser Zeit ist eine Absenkung auf 18°C erlaubt. Würde die Raumtemperatur wegen der solaren Einstrahlung auf über 25°C ansteigen, schließt die Verschattungseinrichtung. Die Ergebnisse der untersuchten Bauweisen sind in Tabelle 2 gegenübergestellt. Sie werden anschließend diskutiert.

Tabelle 2 Ergebnisse der Bauweisen für den heiteren Februartag (Entwurfstag 2) während der 67. und 91. Simulationsstunde (3./4. Simulationstag)

	Bautyp 1 Beton- Massivbau	Bautyp 4 Ziegelbau	Bautyp 2 Leichtholzbau	Bautyp 5 Leichtholzbau + PCM- Gipsbauplatte	Bautyp 3 Massivholzbau	Bautyp 6 Massivholzbau + PCM- Lehmhauplatte
Maximale Tagestemperatur	22,0 °C	23,4 °C	25,0 °C	24,1 °C	24,0 °C	23,8 °C
Sonnenschutz- aktivierung	nein	nein	kurzzeitig	nein	nein	nein
Heizbetrieb	7 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰	6 ⁰⁰ ... 11 ⁰⁰ 17 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰	2 ⁰⁰ ... 10 ⁰⁰ 18 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰	2 ⁰⁰ ... 10 ⁰⁰ 19 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰	5 ⁰⁰ ... 10 ⁰⁰ 17 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰	5 ⁰⁰ ... 10 ⁰⁰ 17 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰
Minimale Nachttemperatur	18,6 °C	18,0 °C	18,0 °C	18,0 °C	18,0 °C	18,0 °C
Tagesheizbedarf in Wh/(m ² d)	176,7	111,3	153,4	136,2	104,2	103,1

■ Die große Wärmespeicherkapazität des **Betonmassivbaus (Bautyp 1)** macht sich nachteilig bemerkbar, da nachts mit minimal $18,6^\circ\text{C}$ die zulässige Absenkung der Raumtemperatur auf 18°C nicht erreicht wird. Die Heizung geht nachts zwar nicht in Betrieb, wegen der relativ hohen Raumtemperatur ist der Wärmeverlust aber nachts groß. Die entsprechende Wärmemenge muss am Tage zusätzlich dem Raum bzw. den Raumumfassungen zugeführt werden.

■ Der **leichte Holzbau (Bautyp 2)** zeigt einen um ca. 13 % niedrigeren Tagesheizbedarf gegenüber Bautyp 1, dennoch liegt er noch hoch. Die geringere Speicherwärme bewirkt am Tage eine höhere Raumtemperatur als bei Bautyp 1, um 14^{00} Uhr sind die maximal zulässigen 25°C erreicht, sodass der Sonnenschutz kurzzeitig schließt, d. h., der solare Energieeintrag ist kleiner als bei Bautyp 1. Weiterhin vollzieht sich nachts eine raschere Auskühlung des Raumes. Um 2^{00} Uhr sind bereits 18°C erreicht und die Heizung geht in Betrieb.

■ Die Modifizierung des **leichten Holzbaus mit den PCM-Gipsbauplatten (Bautyp 5)** erhöht die Wärmespeicherkapazität. Um 19^{00} Uhr zeigt das Latentspeichermaterial beispielsweise in der Haustrennwand (Flächen: 9, 10) und in der Treppenhauswand (Fläche: 11, 12) teilweise noch ei-

nen Phasenwandel ("flüssig") an. Die maximale Raumtemperatur beträgt nur noch 24,1 °C und die Verschattungseinrichtung schließt nicht mehr.

■ Die **Ziegelbauweise (Bautyp 4)** zeigt ein sehr günstiges energetisches Verhalten. Von entscheidendem Einfluss ist das Zusammenwirken der Größen: Wärmespeichervermögen, Temperaturleitfähigkeit und Bauteildicke.

■ Noch etwas kleiner als bei der Ziegelbauweise ist der Tagesheizbedarf bei der **Massivholzbauweise (Bautyp 3)**. Sie stellt somit am heiteren Februartag die günstigste energetische Lösung dar.

Interessanterweise bringt die **Massivholzbauweise mit PCM-Lehmbauplatte (Bautyp 6)** keine den Aufwand lohnende Verbesserung mehr (nur ca. 1 %). Ursache dafür ist, dass die Phasenwandeltemperatur von 25,5 °C in der PCM-Lehmbauplatte nicht erreicht wird.

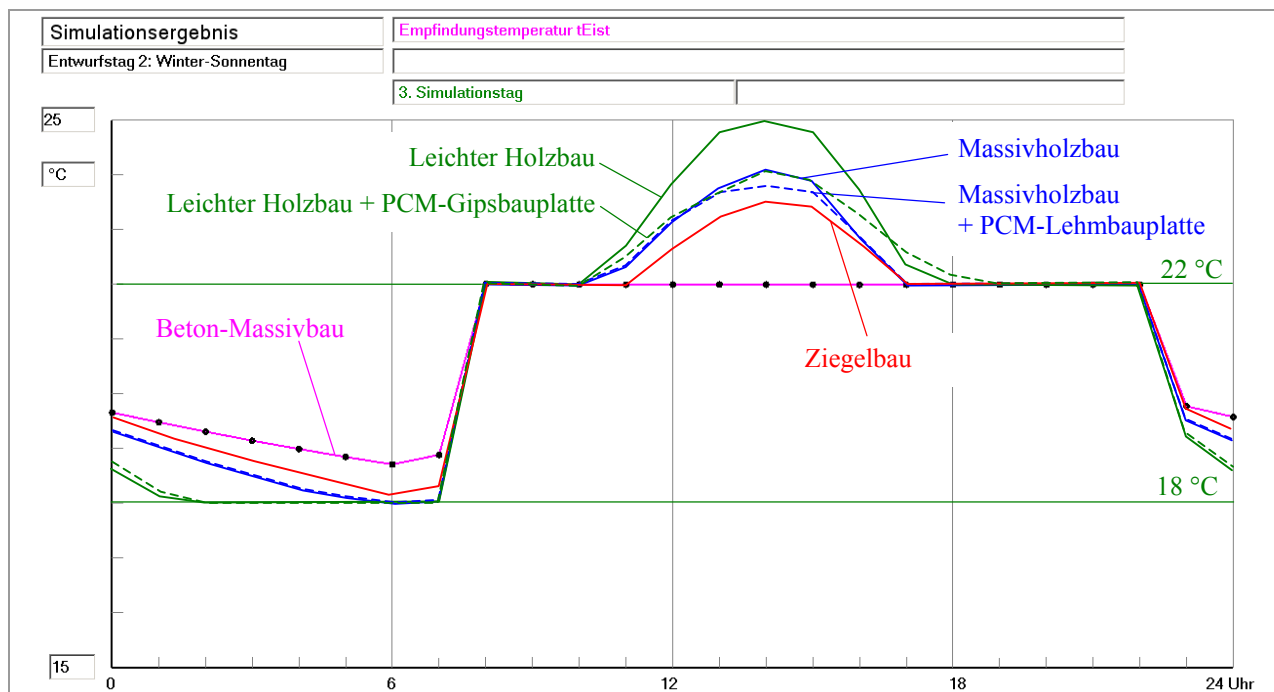


Bild 17 Raumtemperaturverläufe jeweils am 3. Simulationstag für alle untersuchten Bauweisen (Bautypen 1 bis 6) am heiteren Februartag

■ Aus den **Raumtemperaturverläufen** gemäß Bild 17 ist sehr anschaulich erkennbar, dass die unterschiedlichen Bauweisen einen markanten Einfluss auf diese nehmen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Verläufe für den 3. Simulationstag (48. bis 72. Simulationsstunde) gelten. Da teilweise nach diesem Zeitraum noch keine eingeschwungenen Zustände existieren, können Abweichungen zu den Angaben in der Tabelle 2 auftreten. In erster Näherung liegen die Temperaturverläufe zwischen dem Beton-Massivbau (Bautyp 1) und dem leichten Holzbau (Bautyp 2). Außer der Wärmespeicherfähigkeit ist die Temperaturleitfähigkeit von besonderem Einfluss. Es gelten: $\alpha_{\text{Beton}} = 875 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha_{\text{Ziegel}} = 217 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha_{\text{Massivholz}} = 156 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha_{\text{Lehm}} = 185 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Da die Temperaturleitfähigkeiten und die Gesamtspeicherkapazitäten bei der Massivholzbauweise kleiner als bei der Ziegelbauweise sind, steigt die Raumtemperatur infolge des Solareintrages bei der Massivholzvariante tags rascher an und fällt nachts schneller ab. Die thermische und energetische Verbesserung beim **Einsatz von Latentspeichermaterial** ist bei der Leichtholzbauweise (Bautyp 2 zu Bautyp 5) wirkungsvoller als bei der Massivholzbauweise (Bautyp 3 zu Bautyp 6). Dies wird

durch die generell größere Wärmespeicherkapazität der Massivholzvariante und durch die höhere Phasenwandeltemperatur des PCM in der Lehmbauplatte bewirkt.

Tageshochgradstunden

Hierbei treten die erwarteten – durch die Erfahrung geprägten – Ergebnisse deutlich hervor. Gemäß den Randbedingungen nach Bild 8 stellt sich die Raumtemperatur völlig freischwingend – ohne Wirken eines Anlagenbetriebes, jedoch bei verstärkter Nachtlüftung – ein. Eine Verschattung erfolgt nicht. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 3 Ergebnisse der Bauweisen für den heiteren Julitag (Entwurfstag 3) während der 67. und 91. Simulationsstunde (3./4. Simulationstag)

	Bautyp 1 Beton- Massivbau	Bautyp 4 Ziegelbau	Bautyp 2 Leichtholzbau	Bautyp 5 Leichtholzbau + PCM- Gipsbauplatte	Bautyp 3 Massivholzbau	Bautyp 6 Massivholzbau + PCM- Lehmbauplatte
Maximale Tagestemperatur	26,7 °C	27,5 °C	29,5 °C	28,2 °C	27,9 °C	27,0 °C
Minimale Nachttemperatur	22,6 °C	21,9 °C	21,4 °C	22,7 °C	21,7 °C	22,1 °C
Amplitude der Raumtempera- turschwingung	4,1 K	5,6 K	8,1 K	5,5 K	6,2 K	4,9 K
Mittlere Raum- temperatur	24,7 °C	24,8 °C	25,5 °C	25,2 °C	24,9 °C	24,7 °C
Tageshochgrad- stunden in Kh/d	3,5	9,6	25,2	12,8	11,8	5,5

■ Die große Wärmespeicherkapazität des **Betonmassivbaus (Bautyp 1)** entfaltet seine positive Wirkung, da nur 3,5 Kh/d als Tageshochgradstunden auftreten. Dies ist der kleinste Wert aller Varianten.

■ Im völligen Gegensatz dazu präsentiert sich der **leichte Holzbau (Bautyp 2)** mit der größten Überhitzung des Raumes von 25,2 Kh/d. Dies ist mehr als das 7fache.

■ Die Ergänzung des **leichten Holzbaus mit der PCM-Gipsbauplatte (Bautyp 5)** zeigt eine sehr gute Wirkung. Die Anzahl der Tageshochgradstunden sinkt auf etwa die Hälfte. Interessant ist weiterhin, dass sich die mittlere Raumtemperatur bei den leichten Holzbauweisen ohne und mit Latentspeichermaterialeinsatz nur geringfügig ändert, die maximale Raumtemperatur und die Temperaturamplitude aber bei der PCM-Variante deutlich reduziert.

■ Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Tageshochgradstunden bei der **Massivholzbauweise (Bautyp 3)** noch etwas geringer sind als bei der leichten Holzbauweise mit der PCM-Gipsbauplatte. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Massivholzlösung eine beachtenswerte Technologie darstellt.

■ Die **Massivholzbauweise mit PCM-Lehmbauplatte (Bautyp 6)** führt nochmals zu einer deutlichen Verbesserung bezüglich der thermischen Parameter. Bei wiederum fast gleichbleibender mittlerer Raumtemperatur im Tagesgang verringern sich die Tageshochgradstunden etwa um die Hälfte und die maximale Raumtemperatur sowie die Raumtemperaturamplitude reduzieren sich merklich.

■ Die **Ziegelbauweise (Bautyp 4)** liegt zwischen den beiden Massivholzbauweisen, jedoch näher am reinen Massivholzbau. Da die thermischen Verhältnisse des Ziegelbaus bekannt sind, demonstriert dies nochmals die Vorteile der Massivholzvariante. Es muss allerdings ergänzt werden, dass die moderne Ziegelbauweise – die Gegenstand der Untersuchung war – bezüglich der wärmetechnischen Eigenschaften nicht mehr identisch mit einem herkömmlichen Vollziegelmauerwerk ist! Die konventionelle Bauart käme der untersuchten Beton-Massivbauweise näher.

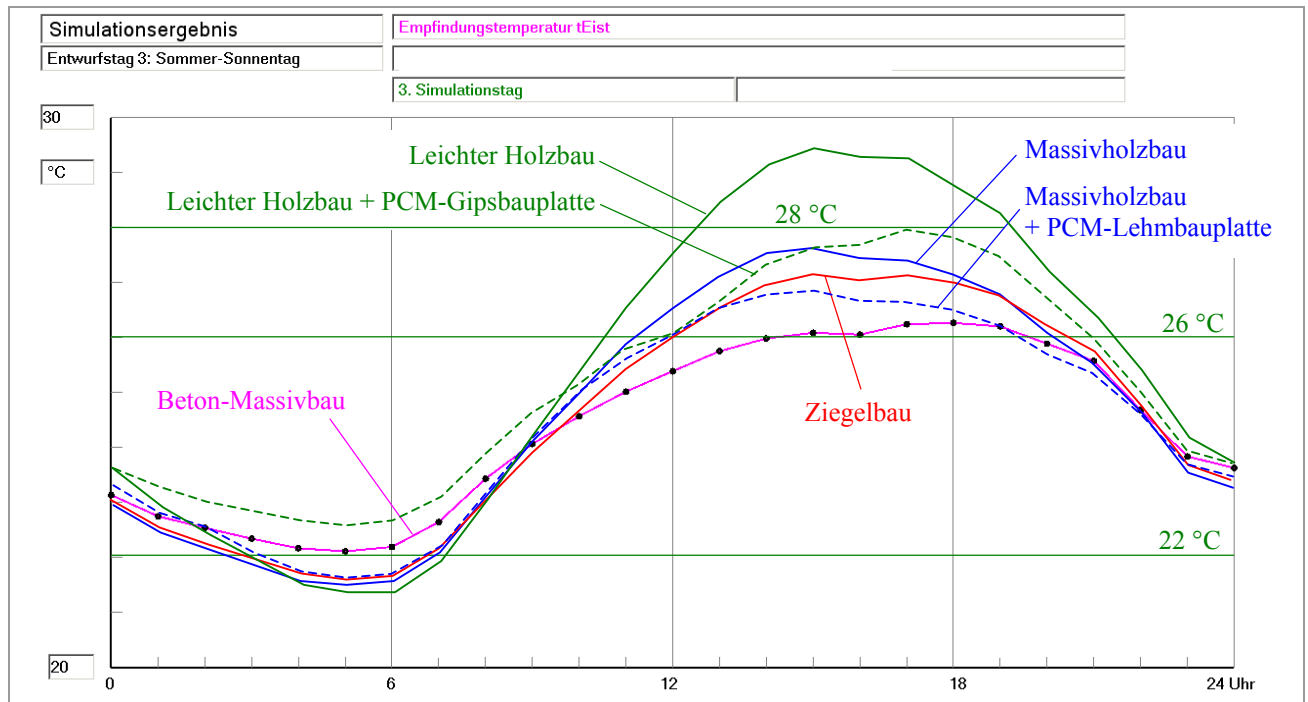


Bild 18 Raumtemperaturverläufe jeweils am 3. Simulationstag für alle untersuchten Bauweisen (Bautypen 1 bis 6) am heiteren Julitag

■ Die **Raumtemperaturverläufe** nach Bild 18 repräsentieren wiederum den 3. Simulationstag, so dass Abweichungen zu den Angaben in der Tabelle 3 auftreten können, denn die Tabellenwerte gelten während der letzten 24 Simulationsstunden. Es sei weiterhin daran erinnert, dass am Entwurfstag 3 keinerlei Verschattung angesetzt wird. D. h., im Realfall kann bei aktiviertem Sonnenschutz die Raumtemperatur beträchtlich gesenkt werden. Unter den getroffenen Annahmen erfüllt nur der Beton-Massivbau (Bautyp 1) die Forderung mit der Raumtemperatur möglichst unter 26 °C zu bleiben. Alle anderen Varianten führen zeitweise zu bedeutend höheren Raumtemperaturen. Der leichte Holzbau (Bautyp 2) überschreitet etwa 6 Stunden lang sogar die Temperatur von 28 °C. Sehr deutlich zeigt sich die Wirkung des **Einsatzes von Latentspeichermaterialien**, so sinkt die maximale Raumtemperatur am 3. Simulationstag um 15⁰⁰ Uhr beim leichten Holzbau um fast 2 K und beim Massivholzbau um ca. 1 K.

Tageskühlbedarf

Er entsteht am Extremsommertag unter den definierten Randbedingungen (Bild 9) und wird mittels einer Kühlanlage so kompensiert, dass während der Raumnutzung von 7⁰⁰ Uhr bis 22⁰⁰ Uhr die maximale Raumtemperatur auf 26 °C begrenzt bleibt. Weitere Hauptmerkmale gegenüber dem Entwurfstag 3 (heiterer Julitag) sind die verkürzte intensive Nachtlüftung, aber vor allem die stringente Verschattung ($F_C = 0,2$) bei der Gesamtsolarstrahlung $>150 \text{ W/m}^2$ auf die jeweils betrachtete

transparente Raumbegrenzungsfläche. In Tabelle 4 finden sich die wichtigsten Ergebnisse, die anschließend diskutiert werden. Zusätzlich sind in der Tabelle noch Angaben zum Kühlbeginn während der Simulationszeit und zur Speicherwärmeaufnahme während der letzten 24 Simulationsstunden ergänzt. Ausgehend von einem Startzustand von 22 °C für alle Bauteilschichten und einer "festen" Phase des Latentspeichermaterials zeigt sich je nach Bauweise, dass z. B. am 3. Simulationstag noch kein eingeschwungener Zustand erreicht ist. Dies ist für den Vergleich kein grundlegender Nachteil, da bei den üblichen, relativ kurzzeitigen Hitzeperioden aus den ermittelten Ergebnissen Folgerungen zur "thermischen Stabilität" der Raumumschließungen getroffen werden können.

Tabelle 4 Ergebnisse der Bauweisen für den Extremsommertag (Entwurfstag 4) während der 67. und 91. Simulationsstunde (3./4. Simulationstag)

	Bautyp 1 Beton- Massivbau	Bautyp 4 Ziegelbau	Bautyp 2 Leichtholzbau	Bautyp 5 Leichtholzbau + PCM- Gipsbauplatte	Bautyp 3 Massivholzbau	Bautyp 6 Massivholzbau + PCM- Lehmbauplatte
Maximale Tagestemperatur	26,0 °C	26,0 °C	26,0 °C	26,0 °C	26,0 °C	26,0 °C
Minimale Nachttemperatur	24,2 °C	23,7 °C	23,6 °C	23,9 °C	23,5 °C	23,6 °C
Kühlbetrieb	11 ⁰⁰ ... 21 ⁰⁰	13 ⁰⁰ ... 21 ⁰⁰	11 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰	13 ⁰⁰ ... 22 ⁰⁰	13 ⁰⁰ ... 21 ⁰⁰	14 ⁰⁰ ... 21 ⁰⁰
Speicherwärme- aufnahme in den letzten 24 Stun- den in Wh	4324	3156	149	654	2299	2600
Beginn des Kühlbetriebs	3. Tag, 17 ⁰⁰	2. Tag, 19 ⁰⁰	1. Tag, 17 ⁰⁰	1. Tag, 19 ⁰⁰	2. Tag, 18 ⁰⁰	2. Tag, 18 ⁰⁰
Tageskühlbedarf in Wh/(m²d)	52,1	37,8	76,4	62,8	36,7	24,6

■ Die geringe Wärmespeicherkapazität des **leichten Holzbaus (Bautyp 2)** erfordert mit 76,4 Wh/(m²d) den höchsten Kühlbedarf. Damit erweist sich diese Bauweise unter den sommerlichen Bedingungen – wie bereits bei der Bewertung der Tageshochgradstunden – als besonders ungünstig. Die zur Startzeit der Simulation im Baukörper vorhandene negative Wärme (bzw. "Kälte") in Bezug auf die Raumtemperatur ist rasch aufgezehrt, sodass bereits am 1. Simulationstag um 17⁰⁰ Uhr die Kühlung beginnt. Dies ist von allen Varianten der früheste Zeitpunkt. Die am 3./4. Simulationstag noch nutzbare Speicherwärme erweist sich als außerordentlich gering, sodass man praktisch von einem eingeschwungenen Zustand ausgehen kann.

■ Der **leichte Holzbau mit der PCM-Gipsbauplatte (Bautyp 5)** zeigt eine energetische Verbesserung um 18 %, was sich auch durch die verringerte Kühlzeit ausdrückt.

■ Deutlich günstiger als der leichte Holzbau stellt sich die **Massivholzbauweise (Bautyp 3)** dar. Sie benötigt weniger als die Hälfte an Kühlenergie, beginnt einen Tag später mit der Kühlung und kann auch am 3./4. Simulationstag noch Speicherwärme aufnehmen.

■ Die **Massivholzbauweise mit PCM-Lehmbauplatte (Bautyp 6)** bewirkt eine weitere Reduktion des täglich erforderlichen Kühlbedarfs. Er beträgt nur noch ein Drittel gegenüber der Energie für

die leichte Holzbauweise. Die Kühlzeit reduziert sich auf den kürzesten Zeitraum aller Varianten von 14⁰⁰ Uhr bis 21⁰⁰ Uhr. Es handelt sich um die beste Variante.

