

Mai 2019

*Forschungsprojekt
im Auftrag der
Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie*

Energiespeicher Beton

2. überarbeitete und erweiterte Auflage

Ao. Univ. Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Klaus Kreč
Büro für Bauphysik
A-3562 Schönberg am Kamp, Veltlinerstraße 9
Österreich
Tel. +43-2733-8780 Mobil +43-664-73489560
email: dr.krec@aon.at

Inhaltsverzeichnis

I. Vorwort des Autors	2
II. Einleitung	3
III. Theoretische Grundlagen	5
III.1 Grundbegriffe	5
III.2 Wärmetransportmechanismen	6
III.2.1 Konvektion.....	7
III.2.2 Wärmeleitung.....	9
III.2.3 Wärmestrahlung.....	12
III.3 Der periodisch eingeschwungene Berechnungsansatz	16
IV. Die thermisch aktivierte Betondecke	18
IV.1 Thermisch aktivierte Geschoßdecke	18
IV.1.1 Voruntersuchung zum Einfluss der Bewehrung	19
IV.1.2 Stationäre Parameterstudien	22
IV.1.2.1 Einfluss der Wärmeübergangskoeffizienten.....	22
IV.1.2.2 Einfluss des Rohrabstands	24
IV.1.2.3 Einfluss des Rohrdurchmessers	30
IV.1.2.4 Einfluss der Lage des Rohrregisters	33
IV.1.2.5 Einfluss wärmedämmender Schichten an der Deckenuntersicht.....	36
IV.1.2.6 Obergrenze der Heizmitteltemperatur	39
IV.1.3 Instationäre Parameterstudien	42
IV.1.3.1 Variation der Beladungszeit	44
IV.1.3.1.1 Einfluss der Betonüberdeckung	56
IV.1.3.1.2 Einfluss der Plattendicke	70
IV.1.3.1.3 Oberflächentemperatur – Mittel	88
IV.1.3.1.4 Oberflächentemperatur – Welligkeit.....	94
IV.1.3.1.5 Temperaturverteilung.....	98
IV.1.3.2 Aufheiz- und Abkühlvorgänge	107
IV.1.3.2.1 Heizfall.....	107
IV.1.3.2.2 Kühlfall	113
IV.2 Thermisch aktivierte oberste Decke	118

V.	Der mittels thermischer Aktivierung konditionierte Raum.....	128
V.1	Eckdaten des Modellraums	129
V.1.1	Raumgeometrie.....	129
V.1.2	Bauteil-Listen	130
V.1.2.1	Gebäudehülle entsprechend der OIB-Richtlinie 6.....	131
V.1.2.2	Gebäudehülle in Niedrigenergiehaus-Standard	132
V.1.2.3	Gebäudehülle in Passivhaus-Standard.....	133
V.2	Heiz- und Kühllastberechnungen	133
V.2.1	Außenklimatische Bedingungen – extreme Verhältnisse.....	134
V.2.2	Dynamische Heizlastberechnung	135
V.2.2.1	Ermittlung der erforderlichen Heizfläche.....	140
V.2.3	Dynamische Kühllastberechnung	143
V.2.3.1	Ermittlung der erforderlichen Kühlfläche	149
V.3	Energiebedarfsberechnungen.....	151
V.3.1	Außenklimatische Bedingungen – mittlere Verhältnisse	152
V.3.2	Berechnung des Heizwärmebedarfs.....	154
V.3.3	Berechnung des sensiblen Kühlbedarfs.....	158
V.4	Energiespeicherung mittels thermischer Bauteilaktivierung	162
V.4.1	Annahmen zur Gebäudehülle.....	162
V.4.2	Annahmen zur Raumnutzung.....	163
V.4.3	Abkühlverhalten nach Beendigung der Heizmittelzufuhr	163
V.4.3.1	Annahmen zum winterlichen Außenklima	164
V.4.3.1.1	Außenlufttemperatur.....	164
V.4.3.1.2	Sonneneinstrahlung.....	165
V.4.3.2	Simulationsergebnisse	166
V.4.4	Aufheizverhalten nach Beendigung der Kühlmittelzufuhr	170
V.4.4.1	Annahmen zum sommerlichen Außenklima	170
V.4.4.1.1	Außenlufttemperatur.....	171
V.4.4.1.2	Sonneneinstrahlung.....	171
V.4.4.2	Simulationsergebnisse	172
V.5	Thermische Behaglichkeit.....	175
V.5.1	Strahlungsfeld im Winter	175
V.5.2	Strahlungsfeld im Sommer	180

VI. Zusammenfassung	184
VI.1 Bauteilbezogene Betrachtungen	185
VI.1.1 stationäres Verhalten	186
VI.1.2 instationäres Verhalten	187
VI.2 Raumbezogene Betrachtungen	188
VI.2.1 Auslegung des Rohrregisters	189
VI.2.2 Thermisches Raumverhalten	190
Anhang	192
A.1 Gebäude unterkellert	192
A.1.1 offener Keller	192
A.1.2 Sonderfall: Tiefgarage.....	203
A.1.3 geschlossener Keller	212
A.2 Gebäude nicht unterkellert	219
Literaturverzeichnis	225
Index	227

I. Vorwort des Autors

In diesem Bericht liegen die Ergebnisse einer über fünf Jahre dauernden, intensiven Forschungsarbeit zum Thema der thermischen Aktivierung von Stahlbetondecken zusammengefasst vor. Alle diese Forschungsarbeiten wurden von der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie und der Zement- und Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. beauftragt.

Eine Vielzahl an Forschungsergebnissen wurde bereits in der ersten Auflage dieses Berichts (1) veröffentlicht. Auch eine auf den Bauplaner abgestimmte, komprimierte Zusammenfassung der Forschungsergebnisse liegt mittlerweile in Form eines Planungsleitfadens (2) vor. Dennoch erscheint es angezeigt, die erste Auflage des Berichts (1) zum einen mittels Einbindung von neueren Erkenntnissen zu erweitern. Zum anderen soll eine Umstrukturierung die Lesbarkeit des Berichts weiter verbessern.

Natürlich ist auch die hier vorliegende zweite Auflage von „Energiespeicher Beton“ vom Wesen her ein Forschungsbericht. Dennoch ist es ein besonderes Anliegen des Autors, die physikalischen Zusammenhänge und Erkenntnisse allgemein verständlich darzulegen. Um dieses Ziel verlässlicher zu erreichen, wurde u. a. das Kapitel III. (Theoretische Grundlagen) verfasst und der eigentlichen Thematik – der thermischen Aktivierung von Bauteilen aus Beton – vorangestellt.

Abschließend werden im neuen Kapitel VI. (Zusammenfassung) die wesentlichen Erkenntnisse der Forschungsarbeiten schlagwortartig aufgelistet. Zudem werden – wie bisher – am Ende jedes abgearbeiteten Themenblocks die Ergebnisse in Form einer Conclusio kurz zusammengefasst dargelegt.

Schönberg am Kamp, im Mai 2019

Klaus Kreč

II. Einleitung

Unter dem Schlagwort „Energiespeicher Beton“ wird hier eine großflächige Bauteilaktivierung in Betondecken, Wänden und Fußböden verstanden. Die thermische Aktivierung dieser Bauteile erfolgt mittels Einbetonierens von Rohrregistern während der Errichtungsphase. Durch die Rohre dieser Register wird Flüssigkeit gepumpt, die je nach Erfordernis Wärme den Innenräumen des Gebäudes zuführt (Winter-Fall) oder entzieht (Sommer-Fall).

Einer der Vorteile der Aktivierung von Bauteilen aus Beton springt somit sofort ins Auge: mit ein und demselben System kann sowohl geheizt als auch gekühlt werden. Hierbei bestimmt die Temperatur der in den Rohren zirkulierenden Flüssigkeit die Wirkungsweise des Systems. Die Nutzung des Kühlpotentials der thermischen Bauteilaktivierung ist insofern von besonderer Bedeutung als vor dem Hintergrund des derzeit ablaufenden Klimawandels bereits in naher Zukunft abzusehen ist, dass auch bei Wohnnutzung sommerlicher Komfort ohne die Einbringung von Kühlleistungen nicht immer zu gewährleisten sein wird. Die Bauteilaktivierung stellt sich damit als bedeutender Bestandteil eines zukunftsgerichteten Planens und Bauens dar.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der thermischen Aktivierung von Bauteilen ist darin zu sehen, dass die Wärme abgebenden bzw. aufnehmenden Flächen im Vergleich mit z. B. einer Radiatorheizung sehr groß sind. Als direkte Folge dieser auch gerne als „Flächenheizung“ titulierten Charakteristik erweist es sich als sinnvoll, ja sogar als notwendig, die Heiz- und Kühlmitteltemperatur relativ nahe an die Solltemperatur der Räume einzuregulieren. Zum einen ist damit im Fall der Beheizung eine Niedertemperaturheizung vorzusehen. Zum anderen stellen bereits verhältnismäßig hohe Kühlmitteltemperaturen den erforderlichen Kühleffekt im Sommer bereit. Die beiden genannten Anforderungen sorgen dafür, dass die zur Konditionierung eines Gebäudes notwendige Energie mittels z. B. Wärmepumpe und/oder Solaranlage mit sehr hohen Umwandlungswirkungsgraden erzeugt werden kann. Damit erweist sich die Bauteilaktivierung für die Nutzung erneuerbarer Energien als prädestiniert.

Ebenso wichtig ist die Auswirkung der nur kleinen Temperaturunterschiede zwischen beheizten Flächen und der Raumluft auf den Komfort. Diese kleinen Temperaturdifferenzen bewirken, dass sich konvektive Anteile sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall kaum ausbilden können. Eine Flächenheizung wirkt damit zum Großteil als Strahlungsheizung. Einerseits sorgt diese Eigenschaft für hohen thermischen Komfort im Raum. Andererseits spielt sie für die Untersuchungen dieses Berichts insofern eine große Rolle als die Wirksamkeit von thermisch aktivierten Betondecken im Fokus steht.

Bedenken in Hinblick auf die Beheizung eines Raums über dessen Decke sind nur dann stichhaltig, wenn die Konvektion eine überwiegende Rolle spielt. Bekanntlich steigt ja warme Luft auf und bewegt sich damit gegen die Richtung des erwünschten Wärmestroms. Im Fall einer Flächenheizung werden solche Überlegungen gegenstandslos. Für die Wärmestrahlung als elektromagnetische Strahlung spielt die Schwerkraft keine Rolle; für diese gibt es damit kein „oben“ oder „unten“. Die Ausbildung einer Deckenfläche mittels Bauteilaktivierung als Heizfläche ist somit ohne Effektivitätsverlust möglich. Dass eine Kühldecke hoch effektiv ist und unproblematisch eingesetzt werden kann, zeigen u. a. jahrzehntelange Erfahrungen mit diesen Systemen in Bürogebäuden.

Die skizzierten Vorzüge der thermischen Aktivierung von Betonbauteilen liegen auf der Hand. Dennoch hängt deren Umsetzung in der Baupraxis eng mit der Frage zusammen, ob ein Gebäude über die Bauteilaktivierung alleine – also ohne Zusatzheizung und/oder Kühlung – ganzjährig konditioniert, also auf den gewünschten Solltemperaturen gehalten werden kann. Natürlich erfordert die Beantwortung dieser Frage nicht nur die Kenntnis der Wärmeabgabe- und Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke, sondern auch das Wissen über die

thermischen Qualitäten des Gebäudes. Mit dem heute geforderten Trend zu immer energieeffizienteren Gebäuden werden sowohl die Heiz- als auch die Kühllast derzeit errichteter Gebäude immer kleiner. Dies gibt Anlass zur Annahme, dass die thermische Bauteilaktivierung der Decken ein geeigneter Ansatz für die ganzjährige Konditionierung von heutigen Gebäuden ist. Eine tief gehende Untersuchung der Stichhaltigkeit dieser Annahme ist u. a. Thema dieser Arbeit.

Obzwar die Konditionierung von Gebäuden über die thermische Aktivierung von Betondecken als Planungsansatz schon vielfach erfolgreich umgesetzt wurde, fehlen grundlegende Erkenntnisse über die Funktionsweise der Bauteilaktivierung. Damit kann ein eventuell noch vorhandenes Optimierungspotential nicht ausreichend ausgeschöpft werden. Zudem ist auch die notwendige Anpassung des Systems an die jeweils vorliegenden außerklimatischen Bedingungen nicht in vollem Umfang möglich.

In diesem Forschungsprojekt wird die Funktionsweise thermisch aktivierter Betondecken aus bauphysikalischer Sicht untersucht. Die Arbeit soll zum besseren Verständnis der Bauteilaktivierung beitragen und letztendlich Grundlagen für Planungsempfehlungen liefern.

Der Bericht ist in drei Hauptteile gegliedert. Nach der im nächsten Kapitel folgenden kurzen Einführung in zum Verständnis der Arbeit wesentliche theoretische Grundlagen der bauphysikalischen Wärmelehre folgen in Kapitel IV Berichte über bauteilbezogene rechnerische Untersuchungen von thermisch aktivierten Betondecken. Diese sind den Auswirkungen verschiedenster baulicher Maßnahmen auf das Verhalten von thermisch aktivierten Decken gewidmet. Das Kapitel V ist schließlich auf die Untersuchung der Auswirkungen einer beheizten bzw. gekühlten Decke auf den darunter liegenden Raum fokussiert. Die Fragestellungen reichen hierbei von technisch notwendigen Informationen wie Heizlast und Aufheizverhalten bis hin zu einer Bewertung der thermischen Raumqualität.

III. Theoretische Grundlagen

Bevor die Eigenschaften von thermisch aktivierten Bauteilen aus Beton mittels Berechnungen prognostiziert werden, erscheint es angezeigt, wesentliche Grundlagen der bauphysikalischen Wärmelehre zu rekapitulieren. Dies soll zum einen der Leichterkeit der nachfolgenden Kapitel dienen und zum anderen Missverständnisse, wie sie auch heute noch z. B. zwischen Bauplanern, Haustechnikern und Bauphysikern auftreten, von vornherein verhindern.

Neben der Erläuterung von Grundbegriffen erscheint es notwendig, auf die verschiedenen Arten des Wärmetransports näher einzugehen. Schließlich ist die thermische Bauteilaktivierung ein prägnantes Beispiel für eine sinnvolle Kombination der drei Wärmetransportmechanismen.

Das Eingehen auf die Besonderheiten der Beschreibung von Wärmespeicherungsvorgängen und die in diesem Bericht diesbezüglich gewählte Vorgangsweise rundet dieses Kapitel ab.

III.1 Grundbegriffe

Als grundlegend erscheint es vorerst, die Begriffe "Temperatur" und "Wärme" streng zu unterscheiden.