■ Die **Ziegelbauweise (Bautyp 4)** liefert im Vergleich zur reinen Massivholzvariante fast deckungsgleiche Ergebnisse. Dies betrifft den Kühlbedarf, den Kühlzeitraum und nahezu auch den Kühlbeginn.

■ Interpretationsbedürftig ist das energetische Ergebnis für den **Betonmassivbau (Bautyp 1)**. Aufgrund der hohen Temperaturleitfähigkeit des Betonfertigteils und der großen Wärmespeicherkapazität erfolgt die Wärmeeinlagerung am Tage besonders intensiv. Diese vorteilhafte Eigenschaft wird aber durch einen relativ hohen Wärmestrom vom Obergeschoss höherer Temperatur zum Testraum infolge der großen Wärmeleitfähigkeit der Betondecke im Verhältnis zu den anderen Varianten negativ beeinflusst. Auf diese speziellen Zusammenhänge werde später eingegangen.

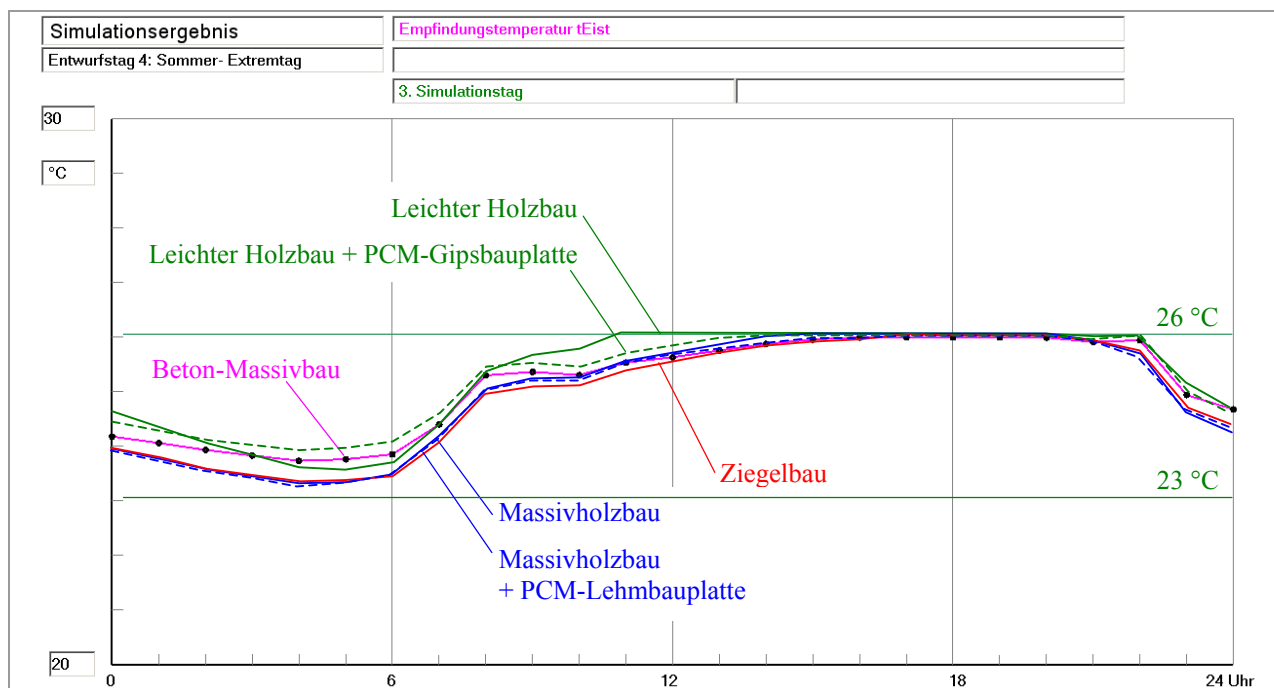


Bild 19 Raumtemperaturverläufe jeweils am 3. Simulationstag für alle untersuchten Bauweisen (Bautypen 1 bis 6) am Extremsommertag

■ Die **Tagesverläufe der Raumtemperaturen** nach Bild 19 zeigen infolge der Kühlung – um Temperatur >26 °C zu vermeiden – die stark reduzierten Amplituden bei den Temperaturschwingungen im Vergleich zum Bild 18.

■ Weiterhin ist es interessant, die **Verläufe der Kühlleistungen** miteinander zu vergleichen. Für den 3. Simulationstag gelten die im Bild 20 gezeigten Zusammenhänge. Dargestellt sind zunächst die für alle Varianten zutreffende Solarstrahlung, die nach dem definierten Verschattungsregime in den Raum gelangt, und die Leistung der inneren Wärmequellen, die morgens und abends wirksam werden ($\equiv$ Bild 2). Die Kühlleistungsverläufe für alle Bautypen sind gegenübergestellt. Dabei wird die leistungssenkende Wirkung des Latentspeichermaterials ebenso deutlich wie die wärmetechnische Ähnlichkeit, die zwischen dem modernen Ziegelbau und der Massivholzbauweise besteht.

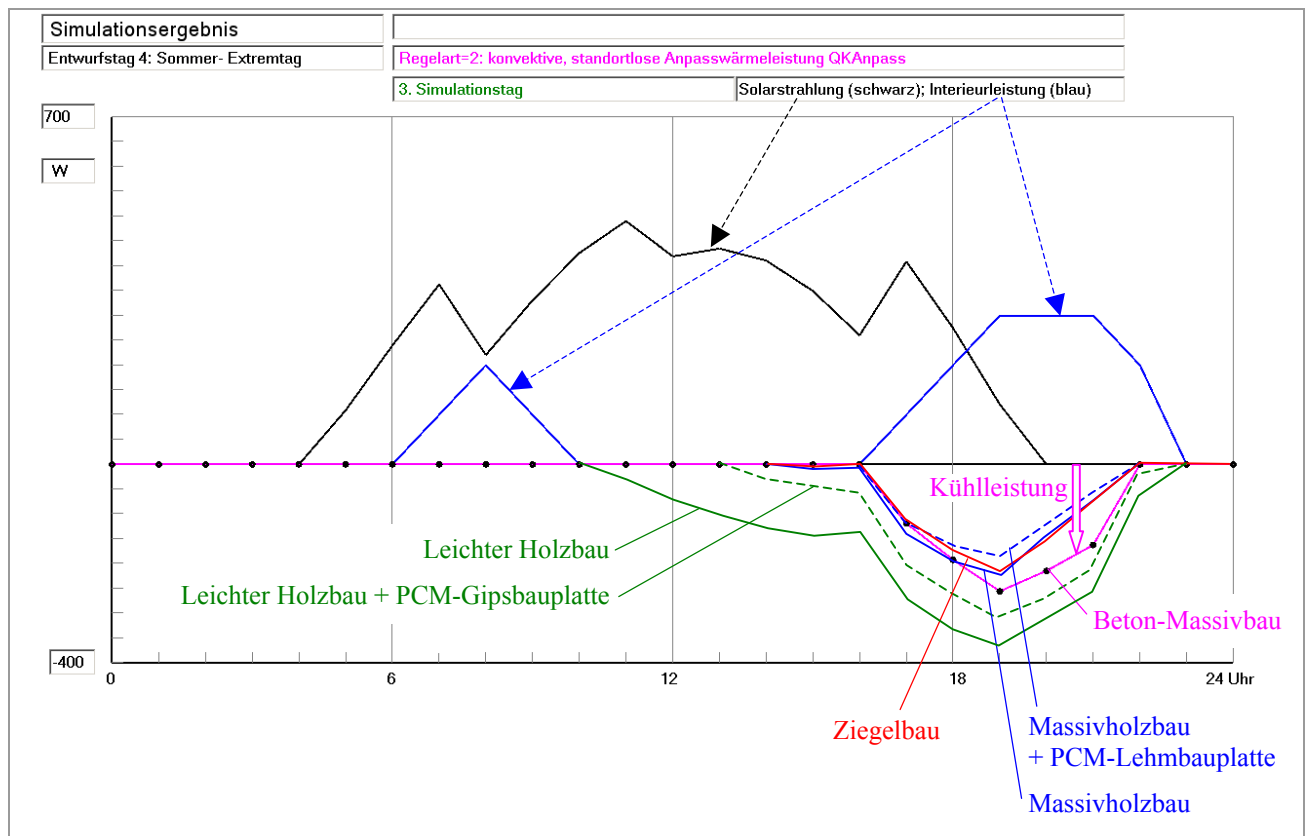


Bild 20 Leistungsverläufe jeweils am 3. Simulationstag für alle untersuchten Bauweisen (Bautypen 1 bis 6) am Extremsommertag

Die Kurven für die solare Einstrahlung in den Raum unter Beachtung der Verschattung bei einer Gesamtstrahlungsdichte $>150 \text{ W/m}^2$ sowie für den Wärmestrom durch Wirken der inneren Wärmequellen gelten für alle untersuchten Varianten.

Die Kühlleistung, die im Raum durch die konvektive Wärmesenke realisiert wird, ist für die Ursprungsvariante (Bautyp 1) magentafarben dargestellt. Alle weiteren Verläufe sind überlagert.

Da die Tagesverläufe am 3. Simulationstag noch nicht bei allen Bautypen eingeschwungen sind, ist der direkte Vergleich mit den Werten der Tabelle 4 nicht möglich.

8 Besonderheiten beim thermischen Verhalten der Raumumfassungen

Die Fülle der Einzelergebnisse, die beispielsweise durch die Temperaturverläufe in den Raumumfassungen gegeben ist, enthält sehr viele interessante Erkenntnisse. Sie sind nur durch Detailbetrachtungen nutzbringend – z. B. zur Optimierung des Bautyps – verwendbar.

Korrektur falscher Erwartungen

Teilweise verbindet man mit dem Einsatz von **Latentspeichermaterialien** falsche Vorstellungen bzw. Erwartungen. So wird mitunter angenommen, dass sich der tägliche Raumtemperaturverlauf beim Einsatz von PCM-Beimischungen in den oberflächennahen Raumumfassungsschichten unter sommerlichen Bedingungen folgendermaßen vollzieht: Die Raumtemperatur steigt bis zur Phasenwandeltemperatur an, bleibt dann für einige Stunden konstant und erhöht sich danach weiter. Dieser triviale Fall wird in praxi nie eintreten, denn einerseits sind nicht alle Raumumfassungen bezüglich des Materialaufbaus gleich, andererseits weichen die raumseitigen Oberflächentemperaturen aufgrund der ungleichen solaren Bestrahlung, des unterschiedlichen Wirkens der Interieurwärmequellen, des natürlichen Vorhandenseins eines von null abweichenden vertikalen Lufttemperaturgradienten sowie der verschiedenartigen und unsteten äußeren Randbedingungen voneinander.

der ab, sodass der Phasenwechsel nie zeitgleich erfolgt.

Bild 21 zeigt beispielsweise für den **Massivholzbau mit PCM-Lehmbauplatten an den Außenwänden und an der Haustrennwand** die Temperaturschwingungen in ausgewählten Bauteilen am heiteren Julitag während der letzten 24 Simulationsstunden. In den Lehmbauplatten ist zeitweise die Temperaturstagnation zu beobachten, so verhartet die raumseitige Schicht der Südaußenwand zwischen 12⁰⁰ Uhr bis 0⁰⁰ Uhr – lediglich mit der Ausnahme 18⁰⁰ Uhr – bei der Phasenwechseltemperatur von 25,5 °C. In den übrigen Bauteilen treten in diesem Zeitraum dagegen Temperaturänderungen auf.

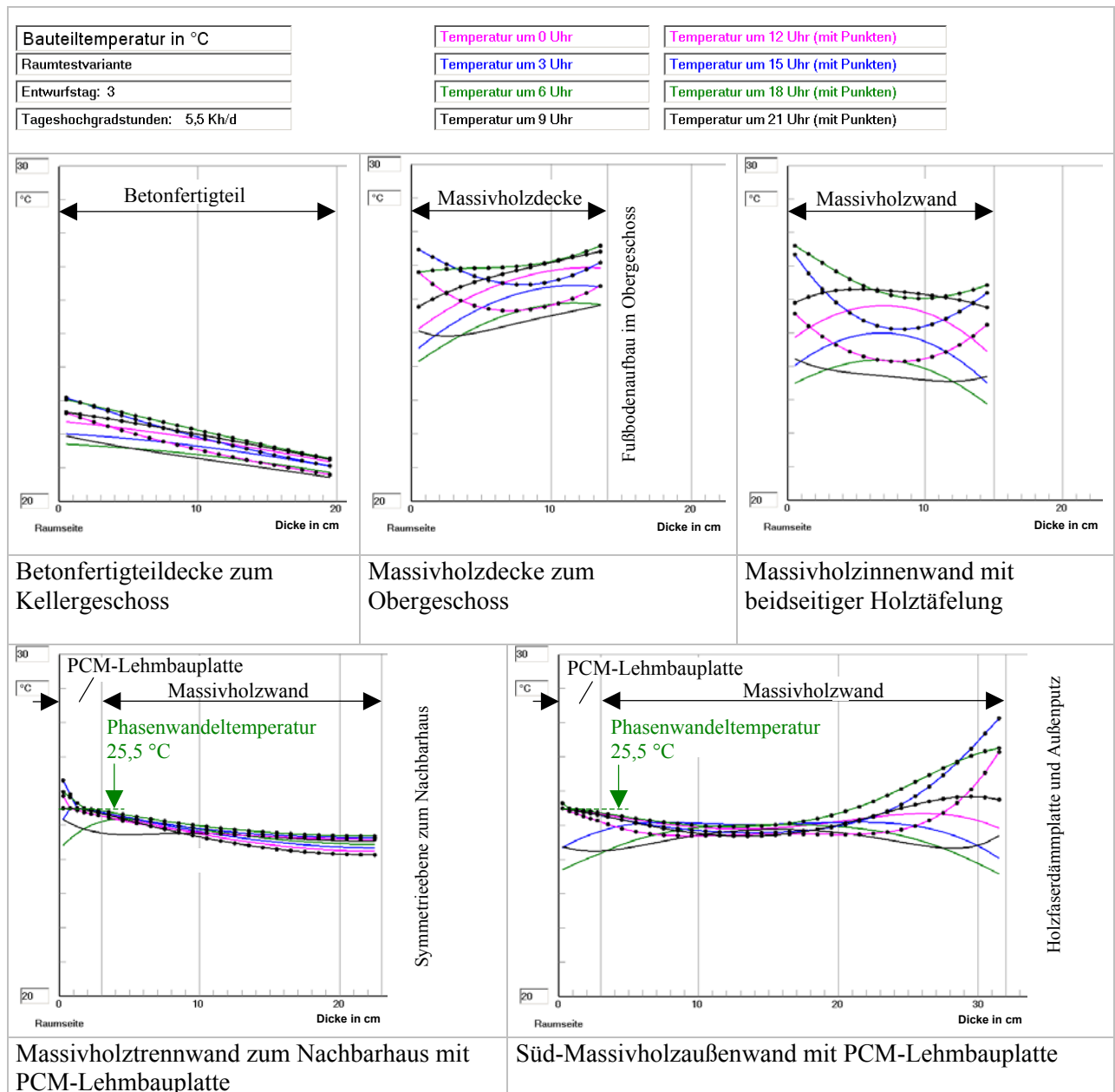


Bild 21 Gegenüberstellung der Temperaturverläufe in verschiedenen Raumumfassungen des Bautyps 6 (Massivholzbauweise mit PCM-Lehmbauplatte) zwischen der 67. und 91. Simulationsstunde am heiteren Julitag (Entwurfstag 3)

Die Berechnungen gestatten auch ganz **spezielle Einsichten zum Phasenwechsel**, wie die Tabelle 5 für die Haustrennwand am Ende der Simulation um 19⁰⁰ Uhr angibt. Raumseitig liegt das Latent-

speichermaterial in der flüssigen Phase vor (Schichttemperaturen $> 25,5\text{ °C}$), in der Schicht 3 sind jedoch nur 42,5 % geschmolzen (Schichttemperatur = Phasenwandeltemperatur = $25,5\text{ °C}$) und in den Schichten 4 und 5 hat das Material die feste Phase erlangt (Schichttemperaturen $< 25,5\text{ °C}$).

Tabelle 5 Auszug aus dem Temperaturverlauf und dem Phasenzustand um 19⁰⁰ Uhr in der Haustrennwand

Element-schicht	Temperaturen in °C	Element-schicht	Temperaturen in °C	Element-schicht	Phasenzustand in %
0	25,76	13	24,99	0	100,0
1	25,68	14	24,94	1	100,0
2	25,59	15	24,90	2	100,0
3	25,50	16	24,87	3	42,5
4	25,47	17	24,83	4	0,0
5	25,45	18	24,80	5	0,0
6	25,40	19	24,78		
7	25,34	20	24,76		
8	25,27	21	24,74		
9	25,21	22	24,73		
10	25,15	23	24,72		
11	25,09	24	24,71		
12	25,04	25	24,71		

PCM-Lehm- bauplatte: Elementdicke 5 mm; 6 Elementschichten; Gesamtdicke 30 mm
 Massivholz- bauteil: Elementdicke 10 mm; 20 Elementschichten; Gesamtdicke 200 mm

Die Überlagerung der einzelnen thermischen Zustände der Raumumfassungen ergibt somit keine Konstanz sondern eine Dämpfung und Phasenverschiebung der Raumtemperaturschwingung, wie dies Bild 18 zeigt.

Senkung des Kühlbedarfs

Um diesen zu erreichen, sind unter den gegebenen Randbedingungen ein Komplex von wärmetechnischen Eigenschaften und der jeweilige Simulationszeitpunkt bedeutungsvoll. Vergleicht man beispielsweise den **Beton-Massivbau (Bautyp 1)** mit dem **Massivholzbau (Bautyp 3)** so zeigt Bild 20, dass nach 18⁰⁰ Uhr der Kühlbedarf für den Betonbau den für den Massivholzbau übersteigt. Die detaillierten Wärmeströme am Ende der Simulationszeit (19⁰⁰ Uhr) sind im Bild 22 vermerkt.

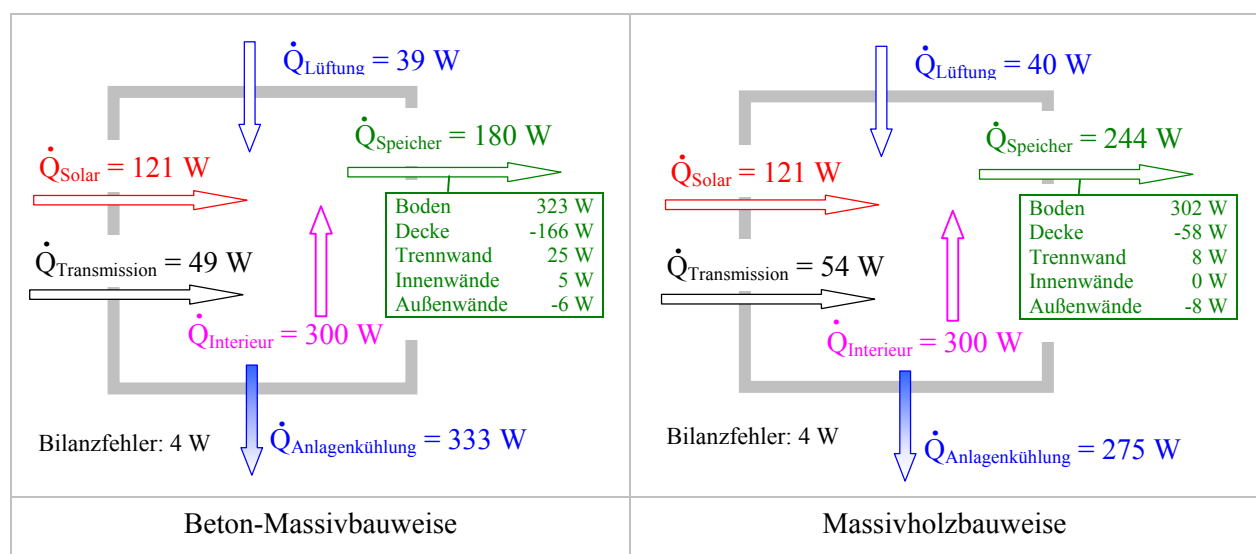


Bild 22 Testraum für zwei unterschiedliche Bautypen mit detaillierter Darstellung der Wärmeströme am Ende der Simulationszeit (19⁰⁰ Uhr)

Der Hauptunterschied zwischen beiden Varianten besteht in den Wärmeströmen in die Speicher-

bauteile, wobei die Decke die größte Differenz aufweist. Aufgrund des vorhandenen Fußbodenaufbaus beim Bautyp 3 ist der Wärmeleitwiderstand größer als bei der Betondecke. Sein Einfluss in Verbindung mit dem Wärmestrom aus dem Obergeschoss zum Testraum wird jedoch im Realfall vom unterschiedlichen Speichervermögen der Decken überlagert.

Die gegebene Komplexität der realen wärmetechnischen Vorgänge kann in der Regel nicht durch ein einfaches Gedankenmodell ersetzt werden.

Wirksame Speicherkapazität nach DIN 4108-6

Um die nutzbaren solaren Gewinne während des Heizbetriebes nach DIN V 4108-6 und den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 abschätzen zu können, ist die wirksame Speicherkapazität der Raumumfassungen nach der erstgenannten Norm zu bestimmen. Hierbei werden als speicherwirksame Schichtdicken nur 10 cm der Raumumfassungen, gerechnet von den raumseitigen Oberflächen aus, angenommen.

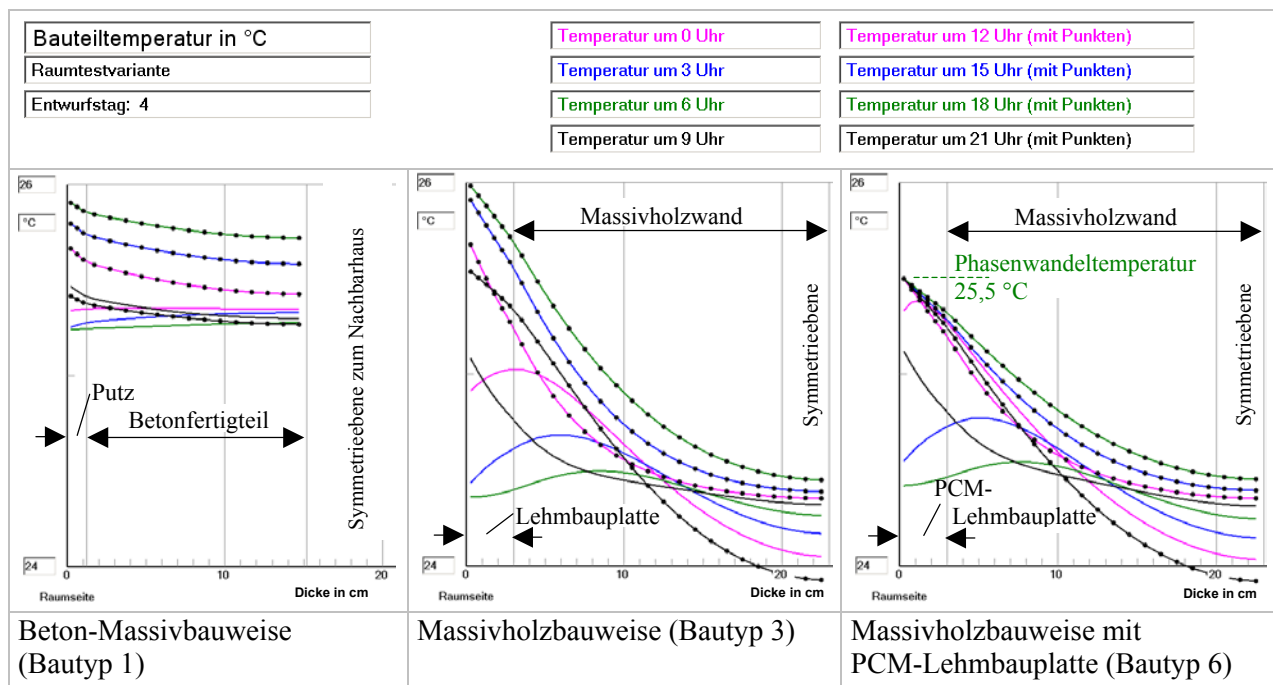


Bild 23 Gegenüberstellung der Temperaturverläufe in der Haustrennwand bei drei unterschiedlichen Bauweisen zwischen der 67. und 91. Simulationsstunde am Extremsommertag (Entwurfstag 4)

Bild 23 zeigt z. B. die Temperaturverläufe in einer Symmetriehälfte der Trennwand zum Nachbarhaus während 24 Betriebsstunden. Wegen der beiderseits gleichen thermischen Raumverhältnisse fließt zu keiner Zeit ein Wärmestrom in der Symmetrieebene, da der Temperaturgradient stets null ist (Temperaturverläufe enden waagrecht). Auch am 3./4. Simulationstag existieren bei den betrachteten Bautypen noch keine eingeschwungenen Zustände. Die mittlere Temperatur in der raumseitigen Schicht unterscheidet sich jeweils von der Mitteltemperatur in der Symmetrieebene erheblich. Dies ist besonders bei der Massivholzbauweise zutreffend, hier wirkt die Starttemperatur von 22 °C noch nach. Die Ursache ist durch die geringe Temperaturleitfähigkeit von $\alpha_{\text{Massivholz}} = 156 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bzw. $\alpha_{\text{Lehm}} = 185 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ gegeben. Demgegenüber nimmt aufgrund der hohen Temperaturleitfähigkeit des Betonfertigteils von $\alpha_{\text{Beton}} = 875 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ quasi die gesamte Bauteildicke an der Temperaturänderung teil. Der große spezifische, auf die Wandfläche bezogene Wert der Wärmespeicherkapazität des Betons von $\rho \cdot c \cdot \delta = 2400 \cdot 1000 \cdot 0,140 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K}) = 336 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$

bewirkt somit gegenüber der Massivholzbauweise mit Lehmplatte von $224 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ eine sehr große Wärmeeinlagerung am Tage. Weiterhin geht im Fall des PCM-Einsatzes aus Bild 23 auch hervor, wie die Latentwärmespeicherung die Oberflächentemperatur ideal begrenzen kann.

Die Angabe in DIN V 4108-6 sollte differenzierter erfolgen, beispielsweise in Abhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit. Latentwärmespeicherschichten müssten speziell berücksichtigt werden.

Monolithische Wandaufbauten

Beispielsweise beim modernen Ziegelmauerwerk der Dicke 490 mm kommt man ohne zusätzliche Wärmedämmung aus, das Bauteil hat die Aufgaben **Wärmedämmung und Wärmespeicherung** gleichermaßen zu erfüllen.

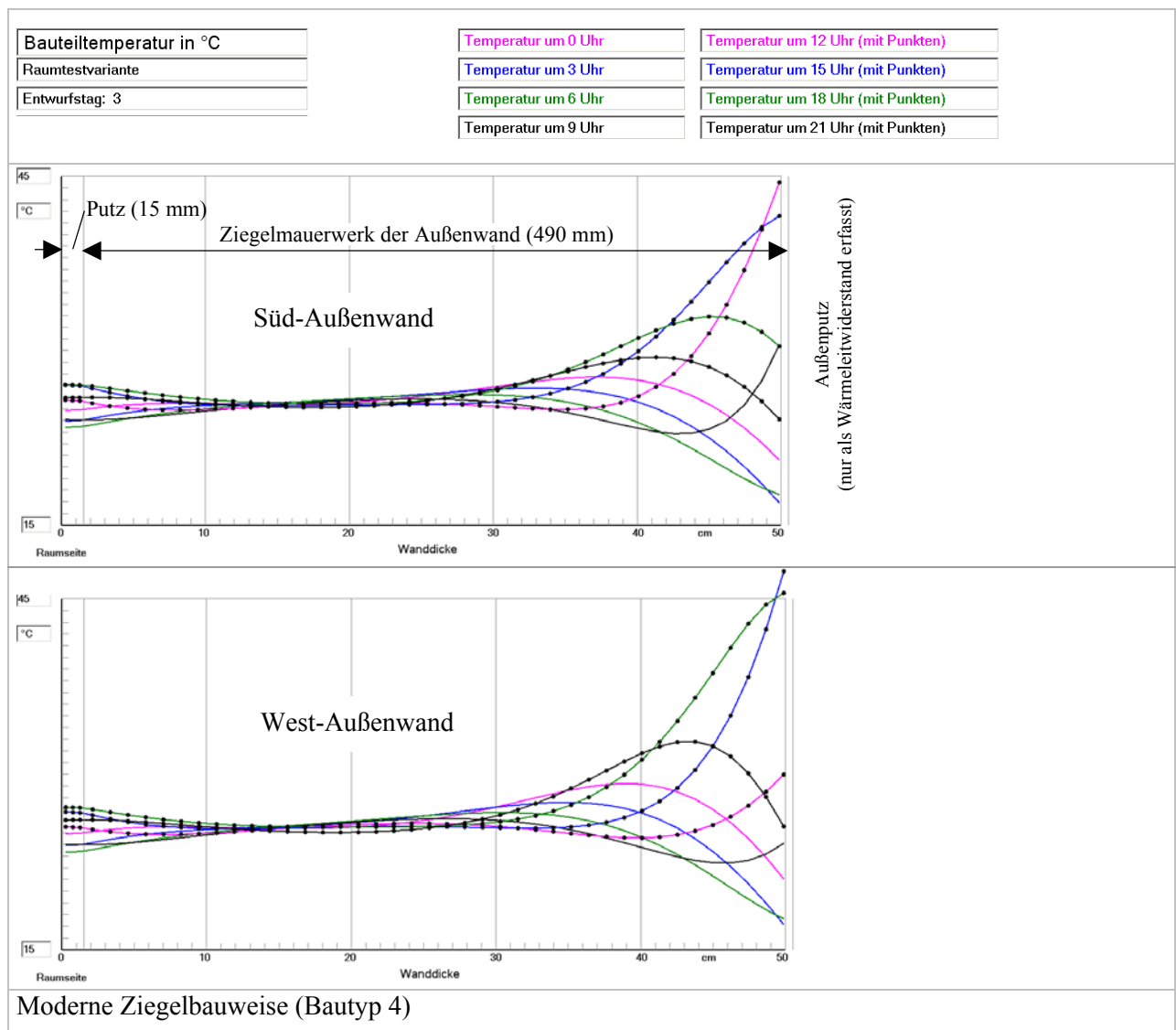


Bild 24 Gegenüberstellung der Temperaturverläufe in den Außenwänden bei Bautyp 4 zwischen der 67. und 91. Simulationsstunde am heiteren Julitag (Entwurfstag 3)

Das Bild 24 zeigt die Temperaturverläufe in zwei Außenwänden während der letzten 24 Simulationsstunden an einem heiteren Julitag (Entwurfstag 3). Diese Temperaturverläufe demonstrieren sehr eindrucksvoll die Realisierung der gewünschten Forderung. Die maximale Temperaturschwingung in der jeweiligen raumseitigen Elementschicht beträgt weniger als 4 K, während auf der Außenseite die Temperaturschwankungen in der jeweils äußeren Wandelementschicht mit 28

... 30 K extrem hoch sind. Auf der Außenseite wirkt die Änderung der Außentemperatur plus die solare Bestrahlung, die modellgemäß als Sonnenlufttemperatur erfasst ist. Sie ergibt sich in dieser Größe, weil sich auf der Ziegelwand keine äußere Dämmung befindet. Es erfolgt in die Süd-Außenwand von 9⁰⁰ Uhr bis 15⁰⁰ Uhr ein intensiver Wärmestrom. Die Temperaturverteilungen in der West-Außenwand entsprechen weitestgehend denen in der Süd-Außenwand. Aufgrund des zeitlichen Sonnenganges und des Sonnenstandes nimmt die außenseitige Wandtemperatur zwischen 15⁰⁰ Uhr und 18⁰⁰ Uhr besonders hohe Werte an.

Die gewünschte Dämmwirkung der Ziegelwand wird nicht nur durch die niedrige Heizlast (Tabelle 1) bestätigt, sondern sie zeigt sich auch in der gegenseitigen Nichtbeeinflussung der raumseitig und außenseitig aufgeprägten Temperaturschwingungen.

9 Einfluss der Phasenwandeltemperatur

Der Einfluss des Latentspeichermaterialeinsatzes zeigte sich bei der **leichten Holzbauweise (Bau-typen 2 und 5)** am markantesten. Deshalb werden an diesem Beispiel weitere Variationen bezüglich der **Phasenwandeltemperatur** ("Schmelztemperatur") vorgenommen. Ausgehend vom bisherigen Wert von 25 °C finden Materialien mit den Schmelztemperaturen 24 °C und 26 °C Verwendung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 und im Bild 25 dargestellt. Die bisherige Phasenwandelenthalpie ("Schmelzwärme") von 28,7 kJ/kg für die PCM-Gipsbauplatte gilt dabei unverändert.

Die Aussagen sind eindeutig, d. h., die Auswahl der geeigneten Phasenwandeltemperatur muss zielorientiert erfolgen.

■ Zur **Reduzierung der sommerlichen Überhitzung und/oder des Tageskühlbedarfs** ist die Phasenwandeltemperatur 26 °C vorteilhaft. Gegenüber der Wandeltemperatur von 25 °C ergeben sich die Verringerung der Tageshochgradstunden um 21 % und die des Tageskühlbedarfs um 7 %. Der winterliche Tagesheizbedarf steigt jedoch um ca. 4 % an, da infolge der höheren Phasenwandeltemperatur trotz der solaren Einstrahlung das Latentspeichermaterial kaum einem Phasenwandel ("Verflüssigung") unterliegt.

■ Zur **Senkung des winterlichen Heizbedarfs** sollte beispielsweise die Phasenwandeltemperatur 24 °C betragen. Gegenüber dem Vergleichswert von 25 °C folgt beim Tagesheizbedarf eine Einsparung von 5 %. Die Tageshochgradstunden am heiteren Julitag steigen jedoch um 49 % an.

■ Die **verbliche Darstellung zum PCM-Einsatz** vergleicht – wie einleitend bereits angesprochen – oftmals die Wärmespeicherkapazitäten von Bauplatten mit Beimischungen von Latentspeichermaterialien und die von herkömmlichen monolithischen Baustoffen, z. B. 1,5 cm dicke PCM-Gipsbauplatte entspricht 9 cm Betonwand oder 12 cm Ziegelwand. Auch wenn diese Aussage bei entsprechender Präzisierung stimmen mag, muss vor der Annahme, dass daraus automatisch die gleichen wärmetechnischen Verhältnisse im Raum folgen, dringend gewarnt werden.

■ Bei Einsatz eines Latentwärmespeichers ist der hauptsächliche Speichereffekt an einen engen Temperaturbereich gebunden. Im Gegensatz dazu wirkt bei einer sensiblen Speicherung die spezifische Wärmespeicherkapazität über den gesamten üblichen Raumtemperaturbereich. **Die Wahl der Phasenwandeltemperatur ist somit entscheidend, ob die winterliche Heizenergieeinsparung oder die sommerliche Raumtemperaturbegrenzung präferiert werden soll.**

Tabelle 6 Hauptergebnisse für den Bautyp 5 (Leichter Holzbau mit PCM-Gipsbauplatte) unter Variation der Phasenwandeltemperatur bei konstanter Phasenwandelenthalpie von 28,7 kJ/kg im Vergleich zum Bautyp 2

Bau- typ	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshoch- gradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung	heiterer Februartag	heiterer Julitag	extremer Sommertag
		W/m ²	Wh/(m ² d)	Kh/d	Wh/(m ² d)
2	Leichter Holzbau	44,4	153,4	25,2	76,4
5a	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 24\text{ °C}$	44,3	129,3	19,1	74,0
5	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 25\text{ °C}$	44,3	136,2	12,8	62,8
5b	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 26\text{ °C}$	44,3	142,3	10,1	58,6

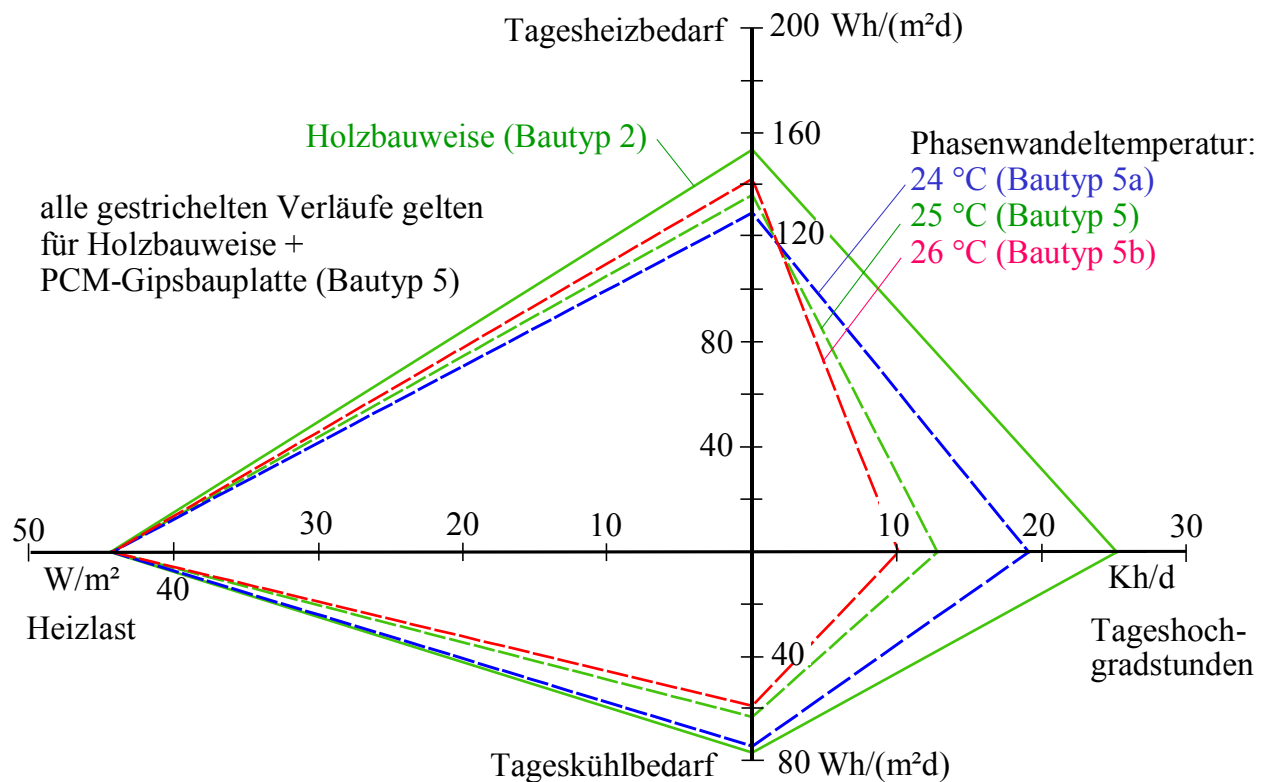


Bild 25 Grafische Darstellung der Ergebnisse für die Bautypen 2 und 5 sowie für zwei Variationen zum Bautyp 5 (Werte entsprechen der Tabelle 6)

10 Einfluss der Phasenwandelenthalpie

Die Variation der Phasenwandelenthalpie ("Schmelzwärme des PCM") wird wiederum an der **leichten Holzbauweise (Bautypen 2 und 5)** simuliert. Die bisherige Phasenwandelenthalpie von 28,7 kJ/kg für die PCM-Gipsbauplatte erfährt dabei eine Verdoppelung (57,4 kJ/kg), wobei die Phasenwandeltemperatur mit 25 °C konstant bleibt. Die Simulationsbefunde sind in Tabelle 7 und im Bild 26 zu finden. Der Einfluss der Phasenwandelenthalpie ist wiederum eindeutig orientiert.

Tabelle 7 Hauptergebnisse für den Bautyp 5 (Leichter Holzbau mit PCM-Gipsbauplatte) unter Variation der Phasenwandelenthalpie bei konstanter Phasenwandeltemperatur von 25 °C im Vergleich zum Bautyp 2

Bau- typ	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshoch- gradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung W/m ²	heiterer Februartag Wh/(m ² d)	heiterer Julitag Kh/d	extremer Sommertag Wh/(m ² d)
2	Leichter Holzbau	44,4	153,4	25,2	76,4
5	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $r_{\text{Wandel}} = 28,7 \text{ kJ/kg}$	44,3	136,2	12,8	62,8
5c	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $r_{\text{Wandel}} = 57,4 \text{ kJ/kg}$	44,3	135,2	8,1	31,3

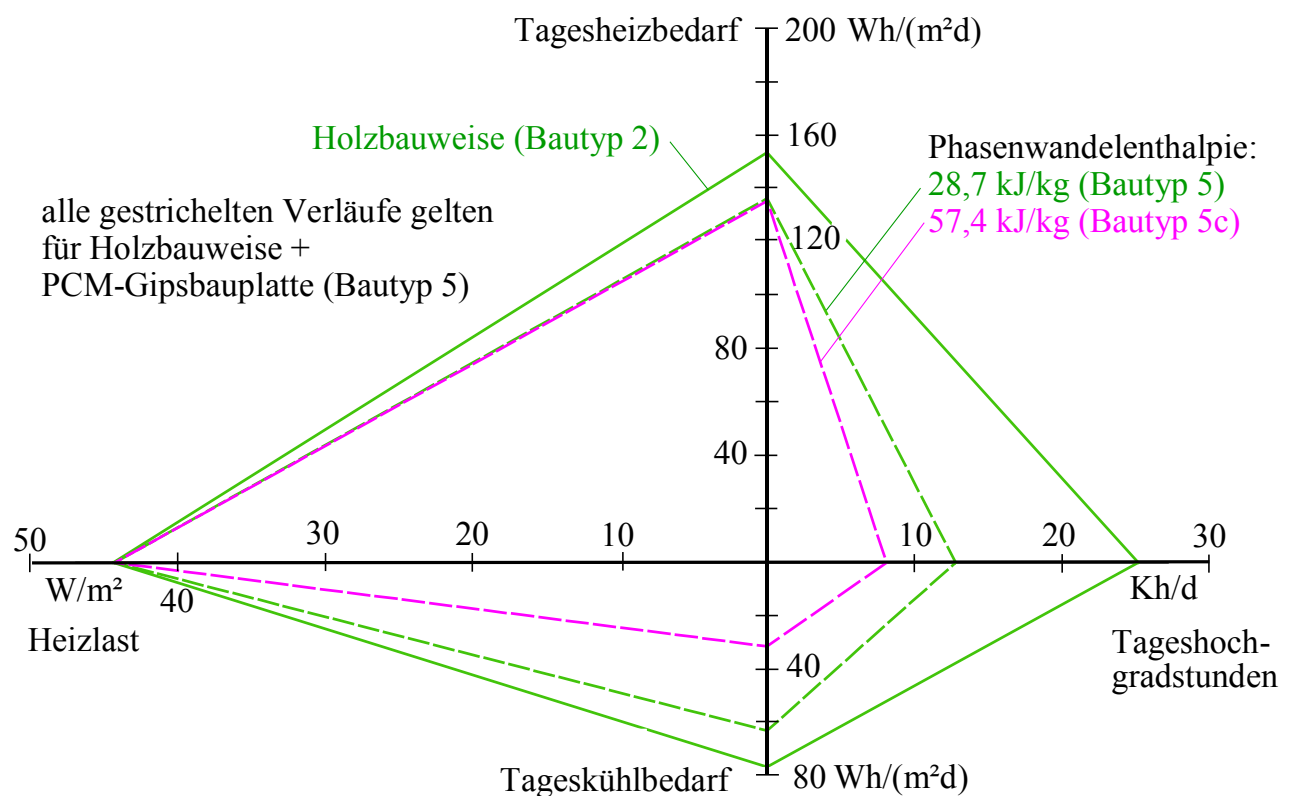


Bild 26 Grafische Darstellung der Ergebnisse für die Bautypen 2 und 5 sowie für eine Variation zum Bautyp 5 (Werte entsprechen der Tabelle 7)

- Gegenüber den Ursprungswerten sinken die **Tageshochgradstunden** um 37 % und der Tageskühlbedarf sogar um 50 %.
- Bezüglich des **winterlichen Heizbedarfs** bringt die höhere Phasenwandelenthalpie kaum eine energetische Verbesserung (1 %). Die bisher vorhandene PCM-Menge reichte auf dem unveränderten Niveau der Wandeltemperatur von 25 °C offenbar aus, um die solare Einstrahlung ohne Raumtemperaturüberschreitung zu binden.
- Der mengenmäßige Einsatz des Latentspeichermaterials und die Wahl der Phasenwandelparameter (Schmelztemperatur, Schmelzenthalpie) beinhalten ein großes Optimierungspotenzial, das aufgabenspezifisch zu bewerten und zu nutzen ist.