Die Temperatur ist eine Zustandsgröße und ist für den Menschen zumindest indirekt erfassbar. Natürlich sind die Zuordnungen „kalt“, „warm“ oder „heiß“ dem individuellen Empfinden überlassen und stellen keine brauchbare Skala dar. Um dieser unbefriedigenden Situation zu begegnen, werden Temperaturfühler – einfacher: Thermometer – als Messinstrumente für die Temperatur verwendet. Für Temperaturangaben sind gemäß SI-Einheiten das "Grad Celsius" [°C] zu verwenden. Für Temperaturdifferenzen wird hingegen die Verwendung der Einheit "Kelvin" [K] empfohlen.

"Wärme" ist hingegen eine Energieform und für den Menschen nicht direkt erfassbar. Sie kann durch Umwandlung aus anderen Energieformen, z.B. aus mechanischer Arbeit oder elektrischer Energie, entstehen und – unter gewissen Bedingungen – in andere Energieformen umgewandelt werden. Für die Energie als solche gilt ein Erhaltungssatz, für die Wärme als spezielle Energieform nicht.

Wärmemengen werden in Energieeinheiten gemessen, also etwa in "Joule" [J], "Wattstunden" [Wh] oder "Kilowattstunden" [kWh].

Entsteht Wärme durch Umwandlung aus einer anderen Energieform - etwa aus elektrischer Energie bei einer elektrischen Widerstandsheizung -, so wird von einer Wärmequelle gesprochen. Die Wärmeproduktion einer Wärmequelle wird durch ihre Wärmeleistung charakterisiert. Diese ist die je Zeiteinheit erzeugte Wärmemenge. Als Leistungseinheiten werden "Watt" [W] und "Kilowatt" [kW] verwendet. Wärme kann – wie andere Energieformen auch – transportiert werden. Es wird zwischen den folgenden drei Arten des Wärmetransports unterschieden:

- Konvektion: der Wärmetransport ist mit einem Massentransport gekoppelt.
- Wärmeleitung: die Wärme wird durch Vermittlung eines materiellen Mediums transportiert, ohne dass dabei auch ein Massentransport vorliegt.
- Wärmestrahlung: die Wärme wird ohne Massentransport und ohne Vermittlung eines materiellen Mediums mittels elektromagnetischer Wellen von einem Körper zu einem anderen übertragen.

Die je Zeiteinheit von einem auf einen anderen Körper übertragene Wärmemenge bezeichnet man als Wärmestrom. Wärmeströme werden in Leistungseinheiten gemessen, d. h. in [W] oder [kW]. Wärmeströme setzen von selbst immer dann ein, wenn Temperaturunterschiede auftreten. Dabei

fließt die Wärme stets von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik).

Treten in einem Körper keine zeitlichen Änderungen der Temperatur auf, so liegt ein stationäres Temperaturfeld vor. Ändern hingegen Teile des Körpers ihre Temperatur im Laufe der Zeit, so spricht man von instationären Vorgängen. Das einfachste Beispiel eines instationären Vorganges ist die Temperaturerhöhung eines Körpers infolge Wärmezufuhr. Die zugeführte Wärmemenge ist dabei – sofern keine Phasenumwandlungen eintreten – der Temperaturerhöhung proportional. Den Proportionalitätsfaktor bezeichnet man als Wärmekapazität des Körpers. Die Massenbezogene Wärmekapazität – diese ist eine Materialeigenschaft – wird als spezifische Wärmekapazität oder oft auch kurz als spezifische Wärme bezeichnet; sie wird in $[\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$, $[\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$ oder in $[\text{Wh kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$ angegeben.

III.2 Wärmetransportmechanismen

Im Folgenden wird kurz näher auf die drei verschiedenen Wärmetransportmechanismen eingegangen. Die Reihenfolge der Aufzählung der Wärmetransportmechanismen orientiert sich hierbei an ihrem Auftreten im Zuge einer Bauteilaktivierung. Im Fall der Wärmezufuhr (Heizbetrieb) ergibt sich folgendes Bild:

1. Die Wärmezufuhr vom Wärmeerzeuger (z. B. einer Wärmepumpe oder Solarpaneelen) in die Rohre der Rohrregister erfolgt mittels Konvektion. Durch Pumpen des Heizmittels durch die Rohre wird nicht nur das Heizmittel, sondern auch die in diesem Heizmittel enthaltene Wärme transportiert.
2. Die Rohrregister geben ihre Wärme mittels Wärmeleitung an den umgebenden Beton ab. Der Beton wird dadurch erwärmt.
3. Die an den Raum grenzenden Betonoberflächen geben aufgrund ihrer Temperatur Wärme – überwiegend in Form von Wärmestrahlung – an andere Bauteiloberflächen ab. Da die thermisch aktivierten Flächen etwas höhere Temperatur als die anderen raumbegrenzenden Flächen aufweisen, führt dies zu einem Wärmeeintrag in den Raum.

Im Fall der Kühlung sind ebenfalls die drei Wärmetransportmechanismen für den Abtransport überschüssiger Wärme aus dem Raum verantwortlich. Wesentlich für das Verständnis dieses Prozesses ist die Einsicht, dass es auch hier ausschließlich um Wärmetransport geht. Das immer wieder anzutreffende Bild eines Transports von Kälte ist nicht nur physikalisch unsinnig, sondern kann durchaus auch zu Fehleinschätzungen führen. Kälte kann bestenfalls als Zustandsbeschreibung dienen, ist aber sicherlich keine Energieform. Im Fall der Kühlung eines Raums ergeben sich folgende Wärmetransportvorgänge:

1. Die im Raum oder an dessen Begrenzung befindlichen Oberflächen sind höher temperiert als die thermisch aktivierte Fläche. Es erfolgt ein Wärmetransport mittels Wärmestrahlung von diesen Oberflächen zur (kühleren) thermisch aktivierten Fläche. Die aktivierte Oberfläche wird dadurch erwärmt.
2. Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Betonoberfläche und den Bereichen des Rohrregisters fließt Wärme mittels Wärmeleitung von den Oberflächen zu den Rohrregistern.
3. Das Kühlmittel in den Rohrregistern wird erwärmt. Die Wärme wird durch Abpumpen des Kühlmittels – also mittels Konvektion – den Rohrregistern entzogen.

Im Folgenden wird auf die drei skizzierten Wärmetransportmechanismen näher eingegangen.

III.2.1 Konvektion

Wärmetransporte in strömenden Medien bezeichnet man als konvektive Wärmetransporte. Durch die Strömung werden materielle Teilchen in ständig wechselnde Umgebungen gebracht und dabei abgekühlt oder erwärmt. Treten dabei keine Phasenumwandlungen auf – nur dieser Fall sei hier betrachtet –, so erfolgt die Temperaturänderung infolge Wärmeaufnahme oder -abgabe nach Maßgabe der spezifischen Wärme und Massendichte des Mediums.

Für einen die Strömung mitmachenden Beobachter ergeben sich fortlaufend zeitliche Temperaturänderungen, das heißt, der Wärmetransport zeigt für ihn Merkmale eines instationären Geschehens, auch dann, wenn das Temperaturfeld in einem ortsfesten Koordinatensystem zeitunabhängig ist. Damit hängt es auch zusammen, dass zur Beschreibung konvektiver Wärmetransporte neben der Wärmeleitfähigkeit noch eine weitere Materialeigenschaft benötigt wird, nämlich die spezifische Wärmekapazität c . Die Massendichte kommt dabei auch ins Spiel; sie kann nur dann als Materialeigenschaft betrachtet werden, wenn die Dichteänderungen des strömenden Mediums vernachlässigbar sind.

Bei konvektiven Wärmetransporten spielen stets zwei Vorgänge zusammen, Temperaturänderungen der Teilchen des strömenden Mediums einerseits und der Wärmeaustausch dieser Teilchen mit ihrer Umgebung andererseits. Bei der rechnerischen Behandlung steht manchmal der eine Aspekt, manchmal der andere im Vordergrund.

Im Fall der thermischen Bauteilaktivierung tritt Konvektion augenscheinlich in Form des Transports des Heiz- oder Kühlmittels durch die Leitungen der Rohrregister auf. Werden die Überlegungen auf Heizlast- und Auslegungsfragestellungen erweitert, so kommen konvektive Wärmetransportvorgänge in Form von Lüftungswärmeverlusten oder -gewinnen ins Spiel. Die beiden genannten konvektiven Wärmetransportvorgänge sind von ihrem Wesen her gleich, unterscheiden sich jedoch durch die Art des Wärmeträgers. Wasser hat sowohl eine höhere Wärmekapazität als auch eine weit höhere Massendichte als Luft und ist dadurch als Wärmeträger sehr viel effektiver.

Die Erfassung konvektiver Wärmetransporte wird dann besonders einfach, wenn die zu- und abgeführten Massen und deren Temperaturen bekannt sind. Das ist beispielsweise bei der Lüftung der Fall, wenn der Luftdurchsatz sowie die Zuluft- und Ablufttemperatur bekannt sind. In diesem Fall kann der Mechanismus, durch den der Temperatenausgleich zwischen der Raumluft und der zugeführten Außenluft bewirkt wird, völlig außer Betracht bleiben - es wird lediglich völlige Durchmischung der Luft angenommen. Für die Berechnung der transportierten Wärmeleistung – der Lüftungswärmeverluste – ist einzig der Aspekt der Aufwärmung oder Abkühlung maßgeblich. Der Wärmestrom Φ ist zur Temperaturdifferenz $\Theta_a - \Theta_z$ von Ab- und Zuluft sowie zum Massendurchsatz \dot{m} proportional:

$$\Phi = c_{p,L} \cdot \dot{m} \cdot (\Theta_a - \Theta_z) \quad . \quad <3.1>$$

Der Proportionalitätsfaktor $c_{p,L}$ ist die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck; er hängt in geringem Ausmaß von der Zusammensetzung der Luft, insbesondere ihrem Wasserdampfgehalt ab. Für bauphysikalische Berechnungen kann

$$c_{p,L} = 0,28 \quad [\text{Whkg}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad <3.2>$$

angesetzt werden.

Das Produkt $c_{p,L} \cdot \dot{m}$ hat die Dimension eines thermischen Leitwertes $[\text{WK}^{-1}]$ und wird als Lüftungsleitwert bezeichnet:

$$L^V = c_{p,L} \cdot \dot{m} \quad . \quad <3.3>$$

In einer anderen Terminologie – jener der Heizungs- und Lüftungstechnik – bezeichnet man dieses Produkt als Wasserwert.

Eine Kenntnis der Massendichte der Luft ρ_L ist für die Berechnung des Lüftungsleitwertes an sich nicht erforderlich, da der Strömungsvorgang als solcher in die Berechnung nicht eingeht. Annahmen über die Dichte der Luft muss man nur treffen, wenn man anstelle eines Luftmassenstroms \dot{m} einen Luftvolumenstrom \dot{V} vorgibt. Das ist zwar unsachgemäß und ungeschickt, doch in der Praxis allgemein üblich. Wegen

$$\dot{m} = \rho_L \cdot \dot{V} \quad <3.4>$$

ergibt sich für den Lüftungsleitwert aus Gleichung <3.3> nunmehr die Darstellung

$$L^V = c_{p,L} \cdot \rho_L \cdot \dot{V} \quad . \quad <3.5>$$

Die Massendichte ρ_L der Luft hängt vom Luftdruck und von der Temperatur ab. Für bauphysikalische Zwecke ist es im Allgemeinen zulässig, ρ_L mit jenem Wert anzunehmen, der sich bei einer Temperatur von 20°C und einem Druck von 10^5 Pa ergibt: $\rho_L = 1,19 \text{ kgm}^{-3}$. Für das Produkt $c_{p,L} \cdot \rho_L$ folgt daraus

$$c_{p,L} \cdot \rho_L = 0,33 \text{ [Whm}^{-3}\text{K}^{-1}] \quad . \quad <3.6>$$

Für die Durchströmung eines Rohrs des Rohrregisters mit Heizmittel kann man ganz analoge Überlegungen anstellen. Bezeichnet Θ_z die Eintrittstemperatur des Mediums in das Rohr, Θ_a die Austrittstemperatur, so ist der dem Rohr zugutekommende Wärmestrom Φ durch Gleichung <3.1> gegeben; man hat nur anstelle von $c_{p,L}$ die spezifische Wärme $c_{p,w}$ des Wassers einzusetzen. Der Wasserwert

$$W = c_{p,w} \cdot \dot{m} \quad <3.7>$$

kann auch durch den Wasservolumenstrom \dot{V} ausgedrückt werden:

$$W = c_{p,w} \cdot \rho_w \cdot \dot{V} \quad . \quad <3.8>$$

Stellt man keine übertriebenen Genauigkeitsansprüche, so kann man das Produkt $c_{p,w} \cdot \rho_w$ in dem für Warmwasserheizungen in Frage kommenden Temperaturbereich mit dem konstanten Wert

$$c_{p,w} \cdot \rho_w = 1140 \text{ [Whm}^{-3}\text{K}^{-1}] \quad <3.9>$$

annehmen.

Bei einem Heizungsrohr interessieren im Allgemeinen nicht die Wärmegewinne, die das gefüllte Rohr zu verbuchen hat. Man will vielmehr wissen, mit welcher Leistung das Rohr seine Umgebung heizt. Eine Wärmebilanz des durchströmten Rohres führt unter stationären Bedingungen zu der Aussage, dass die über die Rohrwand abgegebene Heizleistung mit der konvektiven Leistungsaufnahme des Rohres übereinstimmen muss. Somit kann man auch die Heizleistung Φ des Heizungsrohres in der Form

$$\Phi = W \cdot (\Theta_z - \Theta_a) \quad <3.10>$$

darstellen. Die Einfachheit dieser Darstellung darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass man damit in der Praxis nur etwas anfangen kann, wenn man neben der Eintrittstemperatur Θ_z auch die Austrittstemperatur Θ_a - und somit auch die Temperaturänderung - des hindurch strömenden Wassers kennt. Das aber ist von vornherein im Allgemeinen nicht der Fall. Auch gibt Gleichung <3.10>

keinen Aufschluss darüber, wie sich die Heizleistung über die Rohroberfläche beziehungsweise die Rohrlänge verteilt und welche Temperaturen an verschiedenen Stellen des Rohres auftreten.

III.2.2 Wärmeleitung

Wärmetransport durch Wärmeleitung kommt in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern vor. Er wird immer durch ein Temperaturgefälle ausgelöst, wobei mit dem Wärmetransport – im Gegensatz zur Konvektion – kein Massentransport verbunden ist. Das Temperaturgefälle ist ein Vektor in jeweils jener Richtung, in der sich die Temperatur am stärksten ändert; sein Betrag gibt die örtliche Änderung der Temperatur je Längeneinheit, in SI-Einheiten somit in $[\text{K}\cdot\text{m}^{-1}]$ an.