11 Variation der Originalbauweisen

Die bisher untersuchten Bauweisen zeichneten sich durch die verschiedenartigsten Wand- und Deckenkonstruktionen aus. Der Boden zum beheizten Untergeschossraum – bestehend aus einem Decken-Betonfertigteile mit Kunststoffbelag ($R_i = 0,044 \text{ m}^2\text{K/W}$) gemäß Werkplanung eines Fertighausanbieters – wurde bei allen Bautypen einheitlich zugrunde gelegt. Damit verfügten alle Bauweisen über einen wirkungsvollen Wärmespeicher. In einer weiteren Untersuchung, die hier aus Platzgründen nicht wiedergegeben wird, ist die **Deckenplatte** wärmetechnisch weitestgehend vom Testraum durch einen Fußbodenaufbau mit Trittschalldämmung, schwimmendem Estrich und Teppichbelag (Wärmeleitwiderstand $R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) abgekoppelt worden. Alle anderen bautechnischen Eigenschaften entsprechen unverändert den Bildern 10 bis 15. Die Hauptergebnisse der Simulationen sind in Tabelle 8 und im Bild 27 aufgeführt.

Tabelle 8 Zusammenstellung der Ergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 bei Erhöhung des Wärmeleitwiderstandes zur Geschossdecke durch einen Fußbodenaufbau und Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$)

Bau- typ	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshoch- gradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung W/m ²	heiterer Februartag Wh/(m ² d)	heiterer Julitag Kh/d	extremer Sommertag Wh/(m ² d)
1	Beton-Massivbau	40,1	82,5	33,6	147,0
4	Moderner Ziegelbau	40,4	66,9	51,7	126,6
2	Leichter Holzbau	41,4	179,8	93,0	171,5
5	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte	41,4	131,7	86,6	167,1
3	Massivholzbau	39,7	90,8	60,4	122,9
6	Massivholzbau + PCM-Lehmhauplatte	39,7	83,1	50,0	83,6

Die Veränderungen gegenüber den Resultaten der Originalbauweisen sind außerordentlich groß. Zum direkten Vergleich der früheren Extremvarianten **Beton-Massivbauweise (Bautyp 1)** und des **leichten Holzbaus (Bautyp 2) bzw. mit PCM-Gipsbauplatte (Bautyp 5)** sind die gleichen Varianten jedoch mit dem beschriebenen Fußbodenaufbau einschließlich Teppichbelag auf der Kellerdecke im Bild 28 gegenübergestellt. Die sehr unterschiedlichen Auswirkungen der baulichen Änderung demonstrieren wiederum die Komplexität der wärmetechnischen Vorgänge.

- Die **Heizlast** nimmt aufgrund der erhöhten Fußbodendämmung geringfügig ab, da der Wärmestrom zum darunter liegenden Hobbyraum, der eine niedrigere Temperatur aufweist, sinkt.
- Der **Tagesheizbedarf** präsentiert keine einheitliche Tendenz bei den verschiedenen Bautypen. Die Bautypen 1 und 5 werden näher betrachtet. Anhand der Raumtemperaturverläufe der ausgewählten Varianten (Bild 29) können die Ergebnisse nicht ausreichend erklärt werden. Deshalb geben die Bilder 30 und 31 die Heizbedarfskurven direkt wieder.

Der ursprünglich hohe Heizbedarf bei der Massivbauweise ist infolge der thermischen Abkopplung der Betondecke vom Raum deutlich reduziert (53 %), da sich am Tage die Heizzeit verkürzt und der Maximalwert verringert.

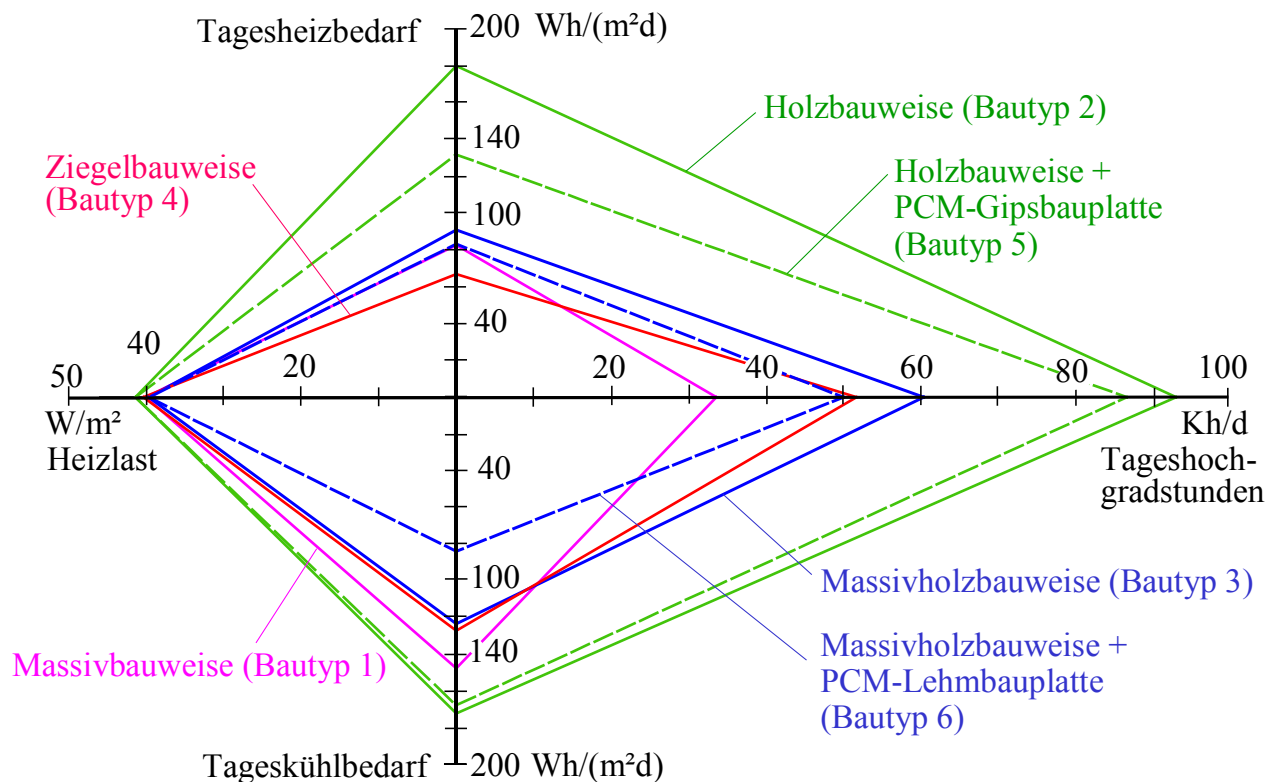


Bild 27 Grafische Darstellung der Ergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 bei Erhöhung des Wärmeleitwiderstandes zur Geschossdecke durch einen Fußbodenaufbau und Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$)

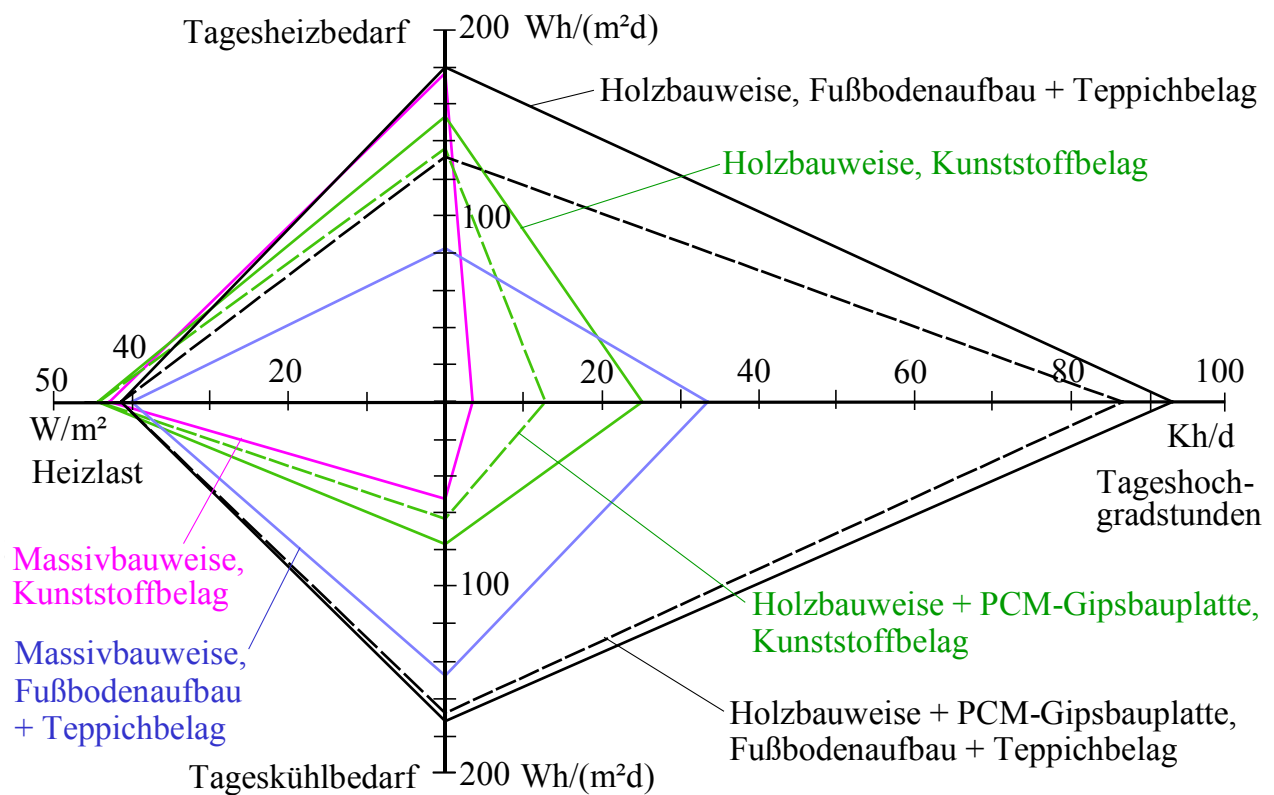


Bild 28 Direkter Vergleich der Ergebnisse für die Bautypen 1, 2 und 5 bei Originalausstattung des Bodens mit Kunststoffbelag ($R_i = 0,044 \text{ m}^2\text{K/W}$) und bei Anordnung eines umfassenden Fußbodenaufbaus einschließlich Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$)

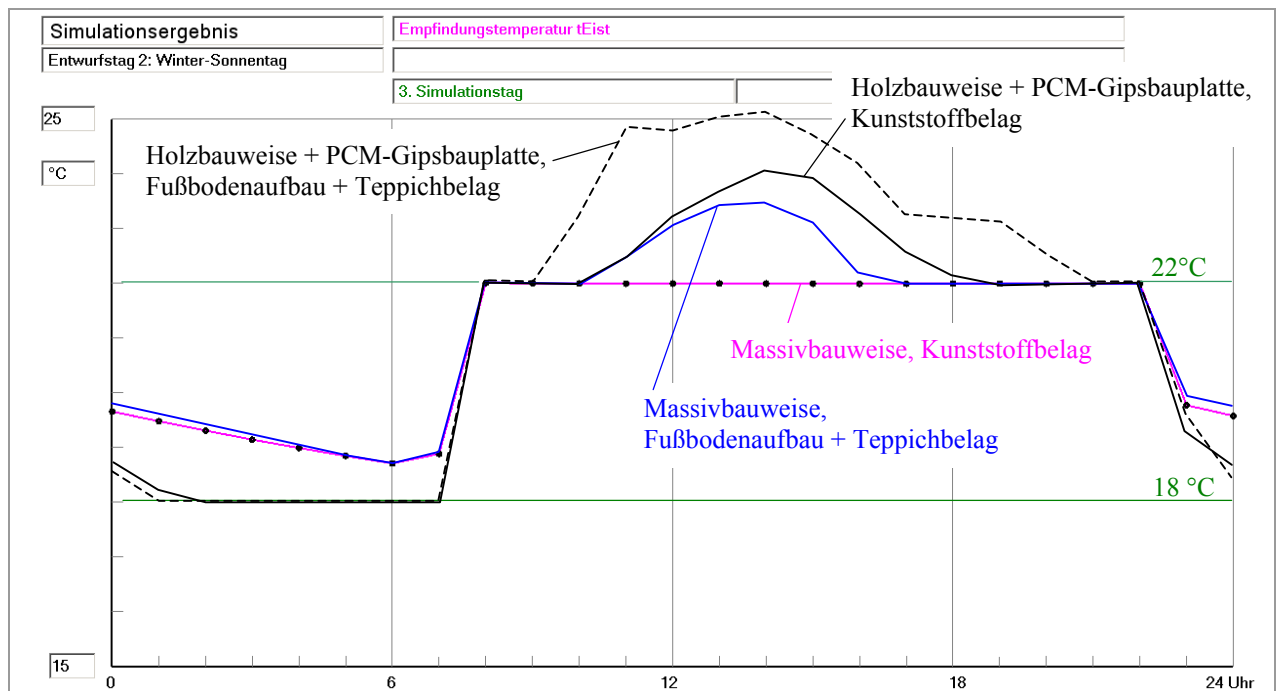


Bild 29 Raumtemperaturverläufe jeweils am 3. Simulationstag für die Bautypen 1 und 5 bei Originalausstattung des Bodens mit Kunststoffbelag ($R_i = 0,044 \text{ m}^2\text{K/W}$) und bei Anordnung eines Fußbodenaufbaus mit Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) am heiteren Februartag

Dagegen ändert sich bei der Holzbauweise mit der PCM-Gipsbauplatte der Tagesheizbedarf gegenüber der Ursprungsvariante nur um etwa 3 %. Wegen der geringeren Speicherkapazität infolge der Deckenabkopplung steigt die Raumtemperatur über 25 °C an (Bild 29), sodass die Phasenumwandlung ("flüssig") teilweise erfolgt. Dadurch kann man abends relativ lange ohne Heizung auskommen. Andererseits wird die Verschattung zeitweise wirksam, sodass insgesamt weniger Solarwärme in den Raum gelangt.

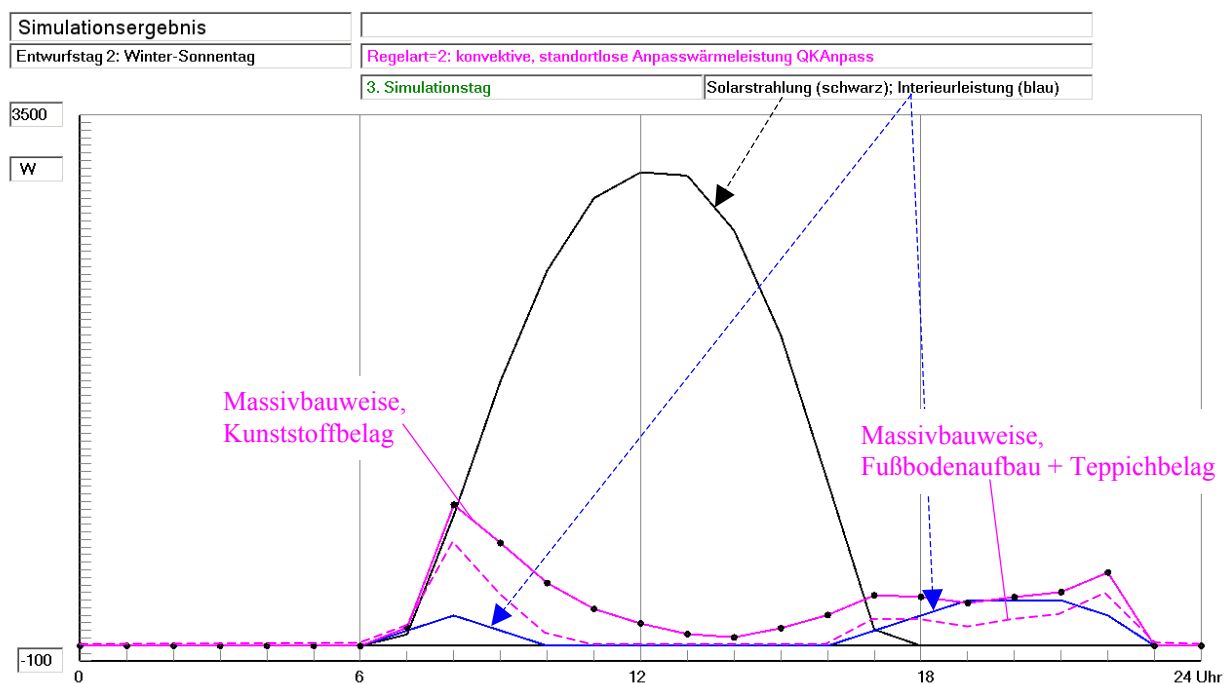


Bild 30 Leistungsverläufe jeweils am 3. Simulationstag für den Bautyp 1 bei Originalausstattung des Bodens mit Kunststoffbelag ($R_i = 0,044 \text{ m}^2\text{K/W}$) und bei Anordnung eines Fußbodenaufbaus mit Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) am heiteren Februartag

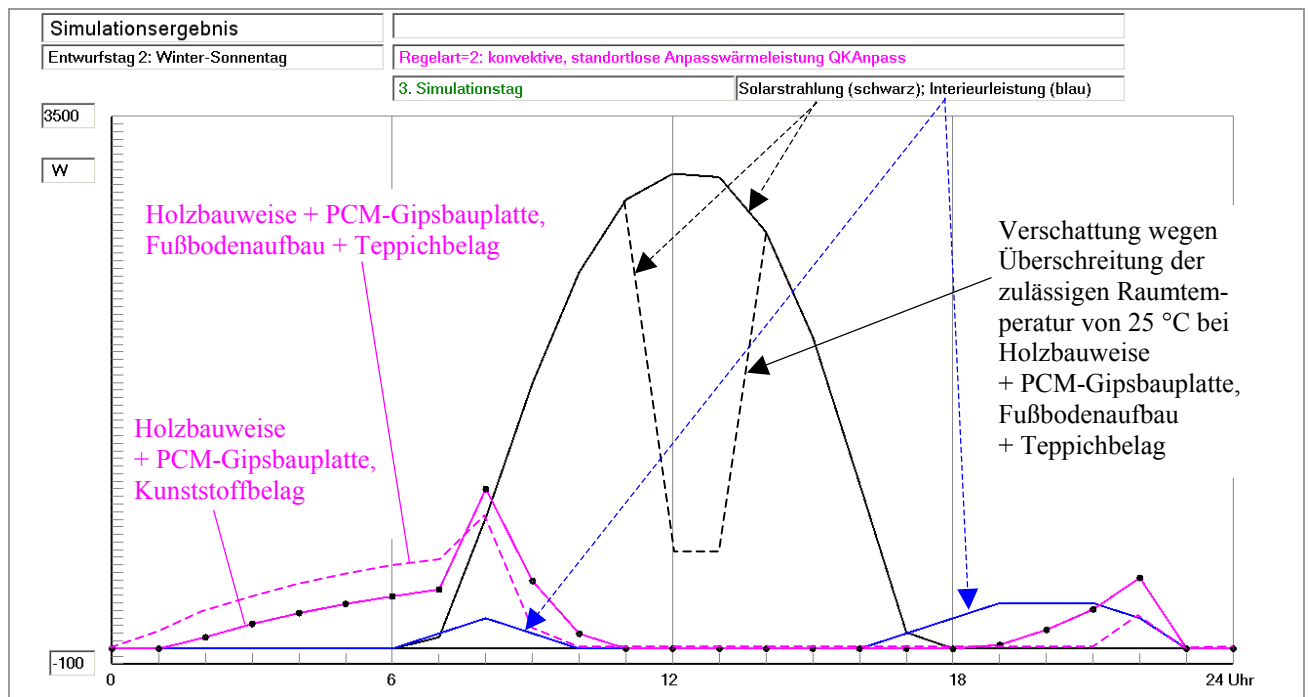


Bild 31 Leistungsverläufe jeweils am 3. Simulationstag für den Bautyp 5 bei Originalausstattung des Bodens mit Kunststoffbelag ($R_i = 0,044 \text{ m}^2\text{K/W}$) und bei Anordnung eines Fußbodenaufbaus mit Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) am heiteren Februartag

Die geschilderten Überlagerungen der Vorgänge führen trotz stark veränderter Heizleistungsverläufe (Bild 31) zum fast gleichen Tagesheizbedarf für die Holzbauweise mit PCM-Gipsbauplatte unabhängig von der Fußbodengestaltung.

■ Die **sommerlichen Verhältnisse** (Tageshochgradstunden, Tageskühlbedarf) verschlechtern sich bei allen Bautypen sehr deutlich. Besonders bemerkenswert ist, dass die Wirkung des Latentspeichermaterials enorm zurückgeht.