Nach *Fourier* ist die durch ein Temperaturgefälle bewirkte Wärmestromdichte zu Ersterem proportional. Der Proportionalitätsfaktor heißt Wärmeleitfähigkeit und wird in $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ angegeben. Die Wärmestromdichte ist – ebenso wie das Temperaturgefälle – ein Vektor; sie hat die Dimension eines flächenbezogenen Wärmestroms und wird daher in $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$ gemessen.

In isotropen Körpern – die meisten Baustoffe können als solche aufgefasst werden – ist die Wärmeleitfähigkeit ein Skalar, kann also durch eine einzige Zahlenangabe festgelegt werden. In diesem Fall hat der Vektor der Wärmestromdichte die gleiche Richtung wie das Temperaturgefälle. In thermisch anisotropen Körpern – Holz ist ein bekanntes Beispiel dafür – ist die Wärmeleitfähigkeit als Tensor zweiter Stufe aufzufassen; die Wärme strömt in diesem Fall nicht notwendig in Richtung des Temperaturgefälles.

Die Wärmeleitfähigkeit ist die einzige Materialeigenschaft eines festen Körpers, die für stationäre Wärmeleitungsvorgänge maßgebend ist. Bei instationären Wärmeleitungsvorgängen kommt hingegen auch das Produkt aus spezifischer Wärme und Massendichte zur Beschreibung des Wärmespeichervermögens ins Spiel.

Die Beschreibung der Wärmetransportvorgänge aufgrund von Wärmeleitung zwischen verschiedenen temperierten Räumen eines Gebäudes und außen wird dann einfach, wenn folgende Näherungsansätze akzeptiert werden:

- Die Materialeigenschaften der in die Wärmeleitungsprozesse involvierten Baustoffe sind unabhängig von ihrer Temperatur,
- die Wärmeübergangswiderstände an den Oberflächen der Bauteile sind konstant und
- die „Räume“ haben einheitliche Temperatur.

Unter „Räumen“ werden hier nicht nur die Innenräume des Gebäudes verstanden. Auch die äußere Umgebung kann in verschiedene „Außenräume“ aufgeteilt werden, denen jeweils verschiedene Strahlungslufttemperaturen zugeordnet werden. Gemäß (3) ist die Strahlungslufttemperatur eine fiktive Temperatur, die neben der Außenlufttemperatur auch die Effekte der Sonneneinstrahlung und des langwelligigen Strahlungsaustauschs exakt zu erfassen gestattet.

Unter den genannten vereinfachenden Annahmen kann der Wärmeverlust Φ_i eines mit dem Index i gekennzeichneten Raums wie folgt errechnet werden:

$$\Phi_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N+1} L_{i,j} \cdot (\Theta_i - \Theta_j) \quad . \quad <3.11>$$

Der Wärmeverlust des Raums i ist somit proportional zur Differenz der Lufttemperatur Θ_i im betrachteten Raum i und jener Θ_j im Nachbarraum mit dem Index j . Zu summieren ist über alle N Nachbarräume, wobei natürlich auch die Außenräume als Nachbarräume in die

Summation eingehen. Die in Gleichung <3.11> aufscheinenden Proportionalitätsfaktoren $L_{i,j}$ sind die thermischen Leitwerte zwischen Raum i und Raum j und werden in WK^{-1} angegeben. Gleichung <3.11> ist insofern grundlegend als sie für beliebig gestaltete, in beliebiger Kombination aneinander grenzende Räume gilt. Auch in Hinblick auf die materielle Zusammensetzung der Bauteile, die die Räume trennen – aus thermischer Sicht natürlich aber verbinden – gibt es keine Einschränkung. Auch die Gesamtzahl der $N + 1$ Räume ist nicht nach oben hin beschränkt.

Die thermischen Leitwerte sind unabhängig von den als „Randbedingungen“ eingehenden Luft- oder Strahlungslufttemperaturen Θ und somit als thermisches Charakteristikum der jeweiligen Baukonstruktion bestens geeignet. Im Normalfall ergeben sich die thermischen Leitwerte $L_{i,j}$ als Ergebnis einer dreidimensionalen Wärmebrückenberechnung. Im Spezialfall plattenförmiger Bauteile gibt es nur einen Nachbarraum. Gleichung <3.11> bekommt in diesem Fall die einfache Form

$$\Phi_1 = L_{1,2} \cdot (\Theta_1 - \Theta_2) = U \cdot A \cdot (\Theta_1 - \Theta_2) \quad . \quad <3.12>$$

Ersichtlich ist in diesem Fall der thermische Leitwert zwischen dem interessierenden Raum 1 und dem Nachbarraum 2 durch das Produkt des Wärmedurchgangskoeffizienten („U-Werts“) U und der Bauteilfläche A gegeben. Der U-Wert erweist sich somit als flächenbezogener thermischer Leitwert und wird in $[Wm^{-2}K^{-1}]$ angegeben. Nur im Spezialfall eines plattenförmigen Bauteils ist die Bauteilfläche A eindeutig ermittelbar.

Ist der plattenförmige Bauteil zudem ausschließlich aus homogenen Schichten aufgebaut, so kann der U-Wert bekanntlich analytisch auf einfachste Art und Weise errechnet werden. In diesem speziellen Fall fließt der Wärmestrom immer senkrecht zu den Bauteiloberflächen und kann somit durch eine einzige Koordinate beschrieben werden. Es wird daher von „eindimensionaler Wärmeleitung“ gesprochen.

Der Wärmedurchlasswiderstand einer mit dem Index i gekennzeichneten homogenen Schicht ist mit

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad <3.13>$$

gegeben. d_i kennzeichnet die Dicke der Schicht i in Metern, λ_i deren Wärmeleitfähigkeit in $[Wm^{-1}K^{-1}]$. Der gesamte thermische Widerstand R_T eines aus Z homogenen Schichten aufgebauten Bauteils ergibt sich als Summe der Einzelwiderstände

$$R_T = R_{s,1} + \sum_{i=1}^Z R_i + R_{s,2} = R_{s,1} + \sum_{i=1}^Z \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{s,2} \quad <3.14>$$

und wird Wärmedurchgangswiderstand genannt. $R_{s,1}$ und $R_{s,2}$ in Gleichung <3.14> sind die Wärmeübergangswiderstände für die Raumzugewandte (Index 1) und die Raumabgewandte Seite (Index 2) des Bauteils.

Der als U-Wert bekannte Wärmedurchgangskoeffizient ist ein flächenbezogener Leitwert und ergibt sich als Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstands gemäß

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{s,i} + \sum_{i=1}^Z \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{s,e}} \quad . \quad <3.15>$$

Auch für den Fall der thermischen Bauteilaktivierung kann das Konzept der thermischen Leitwerte nutzbringend angewandt werden. Der Leitwert ist in diesem Fall aber nicht – wie soeben anhand des U-Werts gezeigt – analytisch berechenbar, sondern muss unter Verwendung eines geeigneten Wärmebrückenprogramms ermittelt werden. Grund dafür ist zum einen, dass der Wärmestrom durch einen thermisch aktivierten Bauteil mit dem stark vereinfachten Modell eindimensionaler Wärmeleitung auch nicht näherungsweise erfasst werden kann. Zum anderen kommt bereits bei einem plattenförmigen Bauteil zu den beiden an diesen Bauteil angrenzenden Räumen das Innere des Rohrregisters als dritter „Raum“ hinzu. Wird vereinfachend diesem dritten Raum eine einheitliche Temperatur – die „Rohrtemperatur“ – zugeordnet, so kann im Fall einer thermisch aktivierten Decke Gleichung <3.11> wie folgt angeschrieben werden:

$$\Phi_u = L_{u,r} \cdot (\Theta_u - \Theta_r) + L_{u,o} \cdot (\Theta_u - \Theta_o) \quad . \quad <3.16>$$

Der Wärmeverlust des Raums unter der aktivierten Decke Φ_u ist demnach zum einen proportional zur Differenz aus der Lufttemperatur in diesem Raum Θ_u und der Rohrtemperatur Θ_r . Zum anderen wird dieser Wärmeverlust additiv durch einen Term ergänzt, der proportional zur Differenz zwischen der Lufttemperatur Θ_u und der Lufttemperatur im Raum über der aktivierten Decke Θ_o ist. Als Proportionalitätsfaktoren treten die thermischen Leitwerte $L_{u,r}$ und $L_{u,o}$ auf, die sich als Ergebnis einer Wärmebrückenberechnung einstellen und in $[WK^{-1}]$ gemessen werden.

Anmerkung: Beim Übergang von Gleichung <3.11> auf Gleichung <3.16> ist zu beachten, dass sich die Leitwerte in Gleichung <3.11> auf die gesamte Hüllfläche des Raums beziehen. Das hier vorgestellte Modell bezieht sich aber nur auf die thermisch aktivierte Decke, also nur auf einen Teil dieser Hüllfläche. Die Leitwerte müssten somit in Gleichung <3.16> durch einen weiteren Index von jenen der Gleichung <3.11> unterscheidbar gemacht werden. Da im Folgenden ausschließlich der Fall der thermisch aktivierten Decke im Fokus steht, wird der besseren Lesbarkeit wegen auf die Einführung des zusätzlichen Indexes verzichtet.

Handelt es sich bei der thermisch aktivierten Decke um eine Decke zwischen 2 Regelgeschossen, so wird in guter Näherung die Lufttemperatur im Raum unter der Decke gleich groß wie jene im Raum über der Decke sein. Damit wird die Differenz $\Theta_u - \Theta_o$ null und Gleichung <3.16> reduziert sich auf die sehr einfache Form

$$\Phi_u = L_{u,r} \cdot (\Theta_u - \Theta_r) \quad . \quad <3.17>$$

Der Wärmeverlust des Raums unterhalb der thermisch aktivierten Decke an das Rohrregister Φ_u ist damit für beliebige Kombinationen von Θ_u und Θ_r per Hand berechenbar, sofern der Wert von $L_{u,r}$ bekannt ist. Ersichtlich ist Φ_u im Kühlfall positiv und im Fall der Beheizung negativ, was natürlich einem Wärmegewinn des Raums entspricht.

Für den Klimatechniker von Belang ist zudem die Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabeleistung des Rohrregisters. Auch diese kann unter Zugriff auf Gleichung <3.11> analog gemäß

$$\Phi_r = L_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) + L_{r,o} \cdot (\Theta_r - \Theta_o) \quad <3.18>$$

berechnet werden. Der Wärmeverlust des Rohrregisters Φ_r setzt sich demnach aus dem Wärmeverlust $L_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u)$ in den Raum unterhalb der Decke und jenem $L_{r,o} \cdot (\Theta_r - \Theta_o)$ in den

Raum über der Decke zusammen. Die Leitwerte $L_{r,u}$ und $L_{r,o}$ stehen nach einer Wärmebrückenberechnung zur Verfügung, sodass auch die Wärmeaufnahme oder -abgabe des Rohrregisters für beliebige Kombinationen von Raum- und Rohrtemperaturen per Hand errechnet werden kann. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass Leitwerte immer von der Wärmestromrichtung unabhängig sind. Es gilt also z. B. $L_{r,u} = L_{u,r}$.

Natürlich muss hier erwähnt werden, dass die skizzierten, sehr einfachen Beziehungen mit einem vereinfachten Berechnungsmodell erkaufte wurden. Die Vorgabe einer „Rohrtemperatur“ Θ_r ist insofern eine Fiktion als das Rohrregister ja von einem Fluid durchströmt wird und sich aufgrund von Wärmetauschereffekten eine solche Temperatur an verschiedenen Stellen des Registers unterschiedlich ausfallen wird. Wie sich in der Baupraxis zeigt, bleibt – insbesondere bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und nicht allzu großen Rohrlängen – der Unterschied zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur – also die „Spreizung“ – eher klein. Die Spreizung liegt üblicherweise im Bereich von einigen, wenigen Kelvin. Die „Rohrtemperatur“ kann damit in guter Näherung als arithmetischer Mittelwert zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur angesetzt werden, womit die Anwendung der einfachen Beziehungen <3.16> bis <3.18> zu guten Näherungswerten für die jeweilig interessierenden Wärmeflüsse führt.

III.2.3 Wärmestrahlung

Die Oberflächen von Körpern senden permanent Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung aus. Die Intensität dieser Strahlung hängt einerseits von der Oberflächentemperatur und andererseits von den Oberflächeneigenschaften ab. Für den „schwarzen Körper“ ist die von der Oberfläche ausgehende Bestrahlungsstärke B gemäß

$$B = C_s \cdot T^4 \quad <3.19>$$

proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur T . Die absolute Temperatur hat ihren Nullpunkt bei $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ und wird in Kelvin [K] angegeben. Zur Orientierung hilft die Erkenntnis, dass die üblichen Raumtemperaturen ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ und darüber) im Bereich von ca. 300 K angesiedelt sind. Der Proportionalitätsfaktor in Gleichung <3.19> wird „Strahlungskonstante“ des schwarzen Körpers genannt und ist mit

$$C_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-4}] \quad <3.20>$$

gegeben.

Anmerkung: Die Bestrahlungsstärke B ist eine flächenbezogene Leistung und wird damit in $[\text{Wm}^{-2}]$ angegeben.

Der „schwarze Körper“ ist eine fiktive Konstruktion, dessen Oberflächen ankommende langwellige Wärmestrahlung zur Gänze absorbiert und damit keinerlei Strahlung reflektiert; die Absorptionszahl für langwellige Wärmestrahlung ist in diesem Fall somit $a = 1,0$. In der Realität kommen schwarze Strahler nicht vor. Diesem Umstand wird durch Einführung sog. „grauer Strahler“ Rechnung getragen. Ein grauer Strahler ist dadurch gekennzeichnet, dass seine Absorptionszahl für Wärmestrahlung kleiner als 1 ist. Für die meisten im Bauwesen vorkommenden Oberflächen liegt diese Absorptionszahl im Bereich um 0,9.

Im Umfeld der bauphysikalischen Wärmelehre hat sich eingebürgert, am Stefan-Boltzmann'schen Gesetz <3.19> festzuhalten und die Strahlungskonstante durch Multiplikation mit der Absorptionszahl a des Materials zu reduzieren, also mit

$$B = a \cdot C_s \cdot T^4 \quad <3.21>$$

zu rechnen. Dieser Ansatz hat sich als Näherung bewährt und wird allgemein verwendet, obwohl bekannt ist, dass die Abhängigkeit von T^4 z. B. bei metallischen Oberflächen nicht zutrifft. Die von blanken metallischen Oberflächen ausgehenden Bestrahlungsstärken sind durch sehr kleine Absorptionszahlen und eine Temperaturabhängigkeit von etwa T^5 charakterisiert.