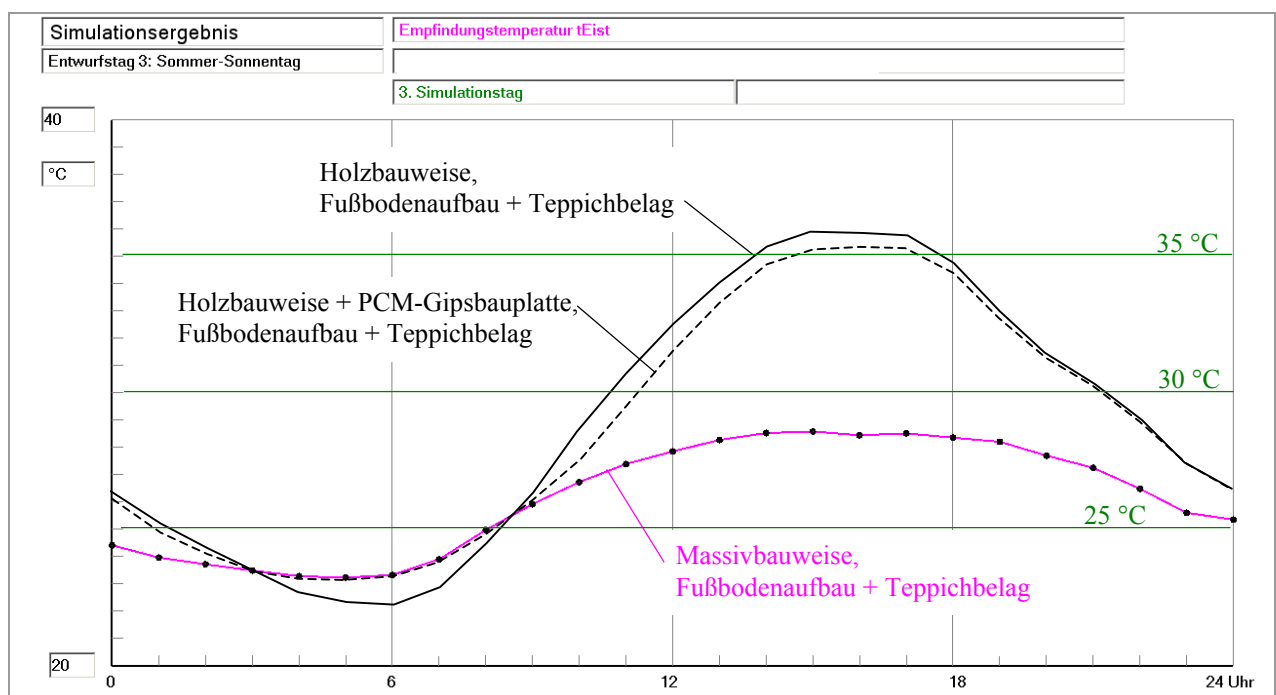


Bild 32 Raumtemperaturverläufe jeweils am 3. Simulationstag für die Bautypen 1, 2 und 5 bei Anordnung eines Fußbodenaufbaus mit Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) am heiteren Julitag

Die Ursache liegt beispielsweise bei den Tageshochgradstunden (freischwingende Raumtemperatur beim Entwurfstag 3) an der viel zu hohen Raumtemperatur (Bild 32). Dadurch kann allerhöchstens noch abschnittsweise ein Phasenwandel bewirkt werden.

Die starke Vergrößerung des Tageskühlbedarfs betrifft alle Bautypen annähernd verhältnismäßig, da die Wirkung der nächtlichen Wärmeentspeicherung wegen der mangelhaften thermischen Ankopplung der Betondecke entfallen ist.

■ Schlussfolgernd ist festzustellen, dass sich aufgrund der **einen** baulichen Veränderung die thermischen Raumverhältnisse im Sommer sehr negativ gestalten, wobei vor allem **die Tageshochgradstunden am heiteren Julitag völlig unakzeptabel sind**. Es gibt dagegen beispielsweise nachfolgende Auswege: Die Speicherkapazitäten der Raumumfassungen werden wieder vergrößert, wodurch sowohl die Tageshochgradstunden bei inaktiver Raumkühlung als auch der Tageskühlbedarf sinken. Oder es wird entgegen der Definition für die Randbedingungen zum heiteren Julitag (Entwurfstag 3) eine Verschattung vorgenommen, was nur die Hochgradstunden reduziert, da definitionsgemäß bei Kühlbetrieb (Entwurfstag 4) bereits eine stringente Verschattung der transparenten Flächen vorausgesetzt wird.

12 Variation der Randbedingungen

Es werden die zuletzt betrachteten baulichen Gegebenheiten beibehalten. Das bedeutet, auf der Betondecke befindet sich der bereits vorgestellte Fußbodenaufbau mit Trittschalldämmung, schwimmendem Estrich und Teppichbelag (Wärmeleitwiderstand $R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$). Zur Reduzierung der Tageshochgradstunden unter sommerlichen Bedingungen bei völlig freischwingender Raumtemperatur wird eine **Verschattung am heiteren Julitag (Entwurfstag 3)** vorgeschrieben. Bei einer Gesamtsonnenstrahlung von $>250 \text{ W/m}^2$ auf die jeweilige Glasfläche erfolgt automatisch die Aktivierung des Sonnenschutzes mit einem Abminderungsfaktor von $F_C = 0,4$. Die Simulationsergebnisse für die Entwurfstage 1, 2 und 4 bleiben damit unverändert. Das Gesamtergebnis für die ausgewählten Testtage im Jahresgang ist in Tabelle 9 enthalten und im Bild 33 visualisiert.

Tabelle 9 Hauptergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 bei Vorhandensein eines Wärmeleitwiderstandes zur Geschossdecke durch einen Fußbodenaufbau und Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) und bei Reduzierung der solaren Einstrahlung in den Testraum am heiteren Julitag (Entwurfstag 3) durch Wirken eines Abminderungsfaktors infolge Verschattung von $F_C = 0,4$ an den transparenten Flächen bei der Strahlungsdichte $>250 \text{ W/m}^2$

Bau- typ	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshoch- gradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung	heiterer Februartag	heiterer Julitag	extremer Sommertag
		W/m^2	$\text{Wh}/(\text{m}^2\text{d})$	Kh/d	$\text{Wh}/(\text{m}^2\text{d})$
1	Beton-Massivbau	40,1	82,5	1,9	147,0
4	Moderner Ziegelbau	40,4	66,9	4,6	126,6
2	Leichter Holzbau	41,4	179,8	22,6	171,5
5	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte	41,4	131,7	7,4	167,1
3	Massivholzbau	39,7	90,8	7,0	122,9
6	Massivholzbau + PCM-Lehmbauplatte	39,7	83,1	2,9	83,6

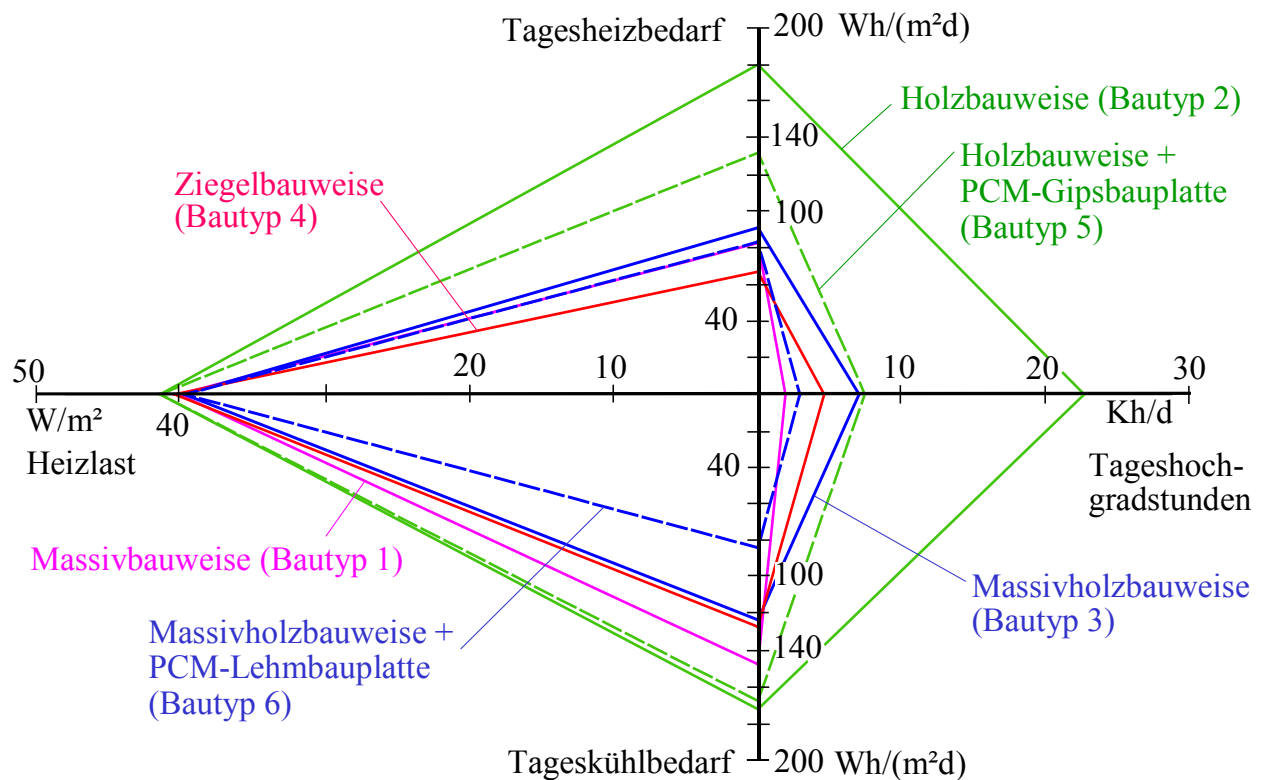


Bild 33 Grafische Darstellung der Ergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 bei Vorhandensein eines Wärmeleitwiderstandes zur Geschossdecke durch einen Fußbodenaufbau und Teppichbelag ($R_i = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) und bei Reduzierung der solaren Einstrahlung in den Testraum am heiteren Julitag (Entwurfstag 3) durch Wirken eines Abminderungsfaktors infolge Verschattung von $F_c = 0,4$ an den transparenten Flächen bei der Strahlungsdichte $>250 \text{ W/m}^2$

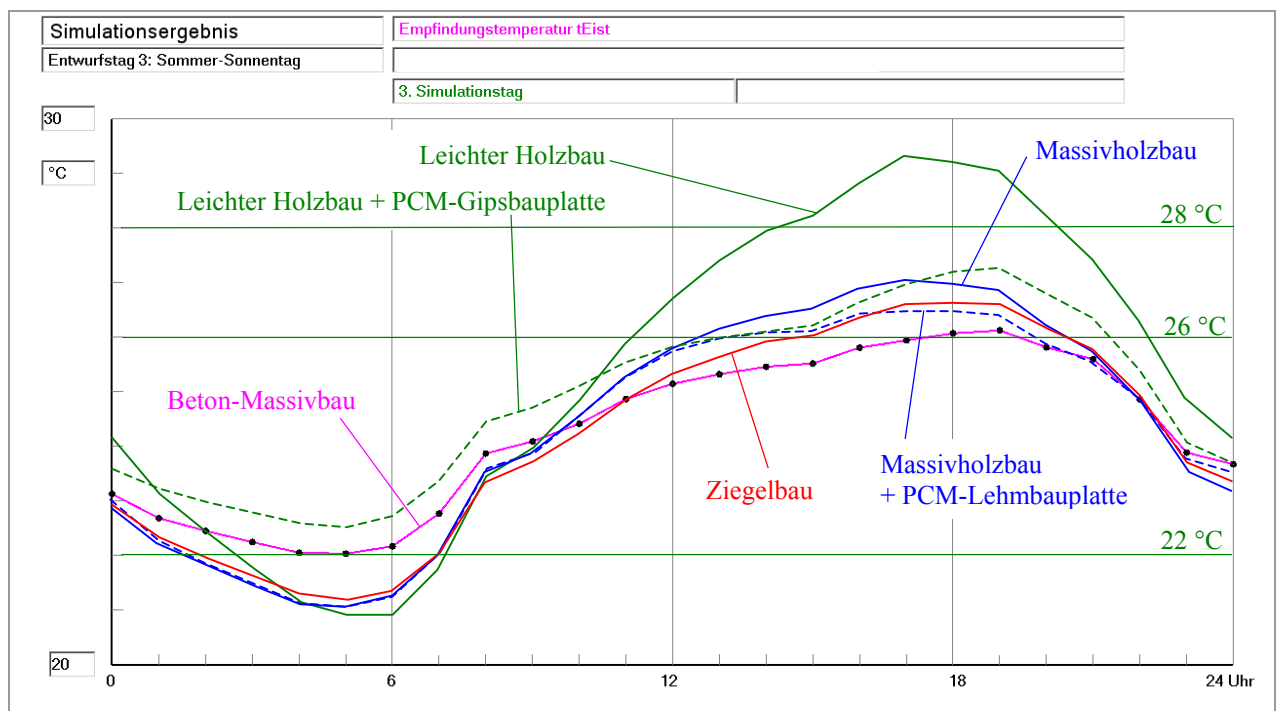


Bild 34 Raumtemperaturverläufe jeweils am 3. Simulationstag für alle untersuchten Bauweisen (Bautypen 1 bis 6) unter der bautechnischen Besonderheit eines vorhandenen Fußbodenaufbaus mit Teppichbelag am heiteren Julitag bei Annahme einer Verschattung ($F_c = 0,4$) bei der Gesamtstrahlungsdichte $>250 \text{ W/m}^2$

■ Die Tageshochgradstunden am heiteren Julitag verringern sich gegenüber der Vorgängervariante gemäß Tabelle 8 und Bild 27 drastisch. Es treten sogar noch kleinere Werte als bei der Originalvariante nach Tabelle 1 und Bild 16 auf. Die Raumtemperaturverläufe nach Bild 34 ähneln nunmehr wieder denen im Bild 18, wobei die Maximalwerte am 3. Simulationstag (48. bis 72. Simulationsstunde) auf eine spätere Zeit verschoben sind und etwas niedriger liegen. Die vorstehenden Feststellungen sind jedoch insofern *trivial*, da eine Verschattung selbstverständlich ein Absenken der Raumtemperatur bewirkt.

■ Hauptsächlich sollte gezeigt werden, dass man beim Einsatz von Latentspeichermaterial stets sicherstellen muss, dass die *Phasenwandeltemperatur innerhalb der Temperaturschwingungen* in den Bauteilen liegt. Dies ist offenbar erreicht worden, wie die großen Verbesserungen der Bauweisen mit integrierten PCM-Platten gegenüber den analogen Konstruktionen ohne Latentspeichermaterial verdeutlichen. Nach Tabelle 9 sinken die Tageshochgradstunden beim leichten Holzbau auf 33 % und beim Massivholzbau auf 41 %. Diese Unterschiede erklären sich unter anderem mit den Temperaturkurven in den raumseitigen Bauplatten. Im Bild 35 werden zwei Raumumfassungenflächen näher betrachtet. In der Gipskartonplatte verweilen die Materialtemperaturen während etwa 3/4 der Tageszeit bei der Phasenwandeltemperatur von 25 °C, wobei die gesamte Plattendicke von 15 mm an der Phasenwandlung beteiligt ist. Dies trifft bei der Lehmbauplatte des Massivholzbaus bezüglich der Verweildauer der Materialtemperatur bei der Phasenwandeltemperatur von 25,5 °C und auch bezüglich der einbezogenen Plattendicke leider nicht zu. Somit besteht noch Optimierungsbedarf.

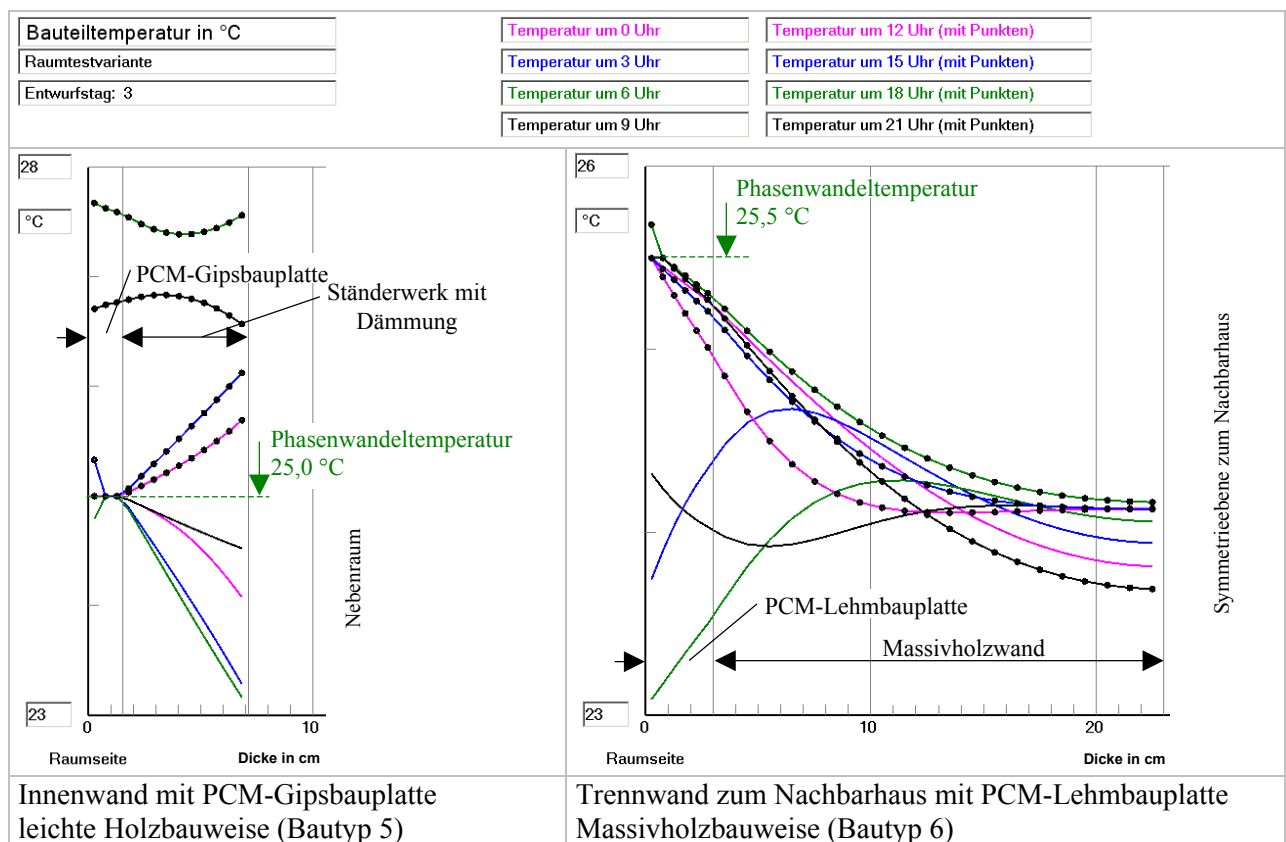


Bild 35 Gegenüberstellung der Temperaturverläufe in verschiedenen Raumumfassungen des Bautyps 5 (leichte Holzbauweise mit PCM-Gipsbauplatte) und des Bautyps 6 (Massivholzbauweise mit PCM-Lehmbauplatte) zwischen der 67. und 91. Simulationsstunde am heiteren Julitag (Entwurfstag 3)

13 Wärmephysiologische Behaglichkeit

Für alle betrachteten Varianten wurden parallel zu den Hauptkriterien die Verteilungen der **Strahlungstemperatur der Umgebung**, der **Empfindungstemperatur** und der **Strahlungstemperatur-Asymmetrie** über dem Grundriss des Testraumes am Ende der Simulationszeit (19⁰⁰ Uhr) ermittelt. Als Höhe der Prüfebene galt: Strahlungs- und Empfindungstemperatur 1 m; Strahlungstemperatur-Asymmetrie 1,2 m (Kopfhöhe eines sitzenden Menschen). Bild 36 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den Bautyp 5 im Auslegungsfall (Entwurfstag 1).