Trifft die von einer Ebene A ausgehende Wärmestrahlung zur Gänze auf eine Empfängerebene E, so ergibt sich gemäß <3.21> zunächst eine Bestrahlungsstärke B_A von

$$B_A = a_A \cdot C_S \cdot T_A^4 \quad . \quad <3.22>$$

T_A ist hierbei die Oberflächentemperatur der Ebene A, die als isotherm angenommen wird. Auch die Absorptionszahl dieser Ebene a_A ist ortsunabhängig angesetzt.

Anmerkung: Im thermischen Gleichgewicht – und nur dieser Fall soll hier betrachtet werden – ist als Folge des Kirchhoff'schen Strahlungsgesetzes die Absorptionszahl a gleich der Emissionszahl ε . Salopp ausgedrückt bedeutet dies, dass eine Oberfläche, die gut Wärmestrahlung absorbiert auch ein guter Wärmestrahler (Emitter) ist.

Von der Bestrahlungsstärke B_A wird von der Empfangsebene E der Anteil a_E absorbiert und der Anteil $r_E = 1 - a_E$ reflektiert. Der reflektierte Anteil trifft wiederum zur Gänze auf Ebene A, wird dort zu einem Anteil a_A absorbiert und zum Anteil $r_A = 1 - a_A$ reflektiert. Evident erhöht sich damit die von Ebene A ausgehende Wärmestromdichte und beträgt nun

$$B_A = a_A \cdot C_S \cdot T_A^4 \cdot (1 + r_A \cdot r_B) \quad . \quad <3.23>$$

Natürlich liefern weitere Reflexionen zusätzliche Beiträge zur Bestrahlungsstärke B_A . Wie leicht nachzuvollziehen, ist die von Ebene A ausgehende Bestrahlungsstärke bei Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen in der Form

$$B_A = a_A \cdot C_S \cdot T_A^4 \cdot \left\{ 1 + r_A \cdot r_B + (r_A \cdot r_B)^2 + (r_A \cdot r_B)^3 + \dots \right\} \quad <3.24>$$

darstellbar. Der in der geschwungenen Klammer von Gleichung <3.24> stehende Ausdruck ist eine geometrische Reihe, deren Summe bekanntlich mit $(1 - r_A \cdot r_B)^{-1}$ gegeben ist. Als Ergebnis dieser einfachen Überlegungen ist die von Ebene A ausgehende Bestrahlungsstärke B_A unter Berücksichtigung sämtlicher (unendlich vieler) Reflexionen durch den Ausdruck

$$B_A = \frac{a_A \cdot C_S \cdot T_A^4}{1 - r_A \cdot r_B} \quad <3.25>$$

gegeben. Natürlich lässt sich die entsprechende Überlegung ganz analog auf die Empfangsfläche E übertragen, was ersichtlich zum Ergebnis

$$B_E = \frac{a_E \cdot C_S \cdot T_E^4}{1 - r_A \cdot r_B} \quad <3.26>$$

führen muss. Die von Ebene A mittels Wärmestrahlung auf die Empfangsebene E übertragene flächenbezogene Wärmeleistung $q_{A,E}$ ergibt sich nun als Differenz zwischen der von Ebene E absorbierten Bestrahlungsstärke $a_E \cdot B_A$ und der von Ebene A absorbierten Bestrahlungsstärke $a_A \cdot B_E$ zu

$$q_{A,E} = a_E \cdot B_A - a_A \cdot B_E = \frac{a_A \cdot a_E \cdot C_S}{1 - r_A \cdot r_B} \cdot (T_A^4 - T_E^4) \quad . \quad <3.27>$$

Der mit obiger Gleichung beschriebene Prozess der Wärmeübertragung mittels Wärmestrahlung wird „Strahlungsaustausch“ genannt.

Der in Gleichung <3.27> vor der Klammer stehende Ausdruck ist die sog. Strahlungsaustauschkonstante $C_{A,E}$, die sich – wie leicht nachgerechnet werden kann – in die Form

$$C_{A,E} = \frac{a_A \cdot a_E \cdot C_S}{1 - r_A \cdot r_B} = \frac{C_S}{\frac{1}{a_A} + \frac{1}{a_E} - 1} \quad <3.28>$$

umwandeln lässt.

Da beide in Gleichung <3.28> vorkommenden Absorptionszahlen für reale Oberflächen kleiner als 1 sind, ist die Strahlungsaustauschkonstante immer kleiner als die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers C_S .

Durch eine einfache Umformung kann Gleichung <3.27> in die Form

$$q_{A,E} = C_{A,E} \cdot (T_A^4 - T_E^4) = h_r(T_A, T_E) \cdot (T_A - T_E) \quad <3.29>$$

gebracht werden. Der Faktor h_r ist offenkundig ein flächenbezogener thermischer Leitwert, der gemäß EN ISO 6946 (4) „Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung“ genannt wird. h_r ist dabei gemäß

$$h_r = C_{A,E} \cdot (T_A^2 + T_E^2) \cdot (T_A + T_E) \quad <3.30>$$

gegeben. Nachteilig erweist sich in diesem Zusammenhang, dass h_r nicht temperaturunabhängig ist, sondern von den beiden Oberflächentemperaturen T_A und T_E abhängt. Da sich in der Baupraxis die absoluten Temperaturen T_A und T_E nur wenig voneinander unterscheiden, wird Gleichung <3.30> gerne durch den Näherungsansatz $T_A \approx T_B = T_m$ weiter vereinfacht. Ausgedrückt durch die „mittlere Temperatur“ T_m erhält Gleichung <3.30> die Form

$$h_r = 4 \cdot C_{A,E} \cdot T_m^3 \quad . \quad <3.31>$$

Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit des flächenbezogenen Leitwerts h_r von der Temperatur für den Temperaturbereich zwischen -10 °C und 40 °C (d.h. 263 K und 313 K) für verschiedene Absorptionszahlen. Hierbei wurde vereinfachend angenommen, dass beide Flächen die gleiche Absorptionszahl besitzen.

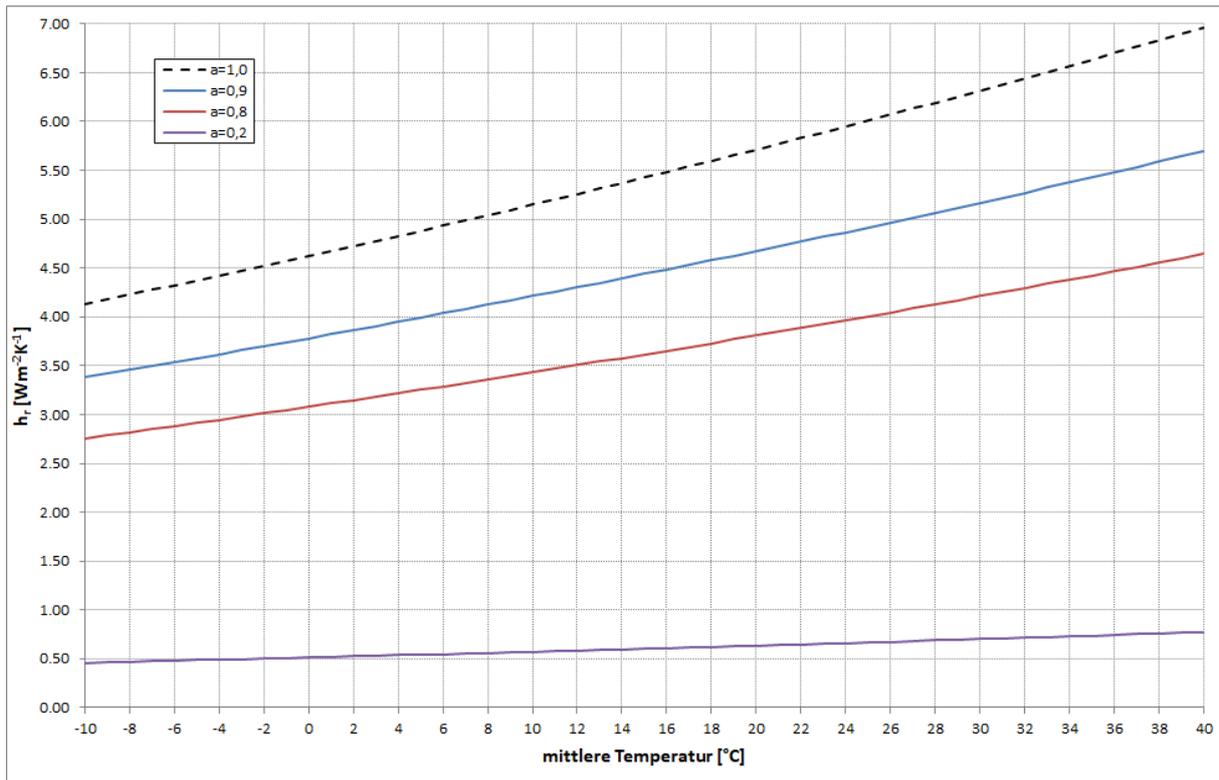


Abb. 3.1: Abhängigkeit des flächenbezogenen Leitwerts h_r von der mittleren Temperatur $\Theta_m = T_m - 273,15$

Ersichtlich besteht eine starke Abhängigkeit des flächenbezogenen Leitwerts h_r von den Absorptionszahlen der beiden Ebenen. Im Fall von verputzten Wandoberflächen, denen Absorptionszahlen von ca. 0,9 zugeordnet werden können, liegt h_r bei einer Raumtemperatur von 22 °C bei ca. $4,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Dies zeigt, dass der Strahlungsaustausch in diesem Fall eine sehr starke thermische Kopplung darstellt.

Liegen die beiden Absorptionszahlen hingegen bei 0,2, wie dies bei blanken metallischen Oberflächen der Fall ist, so ergibt sich für h_r bei 22 °C ein Wert von $0,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, was einer nur schwachen thermischen Kopplung entspricht. Dieser ausgeprägte Effekt wird verwendet, um bei z. B. Wärmeschutzgläsern mittels metallischer Beschichtungen den Wärmedurchgang durch den Raum zwischen jeweils zwei (verschieden temperierten) Scheiben stark zu reduzieren.

Die thermische Kopplung steigt mit wachsender mittlerer Temperatur an, wobei dieser Effekt bei sinkenden Absorptionszahlen deutlich abnimmt.

Wichtig ist, dass in sämtlichen bisher gezeigten Überlegungen der Abstand der beiden strahlenden Ebenen nicht vorkommt. Dieser Abstand ist unerheblich, solange die Forderung, dass die von einer Ebene ausgehende Strahlung zur Gänze die andere Ebene trifft, erfüllt ist.

Anmerkung: Der Umstand, dass der Scheibenabstand bei Wärmeschutzgläsern sehr wohl Auswirkung auf den U-Wert des Glases hat, ist allein konvektiven Wärmeübergangsprozessen im Zwischenraum zwischen den Gläsern zuzuschreiben. Der Strahlungsaustausch wird durch Veränderung des Scheibenabstands nicht verändert.

Bei der Betrachtung des Strahlungsaustauschs innerhalb eines Raums fällt vorerst auf, dass die bisher aufgestellte Forderung, wonach die z. B. von einer thermisch aktivierten Deckenfläche ausgehende Wärmestrahlung zur Gänze den gegenüberliegenden Fußboden trifft, nicht erfüllt

ist. Die Wärmestrahlung wird zum Teil auch die Wände treffen. Da der Strahlungsaustausch gemäß Gleichung <3.29> auch stark von den Oberflächentemperaturen abhängt, ist klar, dass auch zwischen verschiedenen temperierten Wandelementen, also zwischen Fenstergläsern, Fensterrahmen, sowie Außen- als auch Innenwänden unterschieden werden muss. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu wissen, dass der in Gleichung <3.29> abgeleitete lineare Zusammenhang zwischen übertragener Wärmestromdichte und den Oberflächentemperaturen nach wie vor gültig ist. Lediglich die Berechnung des thermischen Leitwerts wird schwieriger und hängt u. a. von der Lage zwischen sendender und empfangender Fläche ab. Salopp gesagt, geht der Umstand, wie viel die sendende Fläche von der Empfangsfläche „sieht“ in die Leitwert-Berechnung ein. Die von der Sendefläche ausgehende Wärmestrahlung trifft somit nur zum Teil auf die jeweilig betrachtete Empfangsfläche auf. Dieser Anteil kann berechnet werden und wird Einstrahlzahl genannt. Die Berechnung der Einstrahlzahl erfordert die Lösung eines Vierfachintegrals und ist entsprechend aufwändig.

Im Fall eines konvexen Raums trifft die von einer Sendefläche ausgehende Wärmestrahlung zur Gänze direkt auf andere Begrenzungsflächen des Raums. In diesem, und nur in diesem Fall kann – ähnlich wie oben gezeigt – der Strahlungsaustausch zwischen allen raumbegrenzenden Flächen unter Berücksichtigung sämtlicher Reflexionen berechnet werden. Um diesen hohen Grad an Genauigkeit auszunutzen, wird in diesem Bericht der Strahlungsaustausch im Raum nur für quaderförmige – und damit konvexe – Raumgeometrien berechnet und dargestellt.

III.3 Der periodisch eingeschwungene Berechnungsansatz

Gerade bei thermisch aktivierten Bauteilen spielen Aspekte des Wärmespeichervermögens eine besonders interessierende Rolle. Speichereffekte treten dann und nur dann auf, wenn zeitabhängige – also instationäre – Prozesse ins Spiel kommen. Im Fall von stationären Betrachtungen kann hingegen ein Speichervermögen keine Rolle spielen. Wie bereits angesprochen, gehen in stationäre Berechnungen von Temperaturfeldern und Wärmeströmungen nur die Geometrie, die Materialzusammensetzung und die Wärmeleitfähigkeiten der vorkommenden Materialien ein. Erst bei instationären Betrachtungen kommen die spezifische Wärmekapazität und die Massendichte der vorkommenden Materialien hinzu; Geometrie und Materialzusammensetzung bleiben davon natürlich unberührt.