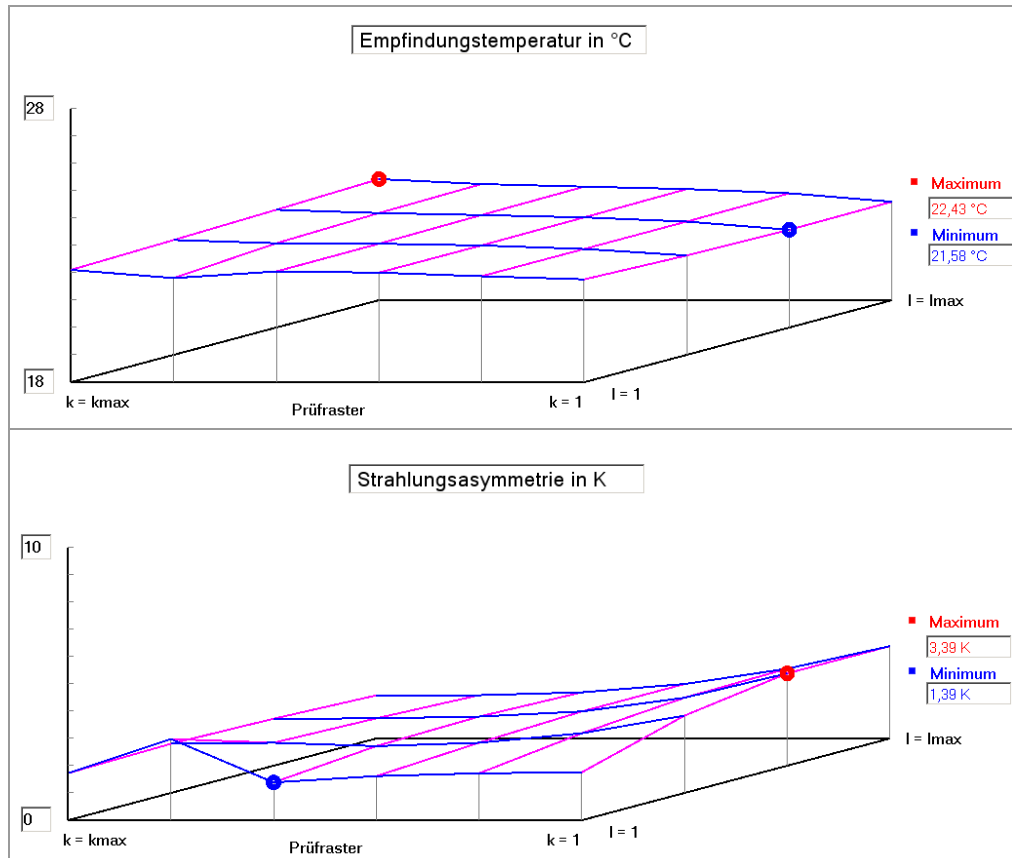


Bild 36 Verteilung der Empfindungstemperatur und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie über der Nutzfläche des Raumgrundrisses für den leichten Holzbau mit PCM-Gipsbauplatte (Bautyp 5) um 19⁰⁰ Uhr des Entwurfstages 1 (Auslegungsfall)

In Tabelle 10 finden sich Zusammenstellungen der Schwankungen der Empfindungstemperatur Δt_E und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie Δt_{S-A} innerhalb der Nutzfläche des Testraumgrundrisses. Für Δt_E ist der Maximalwert, der im Tagesverlauf (letzte 24 Simulationsstunden) auftritt, ausgewählt worden. Δt_{S-A} gilt am Ende der Simulationszeit (Tageszeit: 19⁰⁰ Uhr). **Generell ist festzustellen, dass alle thermischen Behaglichkeitsanforderungen sehr gut erfüllt werden!**

Unbefriedigend sind teilweise die vertikalen Lufttemperaturgradienten im Winter, da infolge der rein konvektiven Heizung und der Zufuhr der infiltrierten Außenluft direkt über dem Fußboden extrem ungünstige Bedingungen angenommen wurden. Die standortlose, über die gesamte Raumhöhe wirkende Konvektionsheizung wurde gewählt, um die Vielfalt der Bauvarianten nicht durch Vorgabe eines bestimmten Anlagensystems – z. B. einer Fußbodenheizung – zu beschränken. Unter realen Bedingungen sind bedeutend günstigere Verhältnissen zu erwarten. Der Einfluss des Heizsystems auf den vertikalen Lufttemperaturgradienten ist extrem groß, wie gemäß Tabelle 11 auf der Basis von [1] hervorgeht.

Tabelle 10 Maximale Unterschiede der Empfindungstemperatur Δt_E und maximale Strahlungstemperatur-Asymmetrie Δt_{S-A} innerhalb der Nutzfläche (Aufenthaltsbereich) im Testraum bei Betrachtung der Originalvarianten

Bau- typ	Bauweise	Entwurfstag 1 Auslegung		Entwurfstag 2 heiterer Februartag		Entwurfstag 3 heiterer Julitag		Entwurfstag 4 extremer Sommertag	
		Δt_E K	Δt_{S-A} K	Δt_E K	Δt_{S-A} K	Δt_E K	Δt_{S-A} K	Δt_E K	Δt_{S-A} K
1	Beton-Massivbau	0,8	3,4	0,7	2,6	0,6	2,4	0,2	1,6
4	Moderner Ziegelbau	0,8	3,4	1,1	2,8	0,8	2,3	0,2	1,3
2	Leichter Holzbau	0,9	3,4	1,2	2,9	0,9	3,1	0,3	1,5
5	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte	0,9	3,4	1,1	2,9	1,0	2,9	0,4	1,5
3	Massivholzbau	0,8	3,4	1,2	2,7	0,9	2,5	0,3	1,3
6	Massivholzbau + PCM-Lehmbauplatte	0,8	3,4	1,2	2,7	0,8	2,3	0,2	1,3

Tabelle 11 Lufttemperaturgradienten in Abhängigkeit des Heizsystems nach Simulationsbeispielen in [1]

Heizungsart	vertikaler Lufttemperaturgradient in K/m
Fußbodenheizung	2,0
Deckenheizung	3,9
Zuluftheizung	1,2
Umluftheizung	6,7
Ideale Konvektionsheizung	4,0

14 Fazit

Die umfangreichen Untersuchungen und die Fülle der ermittelten Ergebnisse demonstrieren, dass es keine eindeutig zu präferierende bauliche und/oder materialtechnische Lösung für ein Wohngebäude gibt. Diese Erkenntnis ist grundsätzlich vorteilhaft, denn sie erhält uns dauerhaft die Vielfalt des Bauens und die spannende Suche nach thermisch behaglichen und energetisch günstigen Realisierungen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien nachfolgende Anmerkungen gestattet:

Weiterentwicklungen bekannter Baustoffe

Es zeigen sich sehr interessante Wege auf, wie Wärmespeicherkapazität und Wärmedämmfähigkeit optimal vereinigt werden können. Bemerkenswert ist dabei, dass man sich beispielsweise dem gleichen Ziel von zwei völlig unterschiedlichen Ausgangsmaterialien bzw. Bauweisen nähert:

- Der **moderne Ziegelbau** besitzt durch die Verwendung von Gitterziegeln und Feinbettmörtel gegenüber dem Vollziegelmauerwerk eine hohe Dämmfähigkeit bei verminderter Wärmespeicherkapazität.
- Der **Massivholzbau** nutzt die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Holzes und erreicht durch das kreuzweise Aneinanderfügen von Brettern aus kostengünstiger "Seitenware" eine relativ hohe Wärmespeicherkapazität.

In der Folge dieser Entwicklungen können Wohnbauten mit sehr ähnlichen Nutzungseigenschaften entstehen, wie die Bilder 16, 27 sowie 33 unter unterschiedlichsten Randbedingungen eindeutig zeigen. Die Ursache der bestehenden Ähnlichkeit liegt in den Stoffwertpaarungen in Verbindung mit den Bauteildicken begründet. Einen Auszug gibt Tabelle 12 wieder.

Tabelle 12 Stoffwerte und Wärmekapazität von Ziegelmauerwerk und Massivholzbauteilen im Vergleich

Bauweise	Dichte kg/m ³	Wärmeleit- fähigkeit W/(m K)	Spezifische Wärmekapazität J/(kg K)	Temperatur- leitfähigkeit m ² /s	flächenbezogene Wärmekapazität kJ/(m ² K)
Modernes Ziegelmauerwerk	650	0,13	920	$217 \cdot 10^{-9}$	bei $\delta = 490$ mm: 293
Massivholzkonstruktion	600	0,15	1600	$156 \cdot 10^{-9}$	bei $\delta = 300$ mm: 288

Neue Baustoffe für strukturehomogene Bauteile

Sie müssen für den Einsatz in unseren Breiten unbedingt Wärmedämm- und Wärmespeicherkapazitäten in sich vereinen. In erster Näherung kann man sich an den Stoffwerten bzw. an komplexen wärmetechnischen Größen bewährter Lösungen orientieren (vgl. auch Tabelle 12).

Spezielle Baustoffentwicklungen

Diese Neu- oder Weiterentwicklungen dienen meistens der gezielten Verbesserung **einer** Stoffeigenschaft. Hierzu gehören beispielsweise Vakuumisulationswerkstoffe (VIP) mit hervorragenden Wärmedämmeigenschaften oder Latentspeichermaterialien (PCM) mit hohen Wärmespeicherkapazitäten aufgrund des Phasenwandels. Diese Baustoffe können in der Regel nur in Verbindung mit anderen Materialien Raumumfassungen bilden, die im einfachsten Fall als Sandwichelemente gestaltet sind. Zukünftig wird man verstärkt auch **Komposite** kreieren.

Integration von Latentspeichermaterial

Mikroverkapselte Paraffine im Putz oder in Bauplatten unterschiedlicher Grundmaterialien (Gips, Lehm usw.) sind in jüngster Vergangenheit bereits realisiert worden. **Die thermisch-energetischen Wirkungen beim Einsatz von Latentspeichermaterial sind jedoch sehr stark von seiner Phasenwandeltemperatur abhängig.** Bereits bei der Wahl der Schmelztemperatur ist zu entscheiden, ob die Speicherwirkung bevorzugt der winterlichen Heizenergieersparnis durch passive Solarenergienutzung oder der wärmephysiologischen Verbesserung im Sommer durch vergrößerte Wärmespeicherung am Tage und Entladung mittels verstärkter Nachtlüftung dienen soll. Beide Ziele sind nicht gleichzeitig erfüllbar. Der kombinierte Einsatz von Latentspeichermaterialien mit beispielsweise zwei unterschiedlichen Phasenwandeltemperaturen könnte bei gleichzeitiger Erhöhung des PCM-Anteils sinnvoll sein. Vor dem Einsatz eines Materialgemisches mit einem Schmelztemperaturbereich wird allerdings gewarnt.

Zahlreiche Latentspeichermaterialien haben **keine identische Schmelz- und Erstarrungstemperatur.** Die Unterschiede sind produktabhängig. Vorzugsweise sollte Material mit **kleiner Hysterese** eingesetzt werden. Die in den vorgestellten Untersuchungen verwendeten Phasenwandeltemperaturen sind als **Mittelwerte zwischen Schmelzen und Erstarren** zu verstehen. Generell ist es derzeit noch problematisch, verlässliche Produktangaben zu bekommen.

Der **einfache Vergleich der Speicherkapazitäten** von Latentmaterialien mit konventionellen Bauteilen – wie in Werbeaussagen oftmals formuliert – ist bezüglich der wärmetechnischen Auswirkungen auf den Raum nicht aussagefähig.

Komplexe Simulation

Im Ergebnis der zahlreichen Beispielrechnungen kann nicht erwartet werden, dass mittels einer komplexen Ersatzgröße das thermisch-energetische Raumverhalten bewertbar ist.

Die Komplexität aus **Raumgeometrie, thermischen Randbedingungen und Bauweisen** – mit den speziellen Parametern Wärmespeicherkapazität, Temperaturleitfähigkeit und Materialdicke sowie möglichem PCM-Anteil – gestattet nicht das Auflösen in berechenbare Einzelsvorgänge, um die partiellen Ergebnisse anschließend durch Superposition zu einem "Endergebnis" zusammenzusetzen.

Aufschluss kann nur eine detaillierte Komplexsimulation geben. Das "Dynamische Raummodell" nach [1] hat sich für die Lösung dieser Aufgabe erneut empfohlen.

Literaturzusammenstellung

- [1] GLÜCK, B.: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. <http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (Rubrik "Arbeit bisher" ⇒ Projekt 14)

Kostenlos erhältlich unter:

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

oder

<http://www.berndglueck.de/Raummodell>

Verfügbare Abschnitte: Kurzfassung

Bitte lies mich!

Teil A: Allgemeine Simulationsgrundlagen

Teil B: Simulation stationärer Verhältnisse

Teil C: Simulation instationärer Verhältnisse

Teil D: Erste Ergänzung der instationären Simulation

Rechenprogramm

Zwei Testbeispiele

- [2] GLÜCK, B.: Dynamisches Raummodell (Kurzfassung), Heizung-Lüftung-Haustechnik 56 (2005), Teil 1 Heft 5, S. 26-31; Teil 2 Heft 6, S. 34-39

Forschungskomplex

**EFFIZIENTER
UMWELTENERGIEEINSATZ
BEI WOHNBAUTEN**

Forschungsthema

**WÄRMETECHNISCHER VERGLEICH
AUSGEWÄHLTER BAUTECHNIKEN
UND BETRIEBSWEISEN VON WOHNBAUTEN**

Ergänzung zum Kurzbericht von 2005

Sommer 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Bisherige Ergebnisse	3
3	Modellierung des Phasenwandelbereiches	5
4	Neue Ergebnisse	6
4.1	Leichte Holzbauweise mit 15 mm PCM-Gipsbauplatte	6
	Auswertung der Simulationsergebnisse für die leichte Holzbauweise	9
4.2	Massivholzbauweise mit 30 mm PCM-Lehmbauplatte	11
	Auswertung der Simulationsergebnisse für die Massivholzbauweise	13
5	Fazit	13
	Literaturzusammenstellung	14

Die Untersuchung wurde von der ROM-Umwelt-Stiftung initiiert und gefördert, wofür sich der Autor herzlich bedankt.

Besonderer Dank gebührt dem Projektleiter Herrn BURKHARD HEYDEN, der als Architekt bei der thematischen Bearbeitung stets ein sehr wertvoller Gesprächspartner war.

Im Jahre 2005 wurden für vier ausgewählte Entwurfstage mit Hilfe des "Dynamischen Raummodells" [1] unterschiedliche Beton-, Ziegel- sowie Holzleicht- und Massivholzbauweisen untersucht. Die Originalholzbauten sind in zwei ergänzenden Varianten noch mit Bauplatten, die Latentspeichermaterialien – sogenannte PCM – enthalten, bestückt worden. Die ermittelten thermisch-energetischen Nutzeigenschaften erlaubten ein ganzheitliches Urteil über den gesamten Jahresgang [2]. Das damals verwendete Simulationsprogramm bildete das Latentspeichermaterial bei einer festen Phasenwandeltemperatur ab. Nach einer inhaltlichen Erweiterung des "Dynamischen Raummodells" [3] sind nunmehr ergänzende Simulationen für Speichermaterialien mit Phasenwandelbereichen durchgeführt worden. Die Ergebnisveränderungen werden vorgestellt.

1 Einführung

Es gelten die baulichen Gegebenheiten für die [sechs Bauweisen](#), wie sie die Bilder 10 bis 15 in [2] zeigen, uneingeschränkt auch für diese Betrachtung:

Bautyp 1: Fertighaus in [Massivbauweise](#) (Beton)

Bautyp 2: Fertighaus in [leichter Holzbauweise](#) (Rahmen-/Tafelbau)

Bautyp 3: Fertighaus in [Massivholzbauweise](#)

Bautyp 4: Massivhaus in [moderner Ziegelbauweise](#)

Bautyp 5: Fertighaus in [leichter Holzbauweise](#) (Rahmen-/Tafelbau) mit [PCM-Gipsbauplatte](#)

Bautyp 6: Fertighaus in [Massivholzbauweise](#) mit [PCM-Lehmbauplatte](#).

Für die Bautypen 1 bis 6 wird eine [gut wärmespeichernde Betondecke zum Kellergeschoss](#) – wie bei den früher untersuchten Originalvarianten mit einer sehr guten thermischen Ankopplung an den Raum – angenommen.

Des Weiteren werden auch alle [anlagentechnischen und betriebsbedingten Randbedingungen](#) beibehalten. So gilt z. B. für die Definition der [vier Entwurfstage](#) gemäß der Bilder 6 bis 9 in [2]:

Entwurfstag 1: Wintertag (Berechnung der [Auslegungsheizlast](#))

Entwurfstag 2: heiterer Februartag (Ermittlung des ergänzenden [Tagesheizenergiebedarfs](#) zum Erreichen einer Raumtemperatur von 22 °C am Tage und von 18 °C in der Nacht)

Entwurfstag 3: heiterer Julitag (Bestimmung der [Tageshochgradstunden](#) über 26 °C)

Entwurfstag 4: extremer Sommertag im Juli (Ermittlung des [Raumkühlbedarfs](#) zur Einhaltung der Raumgrenztemperatur von 26 °C).

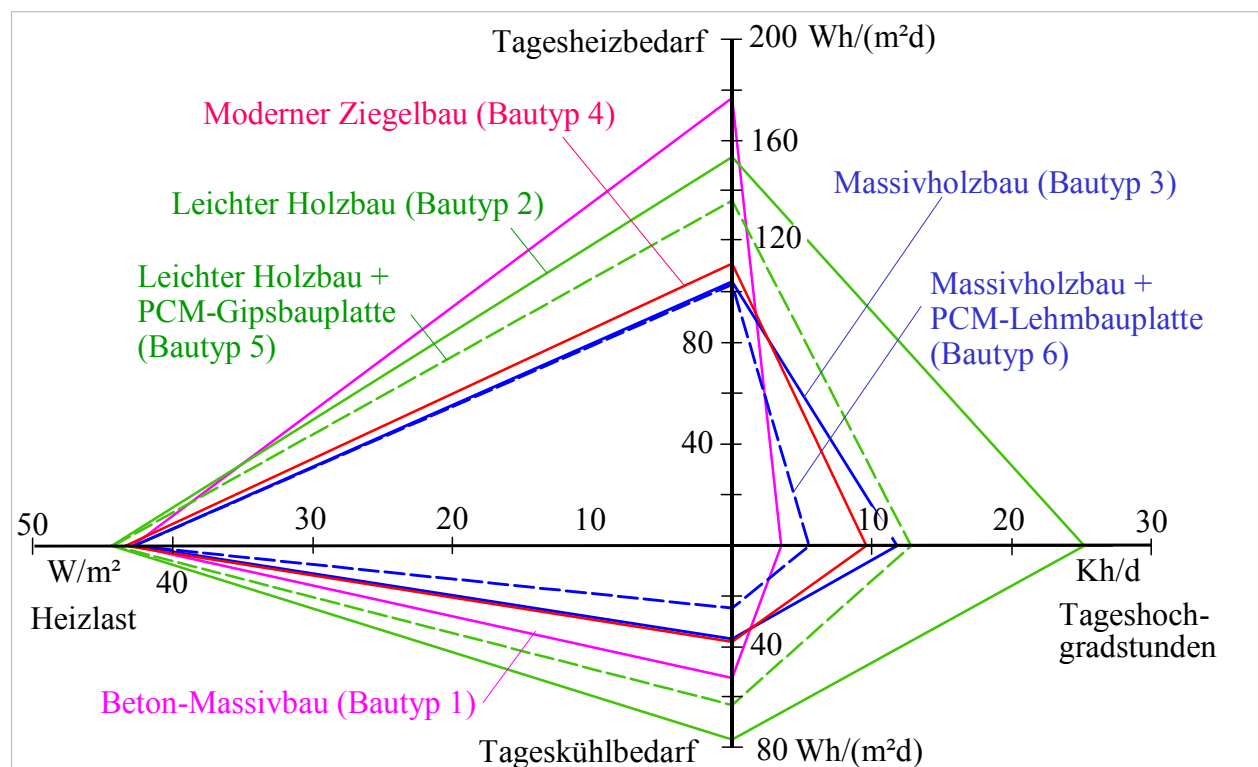
Die Simulation umfasst wiederum 91 Stunden (Start: 0⁰⁰ Uhr), die Zeitintervalle betragen 10 s. Als [Auswertezeitraum](#) werden der [dritte Simulationstag](#) bzw. die [67. bis 91. Stunde](#) herangezogen (19⁰⁰ Uhr des 3. Tages bis 19⁰⁰ Uhr des 4. Tages). Die Heizlast des Entwurfstages 1 gilt am Simulationsende, die Hauptkriterien der Entwurfstage 2 bis 4 werden für die letzten 24 Stunden gebildet. Als Startbedingungen für die Raumumfassungen gelten: $t_{\text{Start}} = 22 \text{ °C}$; $\text{Phase}_{\text{Start}} = 0$ (PCM liegt in der festen Phase vor).

2 Bisherige Ergebnisse

Die [Hauptkriterien](#) für die jeweiligen Entwurfstage sind aus Tabelle 1 und Bild 1 zu entnehmen.

Tabelle 1 Ergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 gemäß der Originaluntersuchung

Bau- typ	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshoch- gradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung	heiterer Februartag	heiterer Julitag	extremer Sommertag
		W/m ²	Wh/(m ² d)	Kh/d	Wh/(m ² d)
1	Beton-Massivbau	42,9	176,7	3,5	52,1
4	Moderner Ziegelbau	43,4	111,3	9,6	37,8
2	Leichter Holzbau	44,4	153,4	25,2	76,4
5	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 25\text{ °C}$	44,3	136,2	12,8	62,8
3	Massivholzbau	42,8	104,2	11,8	36,7
6	Massivholzbau + PCM-Lehmbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 25,5\text{ °C}$	42,8	103,1	5,5	24,6

**Bild 1** Hauptergebnisse für die Bautypen 1 bis 6 gemäß der Originaluntersuchung (Werte entsprechen der Tabelle 1)

Es ist festzustellen, dass die markantesten Änderungen durch **Einsatz von Latentspeichermaterial** bei der Holzbauweise und beim Massivholzbau am Entwurfstag 3 (heiterer Sommertag, freie unbeeinflusste Temperaturschwingung) bezüglich der **Tageshochgradstunden** auftreten. Diese reduzieren sich auf etwa **50 %**.

Die energetischen Verbesserungen beim **Tagesheizbedarf** (Entwurfstag 2, heiterer Februartag) betragen dagegen nur **1 ... 11 %** und beim **Tageskühlbedarf** (Entwurfstag 4, Extremsommertag) liegen sie bei **18 .. 33 %**.

Die sich einstellenden Temperaturschwingungen am Entwurfstag 3 zeigt Bild 2.