Die instationäre Betrachtung - also die dynamische Simulation des thermischen Verhaltens eines Bauteils, eines Raums oder eines ganzen Gebäudes - erfolgt prinzipiell immer durch Aufstellung und Lösung von Wärmebilanzgleichungen. Die Berechnung der in solchen Bilanzgleichungen aufscheinenden Wärmeströme erfordert u. a. die Lösung der Wärmeleitungsgleichung. Eine solche Lösung ist im allgemeinen Fall nur dann möglich, wenn sowohl Randbedingungen als auch Anfangsbedingungen vorgegeben werden. Als Randbedingungen gehen im Fall einer thermisch aktivierten Decke die Zeitverläufe der Lufttemperaturen in den beiden Räumen unterhalb und oberhalb der Decke ein. Der zeitliche Verlauf der Rohrtemperatur, d. h. der im Inneren der Rohre des Heizregisters anzunehmenden Temperatur, bildet die dritte Randbedingung.

Als Anfangsbedingungen gehen die Temperaturen an sämtlichen Punkten der untersuchten Baukonstruktion zu einem bestimmten Zeitpunkt – dem Anfangszeitpunkt – ein. Natürlich ist klar, dass Anfangsbedingungen nie bekannt sind und somit frei erfunden werden müssen. Da die Wärmeleitungsgleichung die Eigenschaft hat, dass der Einfluss der Anfangsbedingungen auf das Berechnungsergebnis im Laufe der (Simulations-) Zeit abklingt, muss eine thermische Simulation für gewöhnlich „einlaufen“. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Simulation nach dem Anfangszeitpunkt ignoriert und erst nach der „Einlaufzeit“ ernst genommen werden. Die Länge der Einlaufzeit hängt eng mit der Wärmespeicherfähigkeit der untersuchten Baukon-

struktion zusammen. Im Fall sehr hoher Wärmespeicherfähigkeit, wie sie etwa bei Betonbauteilen anzutreffen ist, kann die Einlaufzeit mehrere Monate betragen und den Simulationsaufwand entsprechend erhöhen.

Die Notwendigkeit, die faktisch nie bekannten Anfangsbedingungen vorgeben zu müssen, entfällt im Falle der Festlegung auf den Ansatz periodisch eingeschwungener Zeitverläufe. Periodisch eingeschwungene Zeitverläufe sind Berechnungsansätze, denen die fiktive Annahme zugrunde liegt, dass der Zeitverlauf sich unendlich oft wiederholt. Natürlich bedingt dies auch, dass der erste und der letzte Wert der Zeitreihe identisch sind. Bezüglich des Aussehens des zeitlichen Verlaufs bestehen hingegen keine Einschränkungen. Insbesondere darf ein periodisch eingeschwungener Verlauf nicht mit der Vorgabe eines sinusförmigen Verlaufs verwechselt werden.

Die Forderung nach Periodizität macht somit das Erfinden von Anfangsbedingungen überflüssig. Nicht nur aus diesem Grund soll im Folgenden ausschließlich vom periodisch eingeschwungenen Ansatz Gebrauch gemacht werden. Der periodisch eingeschwungene Ansatz hat zudem folgende bedeutsame Vorteile:

- Die Wärmeleitungsgleichung kann für den Spezialfall eindimensionaler Wärmeleitung nur im periodisch eingeschwungenen Fall exakt gelöst werden. Fehler der zeitlichen Diskretisierung, wie sie bei jedem „Zeitschrittverfahren“ in Kauf genommen werden müssen, gibt es nicht. Der Berechnungsansatz liefert damit die genauest möglichen Ergebnisse.
- Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung erfolgt durch Aufstellung und Lösen einer Gleichung oder eines Gleichungssystems. Für thermische Simulationen unter dem Ansatz periodisch eingeschwungener Verhältnisse bedeutet dies, dass das Ergebnis nicht nur sehr genau ist, sondern auch per Tastendruck – also sofort – generiert wird. Die Berechnungsdauer ist somit im Vergleich zu einer Simulation im Zeitschrittverfahren unerreichbar kurz.
- Mit sog. „harmonischen thermischen Leitwerten“ liefert die periodisch eingeschwungene Rechnung Kenngrößen, die zur Charakterisierung des instationären thermischen Verhalten einer Baukonstruktion geeignet sind. So werden z. B. die in der EN ISO 13786 (5) eingeführten wirksamen Wärmekapazitäten aus harmonischen thermischen Leitwerten rückgerechnet.
- Nur im Falle einer periodisch eingeschwungenen Simulation ist die Interpretation des Berechnungsergebnisses sehr einfach und übersichtlich möglich. Im Fall von Variantenrechnungen ist der Zusammenhang zwischen Ursache (z. B. einer baulichen Maßnahme) und Wirkung (z. B. der Wärmeabgabeleistung des aktivierten Bauteils) auf einen Blick erkennbar. Dieser große Vorteil wird im Folgenden ausgiebig genutzt.

In diesem Bericht wird überwiegend der periodisch eingeschwungene Ansatz mit der Periodenlänge von einem Tag verwendet. Dies bedeutet, dass z. B. die Betriebsweise der Umwälzpumpe, die das Rohrregister versorgt, Tag für Tag ungeändert beibehalten wird. In der Realität stellt sich das durch solch‘ eine periodisch eingeschwungene Berechnung ermittelte Ergebnis nach einer Serie von Tagen gleicher oder fast gleicher Randbedingungen ein.

IV. Die thermisch aktivierte Betondecke

Als thermische Aktivierung wird der Einbau von Rohrregistern in die tragende Konstruktion von Gebäuden verstanden. Damit stehen Fußböden, Wände und Decken für eine thermische Aktivierung zur Verfügung.

Die hier vorgestellten Forschungsergebnisse sind auf das Verhalten von thermisch aktivierten Betondecken beschränkt. Als wesentliche Ursachen dieser Beschränkung sind bautechnische Überlegungen zu nennen. Zum einen wird im Fall von thermisch aktivierten Fußböden oder Wänden die Wirkung des Systems durch die Art der Möblierung beeinflusst, da der Strahlungsaustausch zwischen aktivierten und nicht aktivierten inneren Bauteiloberflächen gebremst wird. Zum anderen hat sich der Einbau der Rohrregister in Deckenaufbauten als einfach, leicht durchführbar und damit kostengünstig erwiesen.

In diesem Kapitel wird der Fokus auf das thermische Verhalten der thermisch aktivierten Decke alleine gelegt. Dies bedeutet zum einen, dass der thermische Kontakt zu allen anderen Gebäudeteilen, wie z. B. Fußboden, Außen- und Innenwänden, unberücksichtigt bleibt. Zum anderen geht auch die Art der an die aktivierte Decke angrenzenden Räume nicht in die rechnerischen Untersuchungen ein. Diese an und für sich notwendigen Angaben werden durch Annahmen in Hinblick auf die Lufttemperaturen in den Räumen ersetzt; in diesem Zusammenhang wird von fix vorgegebenen „Randbedingungen“ gesprochen.

Ziel dieses Teils der Untersuchung ist das Gewinnen von Erkenntnissen über das stationäre und instationäre Verhalten einer thermisch aktivierten Decke in Abhängigkeit von verschiedensten Parametern. Von Interesse sind vor allem folgende Einflüsse:

- Achsabstand der verlegten Rohre,
- Durchmesser der Rohre,
- Höhenlage des Rohrregisters,
- Decken- und Fußbodenaufbau.

Es interessiert hierbei zum einen der Einfluss auf die Wärmeabgabeleistung bzw. die Wärmeaufnahmeleistung der aktivierten Decke. Dieser Einfluss lässt sich am einfachsten über die flächenbezogene Heiz- bzw. Kühlleistung darstellen und kann mit stationären, also zeitunabhängigen Berechnungen ermittelt werden.

Zum anderen ist auch die Veränderung des thermischen Verhaltens der aktivierten Decke in Abhängigkeit vom jeweils vorliegenden Betriebszustand der haustechnischen Anlage von Interesse. Diese Fragestellung lässt sich nur mit instationären, d. h. zeitabhängigen Berechnungen beantworten, wobei in diesem Fall nicht nur die Wärmeabgabe, sondern auch die Wärmespeicherung der Betondecke eine Rolle spielt.

Im Folgenden wird zwischen Geschoßdecken und obersten Decken unterschieden. Als Geschoßdecke wird dabei die Decke zwischen zwei Regelgeschossen verstanden. Aus bauphysikalischem Blickwinkel besteht der Unterschied zwischen Geschoßdecke und oberster Decke lediglich darin, dass die im über der Decke befindlichen Raum anzusetzenden Temperaturen stark unterschiedlich sind. Aus bautechnischer Sicht ergibt sich ein ebenso gravierender Unterschied; die oberste Decke wird natürlich sehr viel besser wärmegeklämt sein als eine Geschoßdecke und damit einen deutlich anderen Schichtaufbau aufweisen.

IV.1 Thermisch aktivierte Geschoßdecke

Nachdem die Geschoßdecke jeweils zwei Regelgeschosse trennt (aus bauphysikalischer Sicht aber natürlich thermisch verbindet), kann davon ausgegangen werden, dass die Temperaturen

in den Räumen oberhalb und unterhalb der betrachteten Decke annähernd gleich groß sind. Dieser Umstand wird in der Folge ausgenutzt, um klarere Aussagen über den Einfluss des in die Decke eingebetteten Rohrregisters auf das thermische Verhalten der Decke zu erhalten. Zu diesem Zweck wird vereinfachend angenommen, dass die Lufttemperaturen der beiden Räume identisch sind.

IV.1.1 Voruntersuchung zum Einfluss der Bewehrung

Der Einfluss der Bewehrung auf den Wärmedurchgang durch eine Stahlbetonscheibe wird üblicherweise durch Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Betons zu erfassen getrachtet. Für unbewehrten Beton hoher Dichte gibt die EN 12524:2000 (6) eine Wärmeleitfähigkeit von 2,0 [Wm⁻¹K⁻¹] an. Ist der Beton bewehrt, so ist gemäß Norm je nach Grad der Bewehrung dieser Wert auf 2,3 oder im Fall starker Bewehrung auf 2,5 [Wm⁻¹K⁻¹] zu erhöhen (6), (7).

Im Fall einer Geschoßdecke ist diese normativ vorgeschlagene Grobnäherung unkritisch, da die Temperaturdifferenz zwischen dem Raum unter und dem Raum oberhalb der Decke zumeist sehr klein sein wird. Die mit der Änderung der Wärmeleitfähigkeit der Rohdecke einhergehende Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten hat damit kaum einen Einfluss auf den Wärmedurchgang durch die Decke.

Anders ist dies, wenn die Geschoßdecke thermisch aktiviert ist. Hier wird die Setzung der Wärmeleitfähigkeit des Betons durchaus Auswirkung auf das rechnerisch prognostizierte thermische Verhalten der Geschoßdecke und die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Decke haben. In einem ersten Schritt ist damit rechnerisch abzuklären, welchen Einfluss die Bewehrung auf das thermische Verhalten des thermisch aktivierten Bauteils hat. Geht man von der Annahme aus, dass die tragende Bewehrung der Decke kreuzweise verlegt ist, so muss das thermische Modell dreidimensional aufgebaut werden.

Der Schichtaufbau der Geschoßdecke wird einer aktuell vorliegenden Planung für eine Wohnanlage übernommen und ist in Tab. 4.1 dargestellt.

	d [m]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρ [kgm ⁻³]	c [kJkg ⁻¹ K ⁻¹]
oben				
Bodenbelag (Fliesen)	0,0100	1,000	2000	0,92
Zementestrich	0,0600	1,400	2000	1,13
PE-Folie	0,0002			
Trittschalldämmung	0,0300	0,038	32	1,45
Dampfbremse	0,0004			
Dämmschüttung gebunden	0,1000	0,050	200	1,56
Stahlbetondecke	0,2500	2,000	2400	1,00
unten				

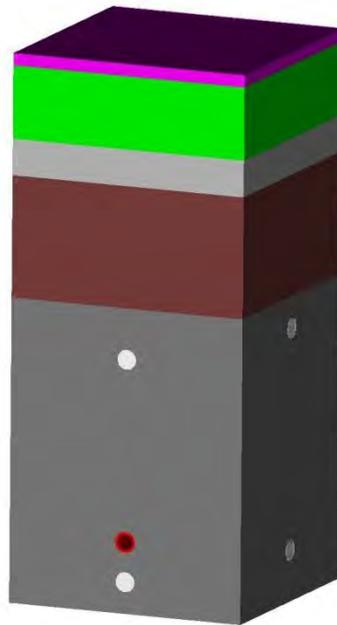
Tab. 4.1: Schichtaufbau der Geschoßdecke

Der Einfluss der dünnen Folien (PE-Folie und Dampfbremse) auf das thermische Verhalten der Geschoßdecke ist vernachlässigbar. Diese Folien bleiben in den nachfolgenden Berechnungen aus diesem Grund unberücksichtigt.

Als tragende Bewehrung wird ein kreuzweise verlegter Baustahl mit einem Durchmesser von 16 mm angesetzt, wobei der Achsabstand der Bewehrungsstäbe mit 20 cm angenommen wird. Eine zusätzlich etwaig erforderliche Verteilerbewehrung wird nicht modelliert. Für das Heiz-

bzw. Kühlrohr wird der Außendurchmesser mit 17 mm, und die Dicke der Rohrwandung mit 2,0 mm angenommen. Auch der Achsabstand dieser Rohre wird im Zuge dieser Untersuchung mit 20 cm angesetzt.

Aufgrund von Symmetrieüberlegungen genügt es bei den getroffenen Annahmen, nur einen quadratischen Ausschnitt von 20 cm Seitenlänge zu modellieren, um die volle Information über das thermische Verhalten der aktivierten Geschoßdecke berechnen zu können. Abb. 4.1 zeigt das Berechnungsmodell.



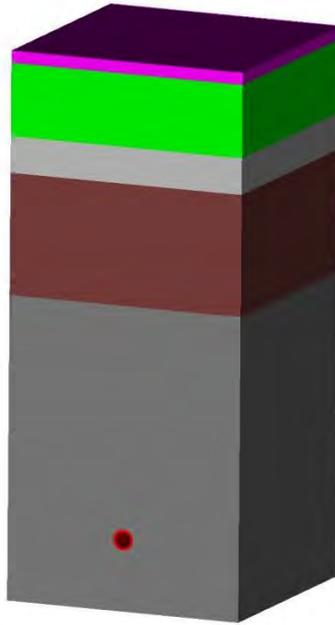
AnTherm V.7.124 2013.09.23 © T.Kornicki www.kornicki.com

Abb. 4.1: Dreidimensionales Berechnungsmodell der aktivierten Geschoßdecke; kreuzweise verlegte Bewehrung: hellgrau; Heiz-/Kühlrohr: rot; Schichtaufbau gemäß Tab. 4.1

Als wesentliche Kenngröße zur Charakterisierung der Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke ergibt sich der thermische Leitwert zwischen dem Heizrohr und dem Raum unter der Decke aus der stationären, dreidimensionalen Berechnung zu $L_{r,u}^{3D} = 0,160494$ $[\text{WK}^{-1}]^1$. Auf die Fläche des Berechnungsausschnitts ($0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} = 0,04 \text{ m}^2$) bezogen, ergibt sich somit ein Wert von $4,01$ $[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$ für den auf die thermisch aktivierte Deckenfläche bezogenen thermischen Leitwert. Wird dieser Wert mit der Differenz zwischen der Temperatur der Flüssigkeit im Rohr und der Lufttemperatur des unteren Raums multipliziert, so ergibt sich unmittelbar die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke.

Im Rahmen dieser Detailuntersuchung ist zu klären, ob auf eine detaillierte Modellierung der Bewehrung verzichtet werden kann, ohne die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse wesentlich zu beeinträchtigen. Um diese Frage zu beantworten, wird eine Parameterstudie unter Zugrundelegung des in Abb. 4.2 gezeigten Berechnungsmodells durchgeführt. Dieses Berechnungsmodell entspricht überwiegend jenem der Abb. 4.1. Lediglich die Bewehrung wird entfernt bzw. deren thermischer Einfluss vernachlässigt. Als Parameter dieser Untersuchung tritt die Wärmeleitfähigkeit des Betons auf.

¹ Der hochgestellte Index 3D kennzeichnet Leitwerte, die in dreidimensionaler Berechnung ermittelt wurden.



AnTherm V.7.124 2013.09.23 © T.Kornicki www.kornicki.com

Abb. 4.2: Dreidimensionales Berechnungsmodell der aktivierten Geschoßdecke; Ersatzmodell ohne Bewehrung

Als Ergebnis der Untersuchung sind in folgender Tab. 4.2 die für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Stahlbetons errechneten thermischen Leitwerte $L_{r,u}$ aufgelistet.

$\lambda_{STB} [Wm^{-1}K^{-1}]$	$L_{r,u}^{3D} [WK^{-1}]$	
2,0	0,1577	98,3%
2,1	0,1593	99,3%
2,2	0,1608	100,2%
2,3	0,1621	101,0%
2,5	0,1646	102,6%

Tab. 4.2: Gegenüberstellung der für verschiedene Wärmeleitfähigkeits-Werte des Stahlbetons λ_{STB} berechneten thermischen Leitwerte $L_{r,u}^{3D}$ (Leitwert zwischen Rohr und unterem Raum)

Es zeigt sich klar, dass ein Berechnungsmodell ohne detaillierte Eingabe der Bewehrung die Wärmeabgabeleistung der aktivierten Geschoßdecke sehr genau beschreiben kann. Die in Tab. 4.2 angegebenen Abweichungen vom Referenz-Wert $L_{r,u}^{3D} = 0,1605 \text{ WK}^{-1}$ (100%) sind für den untersuchten Bereich von Wärmeleitfähigkeits-Werten zwischen 2,0 und 2,5 $Wm^{-1}K^{-1}$ erstaunlich gering. Für den Fall einer fiktiven Wärmeleitfähigkeit des bewehrten Stahlbetons von $\lambda_{STB} = 2,2 \text{ Wm}^{-1}K^{-1}$ stellt sich die beste Übereinstimmung mit dem Ergebnis der dreidimensionalen Berechnung mit expliziter Berücksichtigung der Bewehrungsstäbe ein.

Die Welligkeit, d.h. die Differenz zwischen maximaler und minimaler Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht, beträgt bei Annahme einer Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Raumluft von 10,0 K im Fall mit modellierter Bewehrung 0,48 K. Für die thermischen Ersatzmodelle liegt die Welligkeit bei $\lambda_{STB} = 2,0 \text{ Wm}^{-1}K^{-1}$ bei 0,40 K und sinkt mit steigender

Wärmeleitfähigkeit bis auf 0,34 K ($\lambda_{\text{STB}} = 2,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Auch diese Ungenauigkeit bei Verwendung eines thermischen Ersatzmodells liegt somit in akzeptabler Größenordnung.

Conclusio:

- Eine detaillierte Modellierung der Bewehrung erweist sich als **nicht notwendig**.
Anmerkung: Dies ist insofern von Bedeutung, als zum Zeitpunkt der Planung der Bauteilaktivierung noch kein Bewehrungsplan vorliegt. Zudem ist es möglich, von dreidimensionalen auf zweidimensionale Berechnungsmodelle überzugehen und damit die Komplexität der Berechnung erheblich zu reduzieren.
- Für den Stahlbeton wird empfohlen, eine **fiktive Wärmeleitfähigkeit** von $\lambda_{\text{STB}} = 2,2$ [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$] anzusetzen.
- Das verwendete thermische Ersatzmodell führt zu einer geringfügig **kleineren Welligkeit** der Oberflächentemperatur an der Untersicht der Geschoßdecke.

IV.1.2 Stationäre Parameterstudien

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Parameterstudien präsentiert, die den Einfluss baulicher Maßnahmen auf die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke zeigen. Die Berechnungen werden hierbei stationär, also zeitunabhängig durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen somit die Eigenschaften thermisch aktivierter Geschoßdecken für den Fall, dass sowohl die Raumlufttemperaturen als auch die Temperatur der Heiz- bzw. Kühlflüssigkeit keinen Schwankungen unterworfen - und somit konstant - sind. Bei stationären Berechnungen spielt die Wärmespeicherfähigkeit der Geschoßdecke keine Rolle.

Die Erweiterung der Untersuchungen auf instationäre Vorgänge wird in Abschnitt IV.1.3 präsentiert.

IV.1.2.1 Einfluss der Wärmeübergangskoeffizienten

Die für die Berechnungen angesetzten Wärmeübergangskoeffizienten beeinflussen das Berechnungsergebnis erheblich. Der Wärmeübergang von Decken- bzw. Fußbodenoberfläche an den Raum wird zum Großteil durch den Strahlungsaustausch zwischen der Deckenoberfläche und den inneren Oberflächen aller anderen raumbegrenzenden Bauteile sowie dem Mobiliar verursacht. Zudem stellt sich ein Wärmestrom von der Decke zur Raumluft aufgrund konvektiver Vorgänge ein, der aber eine weitaus geringere Rolle spielt.

Der den Strahlungsaustausch beschreibende Teil des Wärmeübergangskoeffizienten hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. So geht bei der Deckenoberfläche sowohl die Temperatur als auch die Emissionszahl für langwellige Strahlung in die Berechnung des Strahlungsaustauschs ein. Diese beiden Größen müssen für alle am Strahlungsaustausch beteiligten Flächen bekannt sein. Überdies geht auch die Lage der Flächen zueinander – und damit die Raumgeometrie – explizit ein.

Der den konvektiven Wärmeaustausch beschreibende Teil des Wärmeübergangskoeffizienten hängt ebenfalls von den Oberflächentemperaturen ab. Zudem geht die Rauigkeit der Oberflächen und wiederum die Raumgeometrie in die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs ein.

Im Rahmen der hier gezeigten Parameterstudien geht es um das thermische Verhalten der thermisch aktivierten Geschoßdecke allein. Angaben zum Raum werden in diesem Schritt der Forschungsarbeit nicht getroffen. Somit ist es auch von vornherein nicht möglich, die Größe der Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen. Um dennoch Aussagen treffen zu können, werden Wärmeübergangskoeffizienten den relevanten Normen entnommen. Die folgende Tab. 4.3 zeigt die für sämtliche Parameterstudien dieses Kapitels angesetzten Wärmeübergangskoeffizienten.

Oberfläche	α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	Quelle
Decke beheizt	6,50	ÖNorm EN 1264-5:2009 (8)
Decke gekühlt	10,80	ÖNorm EN 1264-5:2009
Decke unkonditioniert, Wärmefluss nach unten	5,88	ÖNorm EN ISO 6946:2008 (4)
Decke unkonditioniert, Wärmefluss nach oben	10,00	ÖNorm EN ISO 6946:2008
Fußboden beheizt	10,80	ÖNorm EN 1264-5:2009
Fußboden gekühlt	6,50	ÖNorm EN 1264-5:2009
Boden unkonditioniert, Wärmefluss nach unten	5,88	ÖNorm EN ISO 6946:2008
Boden unkonditioniert, Wärmefluss nach oben	10,00	ÖNorm EN ISO 6946:2008

Tab. 4.3 Für die Parameterstudien verwendete Wärmeübergangskoeffizienten

Bei einer gekühlten Decke wird z. B. gemäß Tab. 4.3 der Wärmeübergangskoeffizient für die Deckenuntersicht auf $10,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ gesetzt. Für die andere Seite der Konstruktion - also den Fußboden des über der Decke liegenden Raums - wird angenommen, dass dieser unkonditioniert ist, der Wärmefluss aber nach unten – in die aktivierte Decke – orientiert ist; der entsprechende Wärmeübergangskoeffizient ist somit auf $5,88 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zu setzen.

Für die Interpretation der Berechnungsergebnisse bedeuten diese Setzungen, dass die berechneten flächenbezogenen thermischen Leitwerte – und damit die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung – für einen realen Raum durchaus anders ausfallen können. Die eigentliche Aussage der Parameterstudien zielt aber auf Vergleiche zwischen verschiedenen baulichen Ausführungen ab und wird durch die Setzung der Wärmeübergangskoeffizienten kaum beeinflusst.

Für die Berechnung des thermischen Verhaltens einer aktivierten Geschoßdecke ist die Vorgabe eines dritten Wärmeübergangskoeffizienten notwendig. Dieser beschreibt den Wärmeübergang vom Heiz- bzw. Kühlmedium auf die Innenseite des Rohrs und ist von der Temperatur des Kühlmediums, von der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr, der Viskosität des Fluids, der Rauigkeit der Rohroberfläche und dem Innendurchmesser des Rohrs abhängig. Da die Mehrzahl dieser Parameter kaum bekannt ist, wird auch dieser Wärmeübergangskoeffizient geschätzt und für alle Berechnungsvarianten konstant gehalten. Um den Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf die berechneten längenbezogenen thermischen Leitwerte zu quantifizieren, wurde der auf die Rohrlänge bezogene thermische Leitwert zwischen Heizrohr und dem unter der Geschoßdecke liegendem Raum für drei verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten berechnet. Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis dieser Vergleichsrechnung.

$\alpha_{\text{Rohr}} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	$L_{r,u}^{2D} [\text{Wm}^{-1}\text{K}^1]$	
400	1,144355	98,5 %
500	1,161401	100,0 %
600	1,185838	102,1 %

Tab. 4.4: Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten im Rohr α_{Rohr} auf den thermischen Leitwert $L_{r,u}^{2D}$ zwischen Rohr und Deckenoberfläche

Es zeigt sich, dass selbst durch eine starke Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten im Rohr der für die Berechnung der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung maßgebliche längenbezogene Leitwert $L_{r,u}^{2D}$ nur wenig verändert wird². Es wird daher bei allen folgenden Parameterstudien der Wärmeübergangskoeffizient im Rohr auf $500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ gesetzt.

IV.1.2.2 Einfluss des Rohrabstands

In einem ersten Schritt wird der Einfluss des Rohrabstands auf die flächenbezogene Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme der thermisch aktivierten Geschoßdecke untersucht. Die Berechnungen erfolgen zweidimensional, stationär unter Zugrundelegung des in Abschnitt IV.1.1 abgeleiteten thermischen Ersatzmodells. Deckenaufbau und Rohreigenschaften entsprechen den in Abschnitt IV.1.1 gemachten Ansätzen.

Als Beispiel für ein Berechnungsmodell zeigt die folgende Abbildung einen Vertikalschnitt durch die thermisch aktivierte Geschoßdecke. Der gezeigte Ausschnitt ist hierbei auf drei Rohre beschränkt.

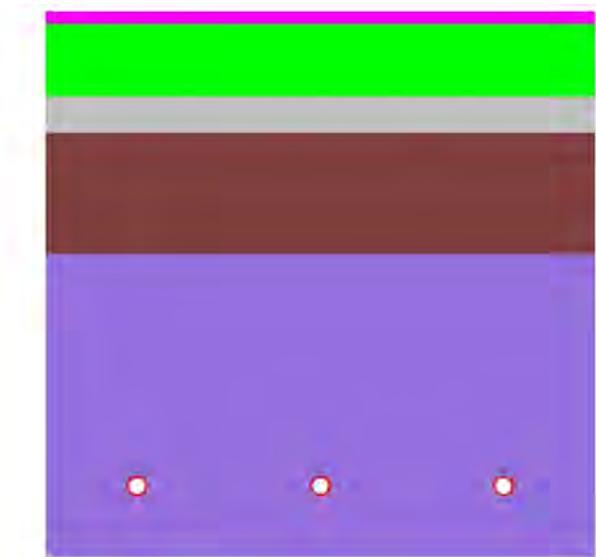
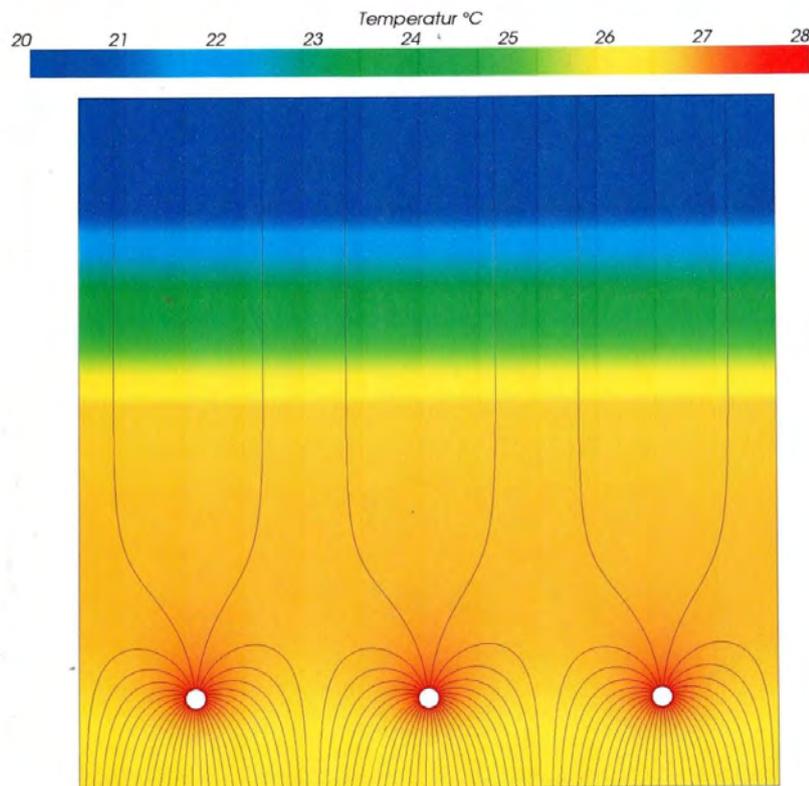


Abb. 4.3: Zweidimensionales Berechnungsmodell; Ausschnitt: 3 Rohre; Deckenaufbau nach Tab. 4.1; Rohre 17 x 2,0; Achsabstand der Rohre: 150 mm; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenuntersicht

Neben den eigentlich interessierenden numerischen Ergebnissen können die Temperaturverteilung in der Decke, aber auch der Wärmefluss durch die Decke visualisiert werden. Als Beispiel

² Der hochgestellte Index 2D kennzeichnet thermische Leitwerte, die in zweidimensionaler Berechnung ermittelt wurden.

zeigt folgende Abbildung für das in Abb. 4.3 gezeigte Berechnungsmodell ein Falschfarbenbild der aktivierten Geschoßdecke mit eingezeichneten Wärmestromlinien im Falle der Beheizung. Die Temperatur des Heizmediums wird hierbei mit konstant 28 °C angesetzt; die Lufttemperatur sowohl im Raum unter als auch im Raum oberhalb der Geschoßdecke ist auf 20 °C konstant gehalten.