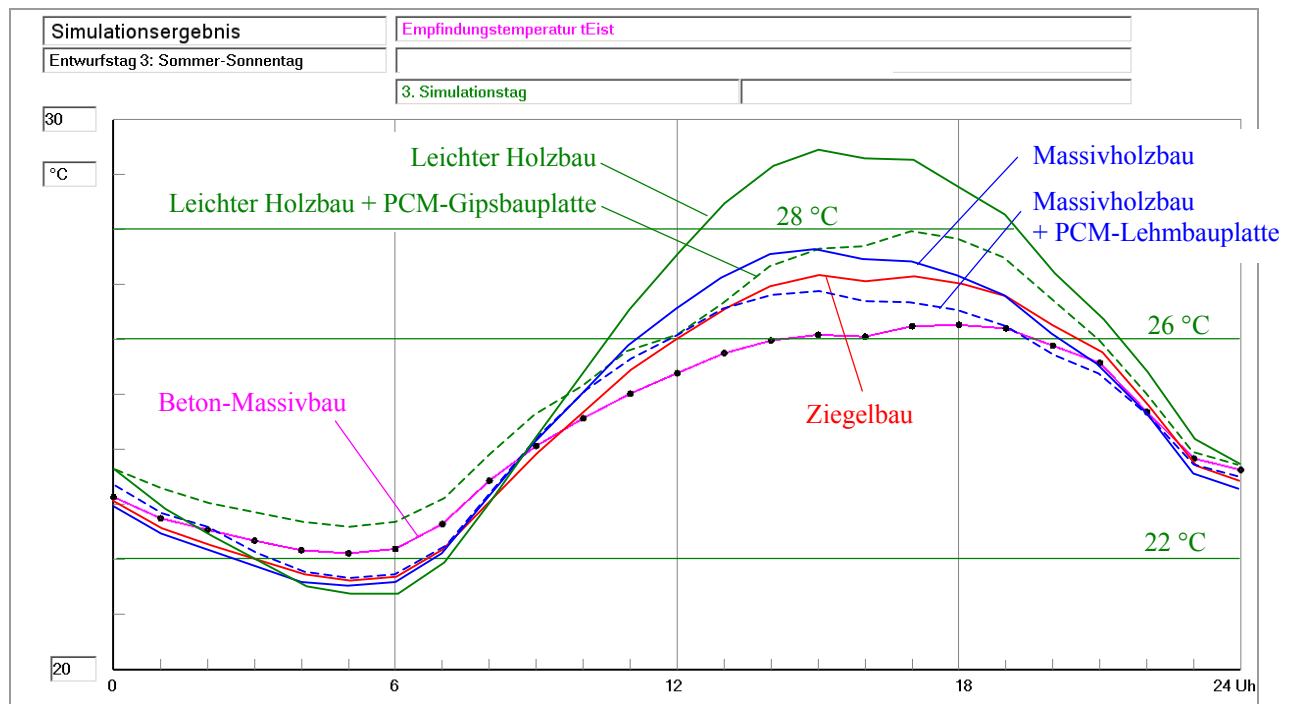


Bild 2 Raumtemperaturverläufe jeweils am 3. Simulationstag für alle untersuchten Bauweisen (Bautypen 1 bis 6) am heiteren Julitag

3 Modellierung des Phasenwandelbereiches

Die im neuen Simulationsmodell möglichen Nachbildungen des Phasenwandels gibt Bild 3 als Enthalpie-Temperatur-Schaubilder wieder.

Der allgemeine Fall eines Phasenwandelbereiches zwischen den Phasenwandeltemperaturen t_{Wandelu} und t_{Wandelo} (Bild 3, links) wird nach [3] näherungsweise auch für temperaturversetzte Schmelz- und Erstarrungsverläufe (Hysterese) verwendet. Er beinhaltet zudem ebenso den Sonderfall des Phasenwechsels bei einer festen Temperatur $t_{\text{Wandel}} \equiv t_{\text{Wandelu}} \equiv t_{\text{Wandelo}}$ (Bild 3, rechts).

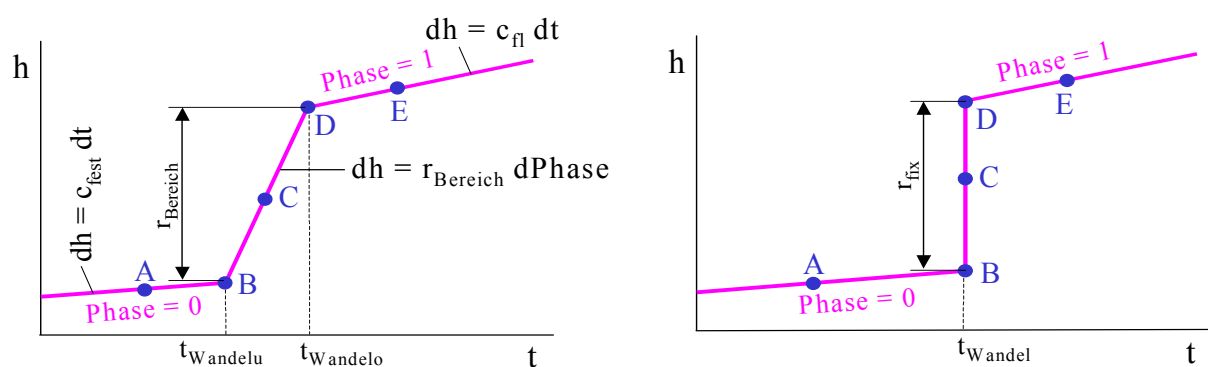


Bild 3

Links: Allgemeiner Fall für einen Phasenwandelbereich mit den Grenztemperaturen $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$ (Er gilt auch als Näherung für den Phasenwandel mit einer Hysterese.)

Rechts: Idealfall des Phasenwandels bei konstanter Temperatur $t_{\text{Wandel}} = t_{\text{Wandelu}} = t_{\text{Wandelo}}$

Der Algorithmus für den allgemeinen Fall nach [3] ist universell gestaltet, sodass alle Punkte A bis E Ausgangspunkte und gleichzeitig auch Endpunkte der Zustandsänderung sein können. Des Weiteren beinhaltet der allgemeine Fall den Idealfall als Sonderlösung.

Wenn im Weiteren die bisherigen Varianten, die nach dem Idealfall einer festen Phasenwandeltemperatur mit t_{Wandel} und r_{fix} simuliert wurden, nun für einen Phasenwandelbereich mit $t_{\text{Wandelu}} \dots$

t_{Wandelo} nachzubilden sind, bedarf es einer Umrechnung der Schmelzenthalpie (Schmelzwärme) von r_{fix} in r_{Bereich} . Da im Phasenwandelsbereich keine zusätzliche sensible Wärmespeicherung überlagert wird, muss gelten (siehe Enthalpie-Temperatur-Schaubild):

$$r_{\text{Bereich}} = r_{\text{fix}} + c_{\text{fest}} (t_{\text{Wandel}} - t_{\text{Wandelu}}) + c_{\text{fl}} (t_{\text{Wandelo}} - t_{\text{Wandel}}). \quad (1)$$

4 Neue Ergebnisse

Die weiteren Untersuchungen sind der leichten **Holzbauweise** und dem **Massivholzbau** mit Integration von PCM-Gips- bzw. Lehmbauplatten gewidmet.

Die Grenztemperaturen des Phasenwandels t_{Wandelu} und t_{Wandelo} werden symmetrisch zur bisherigen festen Phasenwandeltemperatur t_{Wandel} gelegt.

4.1 Leichte Holzbauweise mit 15 mm PCM-Gipsbauplatte

Die Gipsbauplatte mit Latentspeichermaterial ist auf allen raumseitigen Wandflächen angebracht (siehe Bautyp 5 nach [2], Bild 14).

Basisvariante: $t_{\text{Wandel}} = 25 \text{ °C}$; $r_{\text{fix}} = 28700 \text{ J/kg}$; $c_{\text{fest}} = c_{\text{fl}} = 1200 \text{ J/(kg K)}$

Variante A: $t_{\text{Wandelu}} = 24 \text{ °C}$; $t_{\text{Wandelo}} = 26 \text{ °C}$; $r_{\text{Bereich}} = 31100 \text{ J/kg}$

Variante B: $t_{\text{Wandelu}} = 23 \text{ °C}$; $t_{\text{Wandelo}} = 27 \text{ °C}$; $r_{\text{Bereich}} = 33500 \text{ J/kg}$.

Die Zusammenstellung der durch umfangreiche Simulationen ermittelten Hauptergebnisse finden sich in den Tabellen 2 sowie im Bild 4. Die Temperaturverläufe, die sich am heiteren Sommertag (Entwurfstag 3) einstellen, zeigt Bild 5 für den 3. Simulationstag. Die erforderlichen Kühlleistungsverläufe für den Extremsommertag – ebenfalls am 3. Simulationstag aufgenommen – finden sich im Bild 6.

Tabelle 2 Ergebnisse für den Bautyp 5 (leichter Holzbau mit PCM-Gipsbauplatte): Basisvariante sowie Varianten A und B

Zum Vergleich ist auch die Originalvariante der leichten Holzbauweise (Bautyp 2) vermerkt.

Bautyp	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung W/m ²	heiterer Februartag Wh/(m ² d)	heiterer Julitag Kh/d	extremer Sommertag Wh/(m ² d)
5 Basis	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 25 \text{ °C}$	44,3	136,2	12,8	62,8
5 A	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandelbereich}} = 24 \dots 26 \text{ °C}$	44,3	134,1	12,3	55,3
5 B	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandelbereich}} = 23 \dots 27 \text{ °C}$	44,3	132,2	12,9	59,4
Vergleichsvariante ohne PCM-Bauplatte:					
2	Leichter Holzbau	44,4	153,4	25,2	76,4

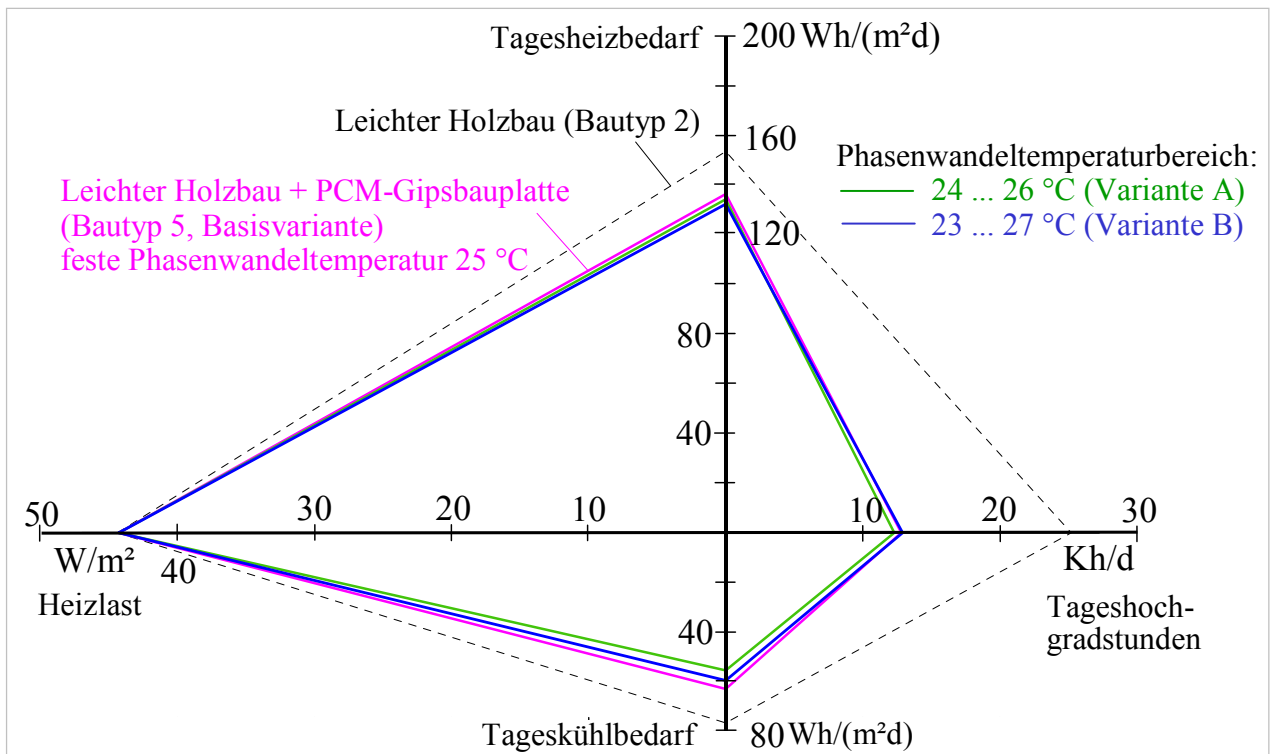


Bild 4 Hauptergebnisse für den Bautyp 5 (leichter Holzbau mit PCM-Gipsbauplatte): Basisvariante mit fester Phasenwandeltemperatur sowie Varianten A und B mit Phasenwandelbereich
Zum Vergleich ist auch die Originalvariante der leichten Holzbauweise (Bautyp 2) vermerkt.

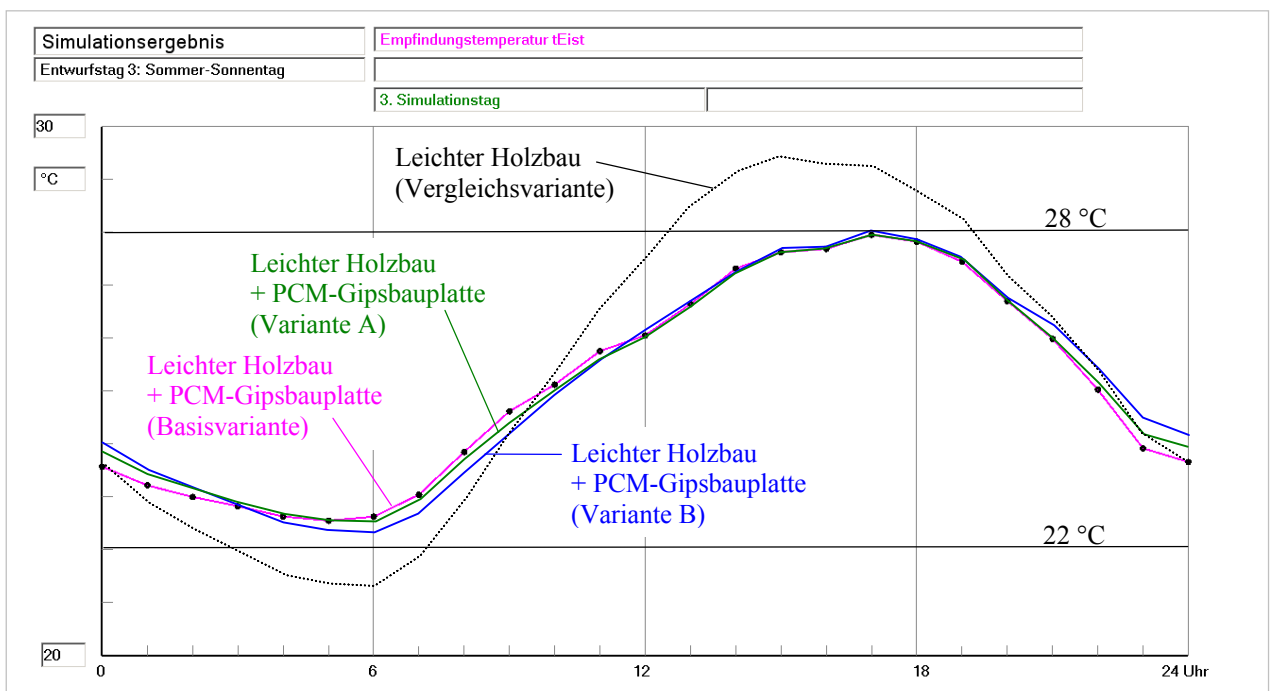
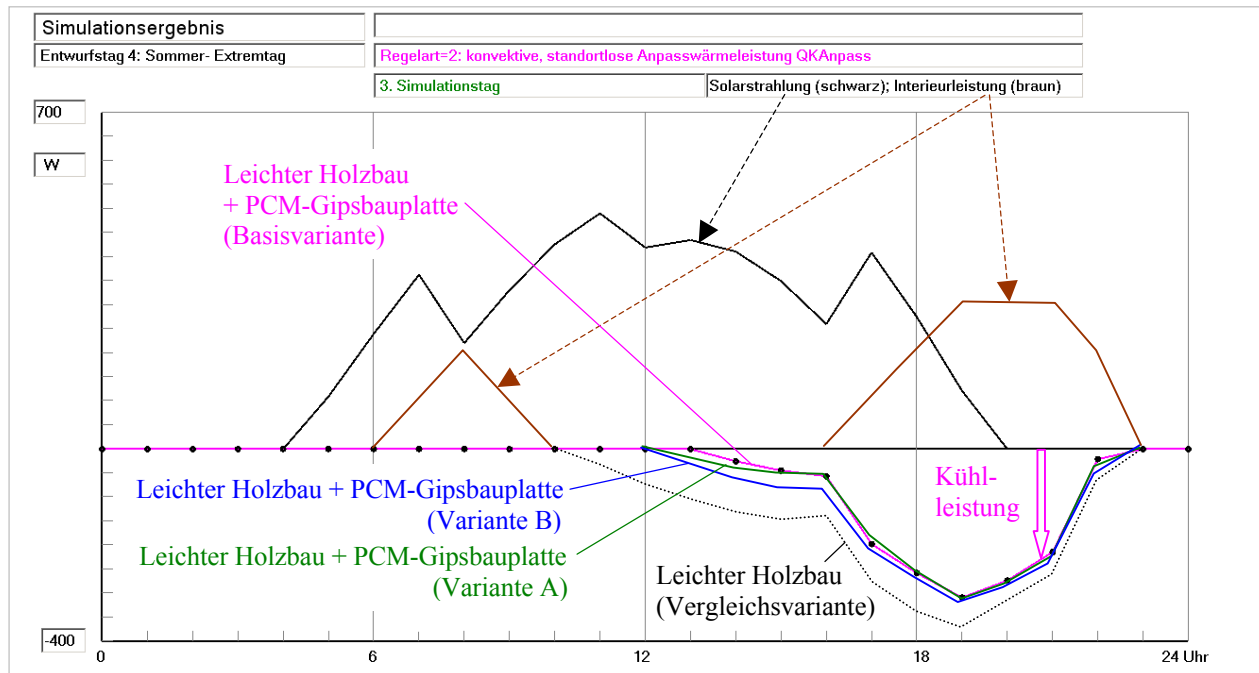


Bild 5 Raumtemperaturverläufe für den heiteren Sommertag (Entwurfstag 3) jeweils am 3. Simulationstag für den Bautyp 5 (leichter Holzbau mit PCM-Gipsbauplatte): Basisvariante mit fester Phasenwandeltemperatur sowie Varianten A und B mit Phasenwandelbereich
Zum Vergleich ist auch die Originalvariante der leichten Holzbauweise (Bautyp 2) vermerkt.



Weitere interessante Detailergebnisse, auf die in der nachfolgenden Auswertung eingegangen wird, seien vorab zusammengestellt. Es handelt sich um die Änderung des Tageskühlbedarfs am Extremsommertag zu unterschiedlichen Simulationstagen (Tabelle 3) und um die zeitabhängigen Temperaturverläufe in der Gipsbauplatte (Bild 7).

Tabelle 3 Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse für den Tageskühlbedarf an einem Extremsommertag für die Basisvariante und die Variante B bei unterschiedlichen Erfassungszeiträumen (3. Simulationstag bzw. 67. bis 91. Simulationsstunde $\approx$ 4. Simulationstag)

Bautyp	Bauweise	Tageskühlbedarf 3. Simulationstag	Tageskühlbedarf 4. Simulationstag
		Wh/(m ² d)	Wh/(m ² d)
5 Basisvariante	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	47,0	62,8
5 Variante B	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandelsbereich}} = 23 \dots 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$	55,0	59,4

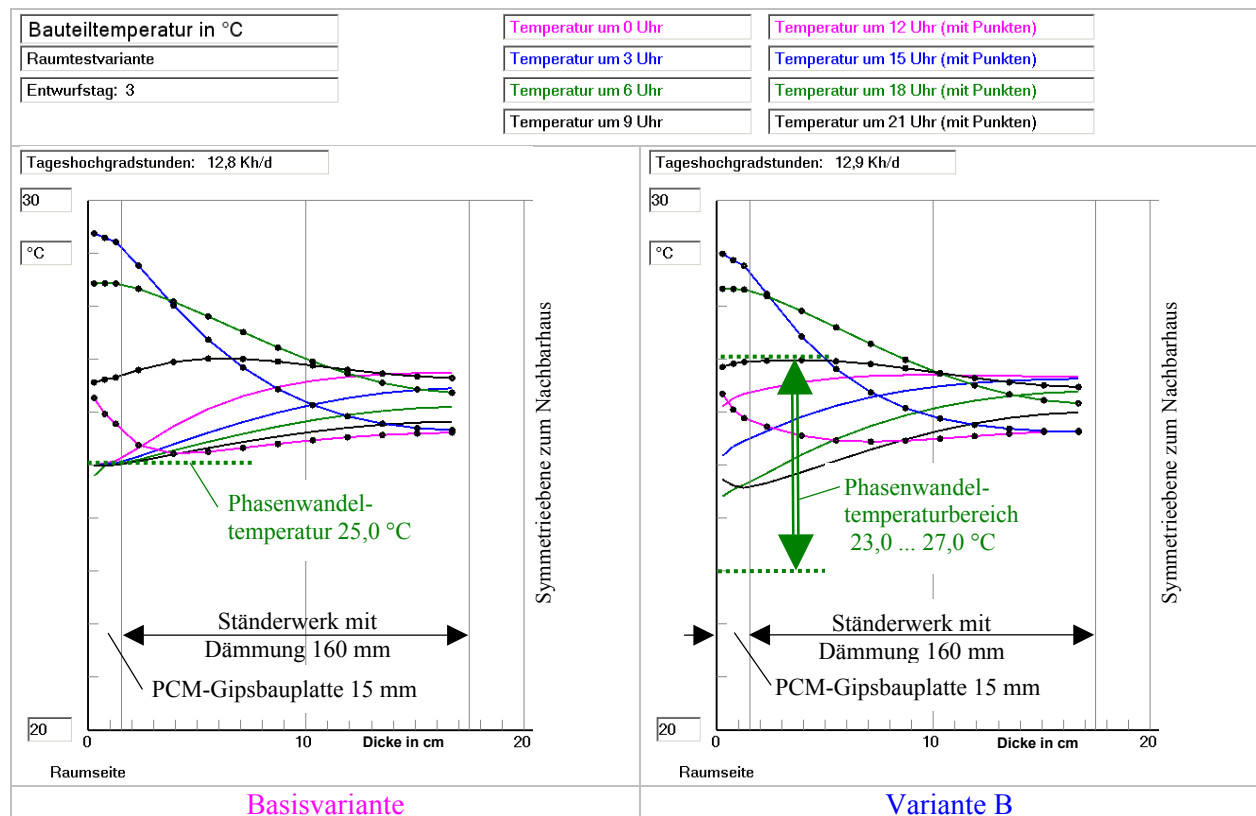


Bild 7 Gegenüberstellung der Temperaturverläufe in der Haustrennwand des Bautyps 5 (leichte Holzbauweise mit PCM-Gipsbauplatte) zwischen der 67. und 91. Simulationsstunde am heiteren Julitag (Entwurfstag 3)

Der detaillierte Wandaufbau ist [2], Bild 14 zu entnehmen.

Auswertung der Simulationsergebnisse für die leichte Holzbauweise

- Die markanteste Feststellung ist, dass bei Vorhandensein eines Phasenwandelbereiches mit den Grenztemperaturen t_{Wandelu} und t_{Wandelo} die den Entwurfstagen zugeordneten Hauptergebnisse näherungsweise denen für eine arithmetisch gemittelte, feste Phasenwandeltemperatur t_{Wandel} entsprechen.
- Die Detailanalyse zeigt, dass die Abweichungen der Energiebedarfswerte etwas größer sind als die der Tageshochgradstunden.
- Die geringe Differenz bezüglich der Tageshochgradstunden erklärt sich durch die sehr kleinen Unterschiede zwischen den Temperaturverläufen (Bild 5), die für ein frei schwingendes System – ohne Anlageneinfluss – am heiteren Sommertag ermittelt wurden.
- Die variantenabhängigen Abweichungen des Tageskühlbedarfs bedürfen der weiteren Diskussion. Während nach Tabelle 2 die Basisvariante einen größeren Tageskühlbedarf als Variante B aufweist, folgt aus Bild 6 das umgekehrte Verhältnis. Die Ursache liegt im unterschiedlichen Erfassungszeitraum begründet. Während in Tabelle 2 die letzten 24 Simulationsstunden (67. bis 91. Betriebsstunde) betrachtet werden, gibt Bild 6 den 3. Simulationstag (48. bis 72. Betriebsstunde) wieder. Die genaue zahlenmäßige Gegenüberstellung des Tageskühlbedarfs ist in Tabelle 3 erfolgt. D. h., der Übergang von einer festen Phasenwandeltemperatur zu einem Phasenwandelbereich verändert die charakteristischen Größen nicht in einem stets konstanten Verhältnis sondern auch in Abhängigkeit der Zeit. Damit ist es außerordentlich

schwierig z. B. energetische Einsparungen variantenabhängig zu bewerten, da sowohl meteorologische und nutzerbedingte Einflüsse im Langzeitverlauf von sehr großer Bedeutung sein können.

- Die Temperaturverläufe in der Gipsbauplatte bei fester Phasenwandeltemperatur und bei Vorhandensein eines Phasenwandelbereiches – wie beispielsweise im Bild 7 dargestellt – zeigen bemerkenswerte Unterschiede. Im ersten Fall (Basisvariante) unterschreitet die raumseitige Wandtemperatur nur sehr kurzzeitig die Phasenwandeltemperatur von 25 °C. Bei Variante B mit dem sehr großen Phasenwandelbereich von 4 K wird die Latentspeicherung über einen längeren Zeitraum wirksam. Dies ist grundsätzlich günstiger. Aber auch bei dieser Variante ist erkennbar, dass es vorteilhafter wäre, den Phasenwandel in einen höheren Temperaturbereich zu verlagern. Die damit verbundene Wirkung ist bereits in [2] untersucht worden (Tabelle 4 und Bild 8).
- Die Hauptkriterien, die für die vier Entwurfstage bestimmt werden, bilden nach wie vor die Hauptaussage für die Bewertung der Bauweise und Nutzungsart, da sie die Integration aller Einflüsse auf den Raumzustand beinhalten. Die Detailuntersuchungen – beispielsweise der Temperaturschwingung in der Wand – dienen lediglich zum besseren Verständnis der Ergebnisse und zur Ursachenerforschung.
- Haupteinfluss auf das Ergebnis nimmt die feste bzw. mittlere Phasenwandeltemperatur und erst in zweiter Linie die Größe des Phasenwandelbereiches.

Tabelle 4 Hauptergebnisse für den Bautyp 5 (leichter Holzbau mit PCM-Gipsbauplatte) unter Variation der Phasenwandeltemperatur bei konstanter Phasenwandelenthalpie im Vergleich zum Bautyp 2 (leichter Holzbau)

Bau- typ	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshoch- gradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung	heiterer Februartag	heiterer Julitag	extremer Sommertag
		W/m ²	Wh/(m ² d)	Kh/d	Wh/(m ² d)
5 Basis	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 25\text{ °C}$	44,3	136,2	12,8	62,8
5a	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 24\text{ °C}$	44,3	129,3	19,1	74,0
5b	Leichter Holzbau + PCM-Gipsbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 26\text{ °C}$	44,3	142,3	10,1	58,6
Vergleichsvariante ohne PCM-Bauplatte:					
2	Leichter Holzbau	44,4	153,4	25,2	76,4

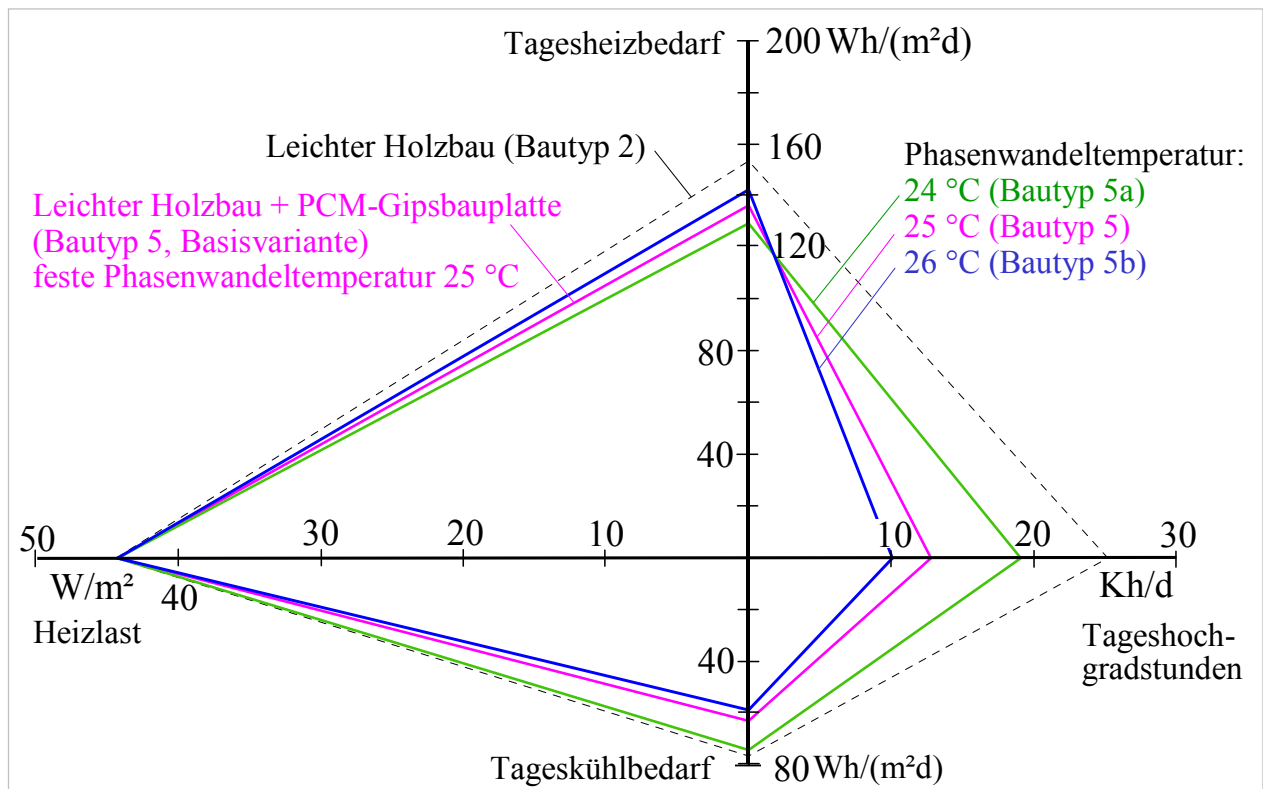


Bild 8 Ergebnisse für die leichte Holzbauweise ohne und mit Latentspeichermaterial in den Wandverkleidungen und bei Variation der stets festen Phasenwandeltemperatur (Werte entsprechen der Tabelle 4)

4.2 Massivholzbauweise mit 30 mm PCM-Lehmbauplatte

Die Lehmbauplatte mit Latentspeichermaterial ist auf den raumseitigen Außen- und Haustrennwandflächen angeordnet (siehe Bautyp 6 nach [2], Bild 15).

Basisvariante: $t_{\text{Wandel}} = 25,5 \text{ °C}$; $r_{\text{fix}} = 27500 \text{ J/kg}$; $c_{\text{fest}} = c_{\text{fl}} = 1200 \text{ J/(kg K)}$

Variante C: $t_{\text{Wandelu}} = 24 \text{ °C}$; $t_{\text{Wandelo}} = 27 \text{ °C}$; $r_{\text{Bereich}} = 31100 \text{ J/kg}$.

Die ergänzenden Untersuchungen sind in Tabelle 5 sowie in den Bildern 9 und 10 zusammengefasst.

Tabelle 5 Ergebnisse für den Bautyp 6 (Massivholzbau mit PCM-Lehmbauplatte): Basisvariante sowie Variante C

Zum Vergleich ist auch die Originalvariante der Massivholzbauweise (Bautyp 3) vermerkt.

Bautyp	Bauweise	Heizlast	Tagesheizbedarf	Tageshochgradstunden	Tageskühlbedarf
		Auslegung W/m²	heiterer Februartag Wh/(m²d)	heiterer Julitag Kh/d	extremer Sommertag Wh/(m²d)
6 Basis	Massivholzbau + PCM-Lehmbauplatte $t_{\text{Wandel}} = 25,5 \text{ °C}$	42,8	103,1	5,5	24,6
6 C	Massivholzbau + PCM-Lehmbauplatte $t_{\text{Wandelbereich}} = 24 \dots 27 \text{ °C}$	42,8	99,8	5,5	17,8
Vergleichsvariante ohne PCM-Bauplatte:					
3	Massivholzbau	42,8	104,2	11,8	36,7

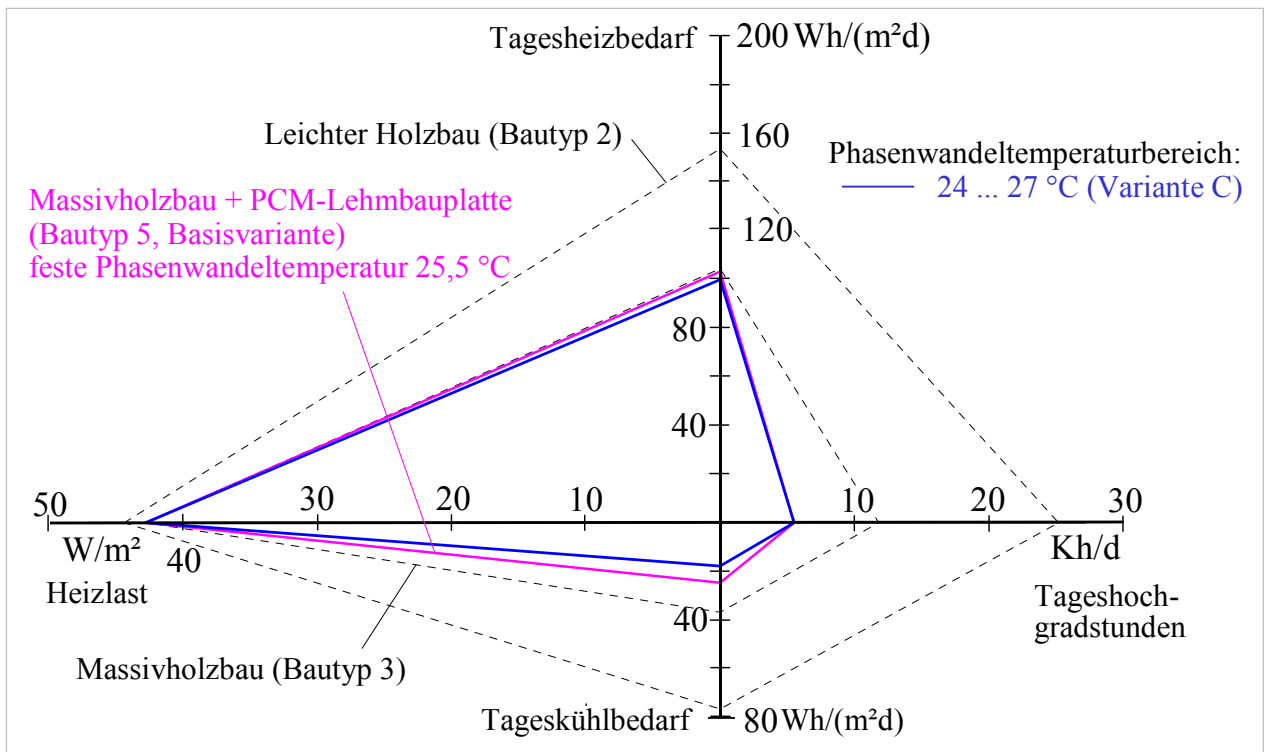


Bild 9 Hauptergebnisse für den Bautyp 6 (Massivholzbau mit PCM-Lehm-Platte): Basisvariante mit fester Phase wandeltemperatur sowie Variante C mit Phase wandelbereich
Zum Vergleich sind auch die Originalvarianten ohne PCM – Massivholzbauweise (Bautyp 3) und leichte Holzbauweise (Bautyp 2) – vermerkt.

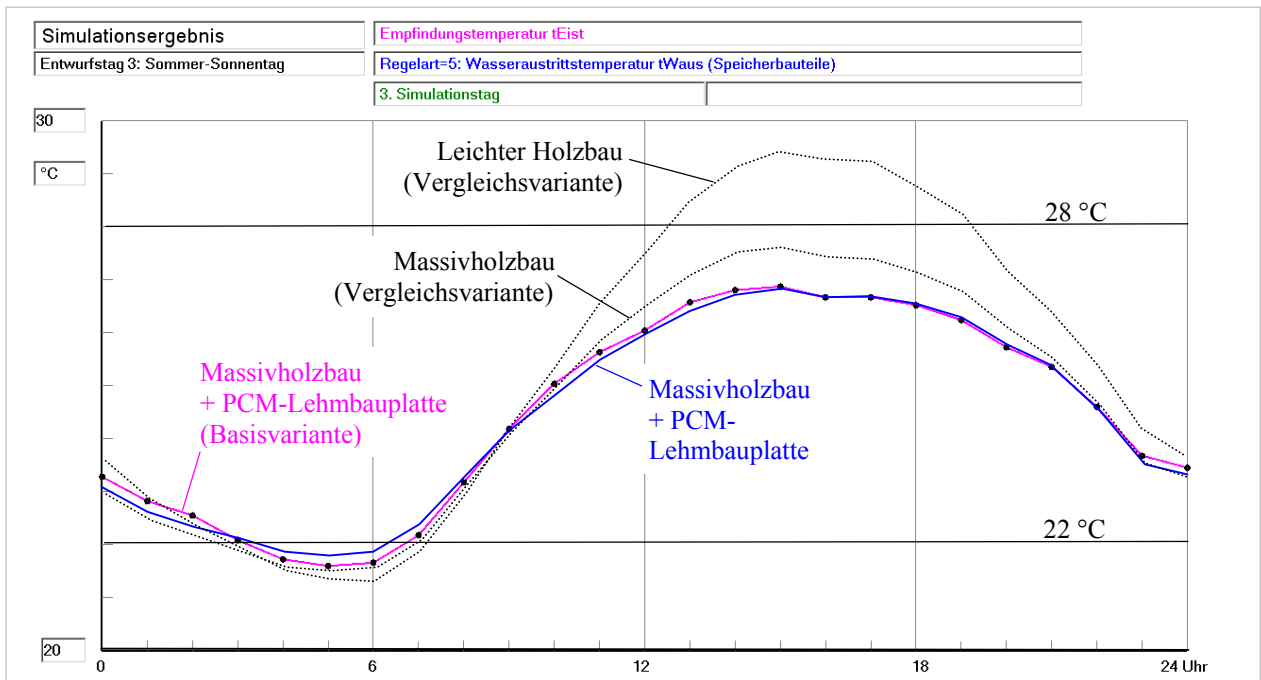


Bild 10 Raumtemperaturverläufe für den heiteren Sommertag (Entwurfstag 3) jeweils am 3. Simulationstag für den Bautyp 6 (Massivholzbau mit PCM-Lehm-Platte): Basisvariante mit fester Phase wandeltemperatur sowie Variante C mit Phase wandelbereich
Zum Vergleich sind auch die Originalvarianten ohne PCM – Massivholzbauweise (Bautyp 3) und leichte Holzbauweise (Bautyp 2) – vermerkt.

Auswertung der Simulationsergebnisse für die Massivholzbauweise

- Die für die leichte Holzbauweise getroffenen Feststellungen gelten für die Massivholzbauten in analoger Weise. Somit sind beim Einsatz von Latentspeichermaterialien mit einem Phasenwandelbereich näherungsweise die Simulationsergebnisse für eine mittlere, feste Phasenwandeltemperatur verwendbar.
- Die im Bild 10 dargestellten, freien Temperaturschwingungen für den Entwurfstag 3 zeigen fast deckungsgleiche Verläufe.
- Die Unterschiede bei den Energiebedarfswerten sind zu relativieren, da sich diese abhängig von den Simulationszeiträumen ergeben.

5 Fazit

Durch die Erweiterung des Dynamischen Raummodells können jetzt auch Latentwärmespeichermaterialien in Raumumfassungen simuliert werden, bei denen sich der Phasenwechsel über einen Temperaturbereich erstreckt. Die allgemeingültige Modellierung kann näherungsweise auch für den Phasenwechsel mit temperaturversetzten Schmelz- bzw. Erstarrungsvorgängen (Hysterese) Verwendung finden. Als Sonderfall ist der Phasenwechsel bei einer festen Temperatur exakt nachbildbar.

Der früher durchgeführte "Wärmetechnische Vergleich ausgewählter Bautechniken und Betriebsweisen von Wohnbauten" [2], dem bei Einsatz von Latentspeichermaterialien (PCM) die Annahme einer festen Phasenwandeltemperatur (Schmelz- bzw. Erstarrungstemperatur) zugrunde lag, wurde für Phasenwandelbereiche wiederholt.

Als Hauptaussage gilt, dass die feste bzw. die mittlere Phasenwandeltemperatur entscheidend für den sich einstellenden Raumtemperaturverlauf unter sommerlichen Bedingungen ist.

Die energetischen Aufwendungen, die beispielsweise für das ergänzende Heizen an heiteren Wintertagen zum Erreichen einer Mindestraumtemperatur oder bei einer Spitzenlastkühlung an Extremsommertagen zur Gewährleistung einer Höchstraumtemperatur erforderlich sind, zeigen mitunter etwas größere Unterschiede in Abhängigkeit der geltenden Phasenwechselcharakteristik. Diese Differenzen gelten aber nicht über alle Untersuchungszeiträume konstant, sondern stellen sich aufgrund der Phasenwandelcharakteristik zeitabhängig dar. Deshalb könnten detaillierte praktische Resultate nur bei genauer Kenntnis des Langzeitbelastungsregimes (äußere und innere Wärmelasten) gewonnen werden. Aber diese Vertiefung erscheint bei den üblichen, stark individuell geprägten Wohnraumnutzungen nicht sinnvoll. Somit können für die Untersuchung der energetischen Effekte in erster Näherung auch feste Phasenwandeltemperaturen in Ansatz gebracht werden.

Das ergänzte Simulationswerkzeug "Dynamisches Raummodell" wird von der ROM-Umwelt-Stiftung mit ausführlicher Beschreibung und Programm kostenlos im Internet zur Verfügung gestellt [3].

Literaturzusammenstellung

- [1] GLÜCK, B.: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2004/05
Kostenlos erhältlich unter:
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14)
oder
<http://www.berndglueck.de/Raummodell>
Kurzbericht: Umfang 6 Seiten
Teil A:
Grundlagen (Februar 2005): Umfang 102 Seiten
Teil B:
Stationäre Simulation (Februar 2005): Umfang 140 Seiten
Teil C:
Instationäre Simulation (Februar 2005): Umfang 170 Seiten
Teil D:
1. Ergänzung: Instationäre Simulation (Mai 2005): Umfang 181 Seiten
und Dynamisches Raummodell, Heizung-Lüftung-Haustechnik 56 (2005), Teil 1 Nr. 5, S. 26-31; Teil 2 Nr. 6, S. 34-39
- [2] GLÜCK, B.: Wärmetechnischer Vergleich ausgewählter Bautechniken und Betriebsweisen von Wohnbauten. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2005.
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Wohnbauten)
oder
<http://www.berndglueck.de/Bautechniken>
Hauptbericht: Umfang 335 Seiten
Kurzbericht: Umfang 42 Seiten
und Thermisch-energetischer Gebrauchswert von Wohnbauten, Heizung-Lüftung-Haustechnik 56 (2005), Nr. 12, S. 38-41 (Teil 1); Bd. 57 (2006) Nr. 1, S. 63-70 (Teil 2), Nr. 2, S. 84-90 (Teil 3)
- [3] GLÜCK, B.: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. Ergänzungsbericht Teil E der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2006
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Raummodell)
oder
<http://www.berndglueck.de/Raummodell>
Teil E (2. Ergänzung der instationären Simulation; PCM mit Phasenwandelsbereich):
Umfang 106 Seiten