AnTherm V.7.125 2013.10.03 © T.Kornicki www.kornicki.com

Abb. 4.4: Darstellung der Temperaturverteilung und des Wärmestroms; **Ausschnitt: 3 Rohre; Heizfall:** Heizmitteltemperatur 28 °C; Raumlufttemperaturen 20 °C; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand der Rohre: 150 mm; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenuntersicht; Wärmestrom zwischen je 2 Stromlinien: 0,2 Wm⁻¹

Die Falschfarbendarstellung zeigt, dass die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht bei ca. 26 °C liegt. Eine genauere Analyse zeigt, dass sie zwischen 25,6 und 25,7 °C schwankt. Die Oberflächentemperatur des Fußbodens im oberhalb der Decke liegenden Raum liegt hingegen bei konstant 20,2 °C.

Die Wärmestromlinien zeigen zum einen den Weg der Wärme durch den Bauteil. Zum anderen geben sie auch quantitativen Aufschluss über die Verteilung des Wärmestroms im gezeigten Vertikalschnitt. Da zwischen jeweils 2 Wärmestromlinien der gleiche Wärmestrom fließt, markiert ein Zusammenrücken der Wärmestromlinien erhöhten Wärmestrom. Aus Abb. 4.4 ist somit unmittelbar zu erkennen, dass der Großteil der Wärme von den Heizrohren zur Deckenuntersicht fließt, während die Heizwirkung der Rohre auf den Fußboden des über der Geschoßdecke liegenden Raums fast vernachlässigbar ist. Aus den numerischen Ergebnissen lässt sich rückrechnen, dass knapp 6% der von den Heizrohren abgegebene Wärmeleistung nach oben, d. h. zum Fußboden des oberhalb der Geschoßdecke liegenden Raums fließt.

Aufgrund von Symmetrieüberlegungen zeigt sich, dass es nicht notwendig ist, mehrere Rohre des Registers zu modellieren, sondern bereits die Modellierung eines Rohres die volle Information enthält. Zur Veranschaulichung zeigt folgende Abbildung diese vereinfachte Situation.

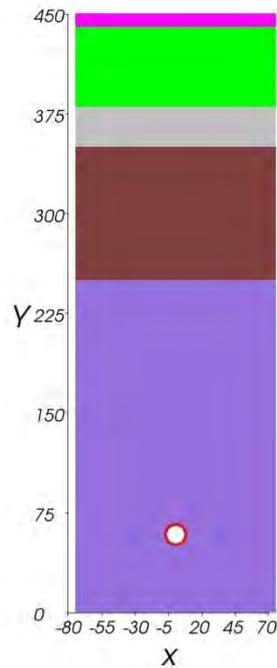
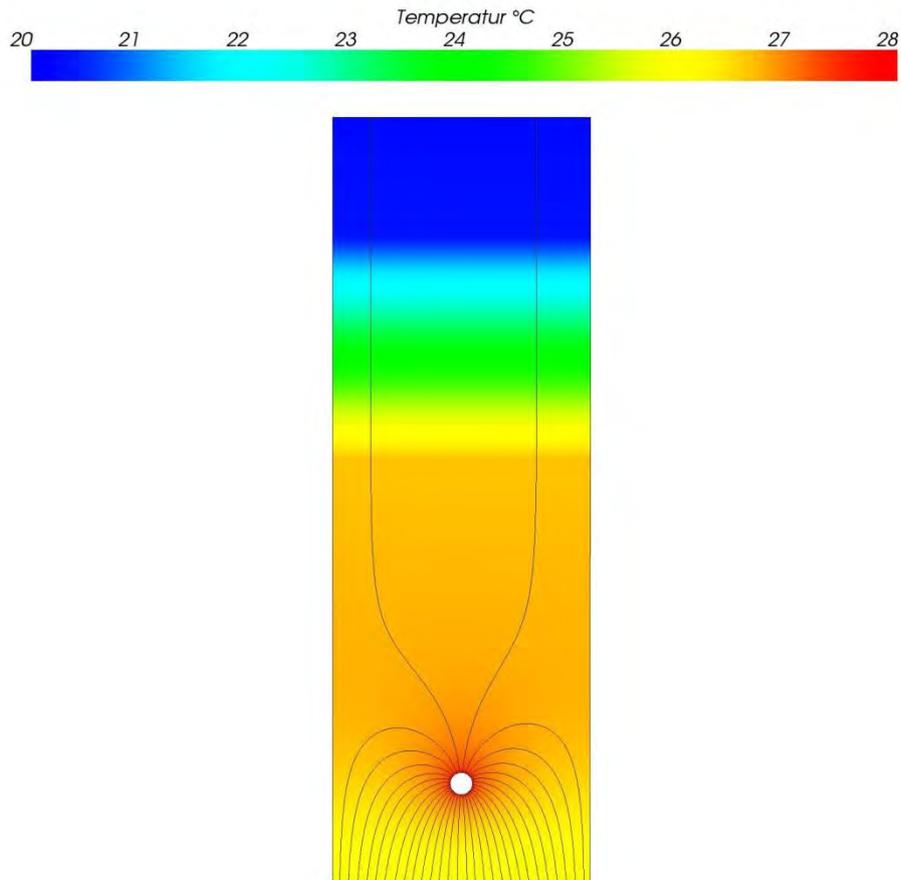


Abb. 4.5: Zweidimensionales Berechnungsmodell; **Ausschnitt: 1 Rohr;** Deckenaufbau nach Tab. 4.1; Rohre 17 x 2,0; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenuntersicht; Breite des Berechnungsausschnitts: 150 mm

Die Breite des in Abb. 4.5 gezeigten Berechnungsausschnitts (150 mm) ist identisch mit dem angenommenen Achsabstand der Rohre des Registers. Die Untersuchung des Einflusses des Rohrabstands auf die Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Geschosdecke läuft somit auf eine mehrfache Berechnung des in Abb. 4.5 gezeigten Modells hinaus, wobei lediglich jeweils die Breite des Berechnungsausschnitts zu ändern ist. Die Temperaturverteilung und das Bild der Wärmestromlinien für das in Abb. 4.5 gezeigte Berechnungsmodell zeigt die folgende Abbildung.



AnTherm V.7.125 2013.10.03 © T.Kornicki www.kornicki.com

Abb. 4.6: Darstellung der Temperaturverteilung und des Wärmestroms; **Heizfall:** Heizmitteltemperatur 28 °C; Raumlufttemperaturen 20 °C ; **Ausschnitt: 1 Rohr;** Rohr 17 x 2,0; Achsabstand der Rohre: 150 mm; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenuntersicht; Wärmestrom zwischen je 2 Stromlinien: 0,2 Wm⁻¹

Als für die Fragestellung relevantes Ergebnis wird der längenbezogene thermische Leitwert³ $L_{r,u}^{2D}$ zwischen Heizmedium und dem unter der Geschoßdecke gelegenen Raum erhalten. Division dieses Werts durch die Breite des Berechnungsausschnitts b - d. h. durch den Achsabstand der Rohre - führt auf den flächenbezogenen Leitwert $\Lambda_{r,u}$. Multiplikation von $\Lambda_{r,u}$ mit der Differenz aus der Heizmitteltemperatur Θ_r und der Lufttemperatur im unteren Raum Θ_u führt unmittelbar auf die gesuchte flächenbezogene Wärmeabgabeleistung q der thermisch aktivierten Decke:

$$q = \frac{L_{r,u}^{2D}}{b} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) = \Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) \quad <4.1>$$

Natürlich gilt Gleichung <4.1> sinngemäß auch für den Kühlfall. Es ist lediglich das Vorzeichen der Temperaturdifferenz zu ändern, um auf einen positiven Wert für die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung zu kommen. Anzumerken ist allerdings, dass $L_{r,u}^{2D}$ und damit auch

³ Zur Kennzeichnung längenbezogener Leitwerte wird der hochgestellte Index 2D verwendet.

$\Lambda_{r,u}$ aufgrund der anders anzusetzenden Wärmeübergangskoeffizienten (siehe Tab. 4.3) für den Heiz- und den Kühlfall deutlich unterschiedliche Werte annehmen.

Der Achsabstand der Rohre – und damit die Breite des Berechnungsausschnitts – wird in der folgenden Parameterstudie von 17 mm bis 500 mm variiert. 17 mm Achsabstand steht hierbei für den theoretischen Fall von dicht an dicht verlegten Rohren. Für den Fall der beheizten Geschoßdecke ist das Ergebnis dieser Parameterstudie in folgender Tabelle dargestellt.

b [m]	$L_{r,u}^{2D}$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\Lambda_{r,u}$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	
0,017	0.092660	5.451	118%
0,050	0.264937	5.299	115%
0,100	0.495549	4.955	108%
0,150	0.691055	4.607	100%
0,200	0.855310	4.277	93%
0,250	0.992718	3.971	86%
0,300	1.107551	3.692	80%
0,400	1.284208	3.211	70%
0,500	1.409069	2.818	61%

Tab. 4.5: Heizfall: Einfluss des Achsabstands der Rohre **b** auf den flächenbezogenen Leitwert $\Lambda_{r,u}$ zwischen Heizrohr und dem unter der Geschoßdecke liegenden Raum

Das entsprechende Ergebnis für die gekühlte Decke zeigt folgende Tabelle.

b [m]	$L_{r,u}^{2D}$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\Lambda_{r,u}$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	
0,017	0.139099	8.182	127%
0,050	0.392699	7.854	122%
0,100	0.713635	7.136	111%
0,150	0.967253	6.448	100%
0,200	1.166276	5.831	90%
0,250	1.322414	5.290	82%
0,300	1.445392	4.818	75%
0,400	1.620663	4.052	63%
0,500	1.733683	3.467	54%

Tab. 4.6: Kühlfall: Einfluss des Achsabstands der Rohre **b** auf den flächenbezogenen Leitwert $\Lambda_{r,u}$ zwischen Kühlrohr und dem unter der Geschoßdecke liegenden Raum

Die in Tab. 4.5 bzw. Tab. 4.6 angegebenen Prozentzahlen beziehen sich auf den üblicherweise verwendeten Achsabstand von 15 cm. Verkleinerung des Achsabstands führt zu einer erhöhten flächenbezogenen Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung. Bei Vergrößerung des Achsabstands sinkt die Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung. Die Zunahme bzw. Reduktion der Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahme ist jedoch vom Rohrabstand nicht linear abhängig, wie die folgende Abbildung zeigt.

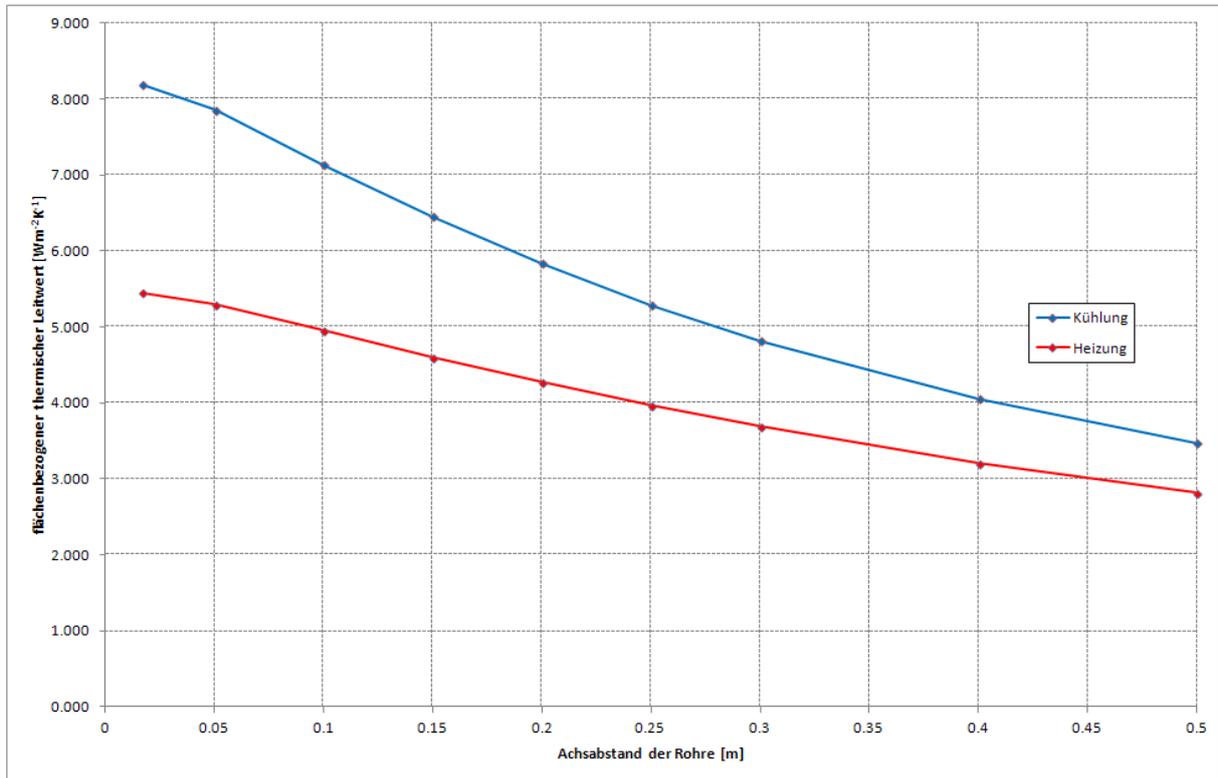


Abb. 4.7: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Achsabstand der Rohre

Die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke im Heizfall erweist sich als etwas weniger stark vom Rohrabstand abhängig als die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung im Fall der Kühlung.

Eine Analyse der in Abb. 4.7 gezeigten Verläufe zeigt, dass die beiden Kurven im Bereich der Achsabstände zwischen 5 cm und 50 cm mit sehr hoher Genauigkeit durch ein Polynom 2. Grades, also eine Funktion der Bauart

$$\Lambda_{r,u} = a \cdot d^2 + b \cdot d + c \quad <4.2>$$

approximiert werden können. d bezeichnet in Gleichung <4.2> den Achsabstand der Rohre in Metern. Bei Kenntnis der Koeffizienten a , b , und c kann damit leicht auf den flächenbezogenen thermischen Leitwert $\Lambda_{r,u}$ für beliebige Achsabstände d (unter der Bedingung $d \geq 0,05$ m) rückgerechnet werden. Die folgende Tabelle zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.7 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
Heizung	4,5267	-8,0363	5,7018
Kühlung	12,2030	-16,4280	8,6439

Tab. 4.7: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>

Die mittlere Oberflächentemperatur $\bar{\Theta}_{s,u}$ der Deckenuntersicht der thermisch aktivierten Geschoßdecke errechnet sich aus dem flächenbezogenen thermischen Leitwert $\Lambda_{r,u}$ und dem an der Deckenuntersicht angesetzten Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{s,u}$ gemäß

$$\bar{\Theta}_{s,u} = \Theta_u + \frac{\Lambda_{r,u}}{\alpha_{s,u}} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) \quad <4.3>$$

Gemäß Tab. 4.3 ist der Wärmeübergangskoeffizient an der Deckenuntersicht im Fall der Beheizung mit $\alpha_{s,u} = 6,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, im Fall der Kühlung mit $10,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ anzusetzen. Gleichung <4.3> erlaubt somit unter Zugriff auf Gleichung <4.2> und die in Tab. 4.7 aufgelisteten Regressionskoeffizienten die Berechnung der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht für beliebige Rohrabstände.

Conclusio:

- Die Erhöhung des Achsabstands der Rohre führt auf eine Verkleinerung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts zwischen Rohrregister und dem unter der Geschoßdecke liegenden Raum. Damit verkleinert sich unter der Annahme gleich gehaltener Rohrtemperatur auch die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke.
- Im interessierenden Bereich von 15 cm Rohrabstand bewirkt eine Veränderung des Rohrabstands um 5 cm im Heizfall eine Änderung der flächenbezogenen Heizleistung um ca. 7,5%. Für den Kühlfall liegt dieser Wert mit ca. 10,5% etwas höher.

IV.1.2.3 Einfluss des Rohrdurchmessers

Die bisherigen Berechnungen wurden für Rohre der Dimension 17 x 2,0⁴ durchgeführt. Es soll nun untersucht werden, in wie weit eine Veränderung der Rohrdimensionen den flächenbezogenen thermischen Leitwert $\Lambda_{r,u}$ - und damit die flächenbezogene Wärmeaufnahme- bzw. Wärmeabgabeleistung – verändert.

Die Berechnung von $\Lambda_{r,u}$ erfolgt daher zusätzlich für die Rohrdimensionen 14 x 1,5 und 20 x 2,0 für alle in Betracht gezogenen Rohrabstände. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist für den Heiz- und den Kühlfall im Folgenden in Abb. 4.8 und Abb. 4.9 dargestellt.

⁴ Gemäß DIN 16893:2000 (31) bezeichnet der erste Wert „17“ den Außendurchmesser des Rohrs in Millimetern, während der zweite Wert „2,0“ die Wanddicke des Rohrs in Millimetern kennzeichnet.

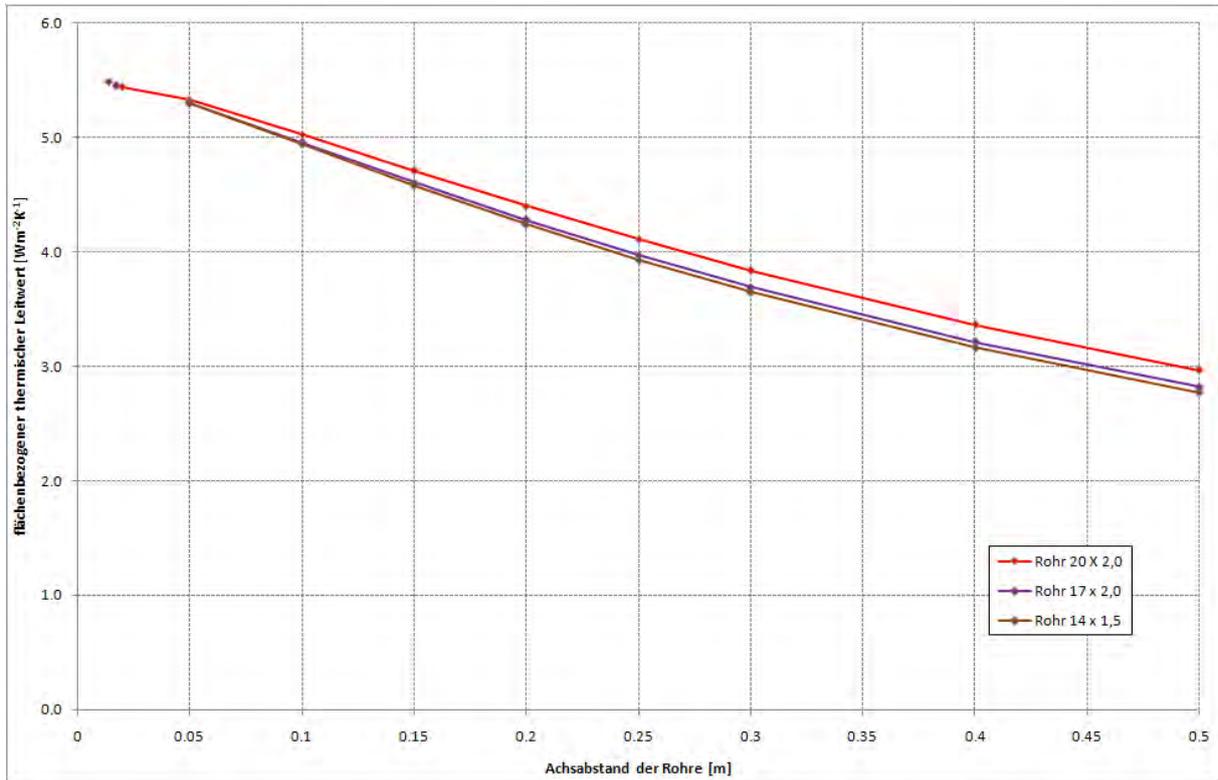


Abb. 4.8: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Achsabstand der Rohre und von der Rohrdimension

Das Ergebnis der Parameterstudie zeigt, dass der Einfluss der Rohrdimension auf den flächenbezogenen thermischen Leitwert – und damit auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der beheizten Geschoßdecke - bei kleinen Rohrabständen gering ist. Die Rohre 17 x 2,0 und 14 x 1,5 erweisen sich auch für größere Rohrabstände in etwa gleichwertig. Ein Wechsel zu einem Rohr der Dimension 20 x 2,0 bewirkt hingegen ein leichtes Ansteigen der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung.

Die folgende Tabelle zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.8 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
14 x 1,5	4,9588	-8,3798	5,7193
17 x 2,0	4,5267	-8,0363	5,7018
20 x 2,0	3,4562	-7,2089	5,7001

Tab. 4.8: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>

Im Fall der gekühlten Geschoßdecke ergibt sich ein ähnliches Bild – siehe die folgende Abbildung.

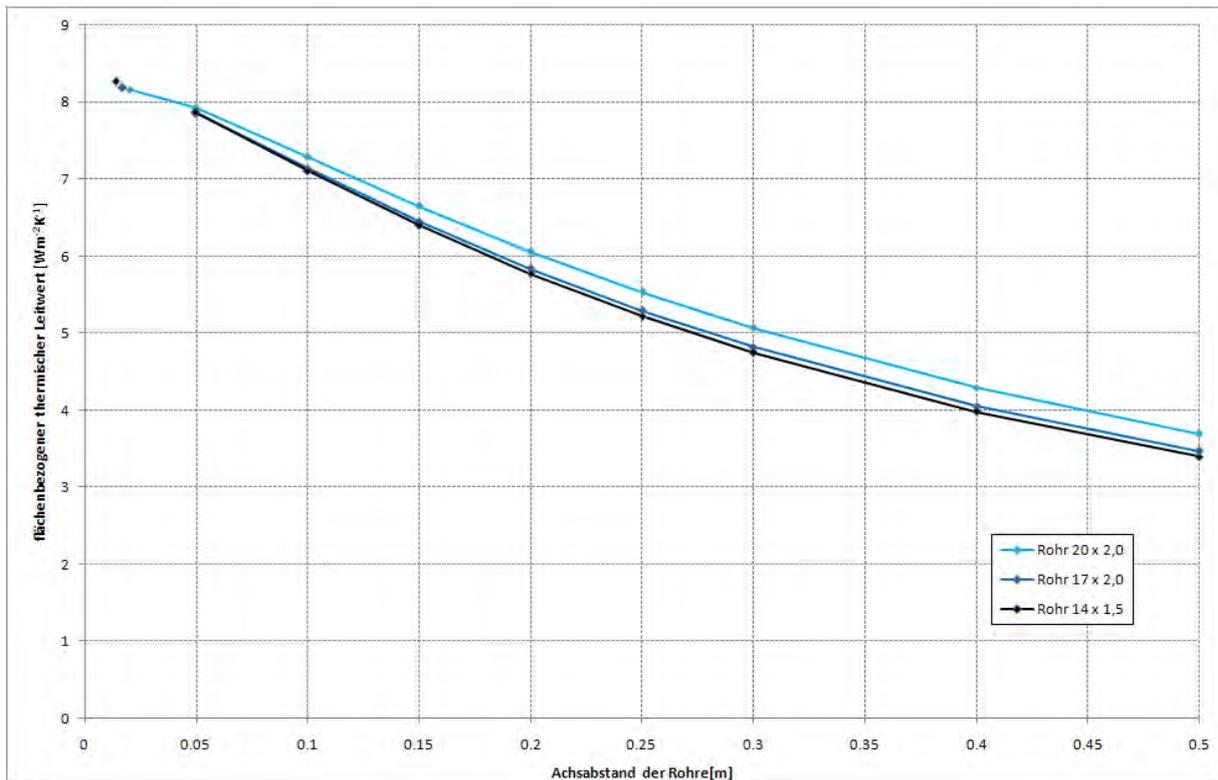


Abb. 4.9: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Achsabstand der Rohre und von der Rohrdimension

Die folgende Tabelle zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.9 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
14 x 1,5	13,077	-17,058	8,6752
17 x 2,0	12,203	-16,428	8,6439
20 x 2,0	10,137	-15,010	8,6622

Tab. 4.9: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>

Conclusio:

- Die Rohre 17 x 2,0 und 14 x 1,5 führen auf fast gleiche flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistungen.
- Die Verwendung des Rohrs 20 x 2,0 vergrößert die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung. Dieser Effekt ist insbesondere bei größeren Rohrabständen spürbar.
- Die Rohrdimension spielt offenkundig in Hinblick auf die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung eine weit kleinere Rolle als der Achsabstand der Rohre.

IV.1.2.4 Einfluss der Lage des Rohrregisters

Bei den bisher durchgeführten Parameterstudien wurde davon ausgegangen, dass der Abstand zwischen Rohrregister und Untersicht der Decke 5,0 cm beträgt. Dieses Maß wird im Folgenden „Überdeckung u “ genannt. Die Definition dieser Abmessung ist in folgendem Ausschnitt des zweidimensionalen Berechnungsmodells gezeigt.

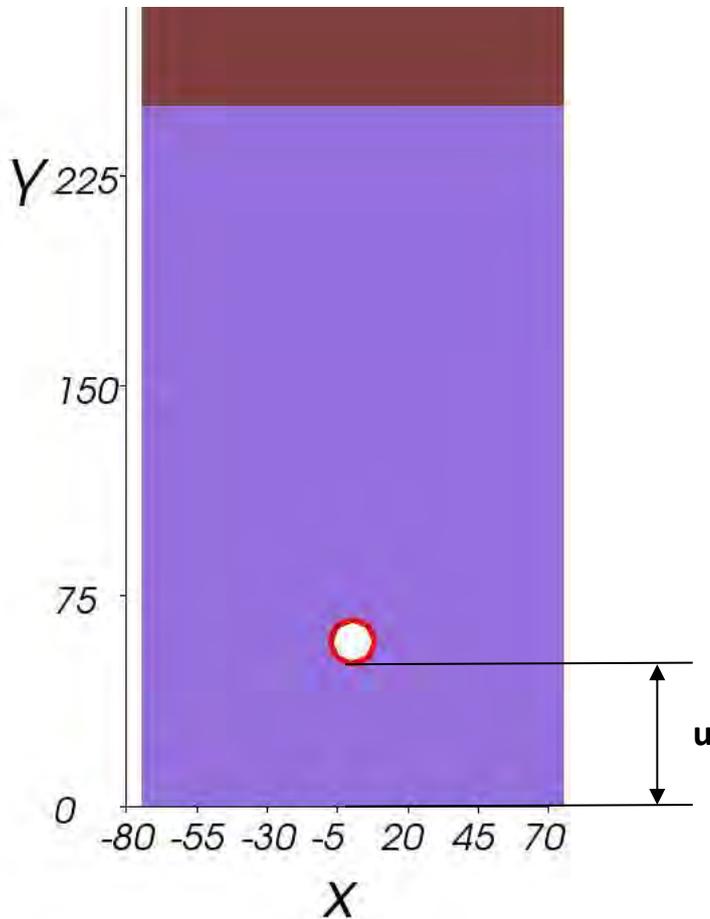


Abb. 4.10: Ausschnitt aus dem Berechnungsmodell: 250 mm dicke Deckenplatte mit Teilen der Dämmschüttung; Rohr 17 x 2,0; Breite des Berechnungsausschnitts (Achsabstand der Rohre): 150 mm; **Überdeckung u :** 50 mm

In folgender Parameterstudie wird untersucht, wie sich die Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke verändert, wenn die Überdeckung vergrößert wird. Hierbei werden die Berechnungen für das Rohr 17 x 2,0 für Überdeckungen von $u = 100$ mm und $u = 150$ mm für alle in Betracht gezogenen Rohrabstände wiederholt. Das Ergebnis dieser Parameterstudien zeigt die folgende Abbildung für den Heizfall.

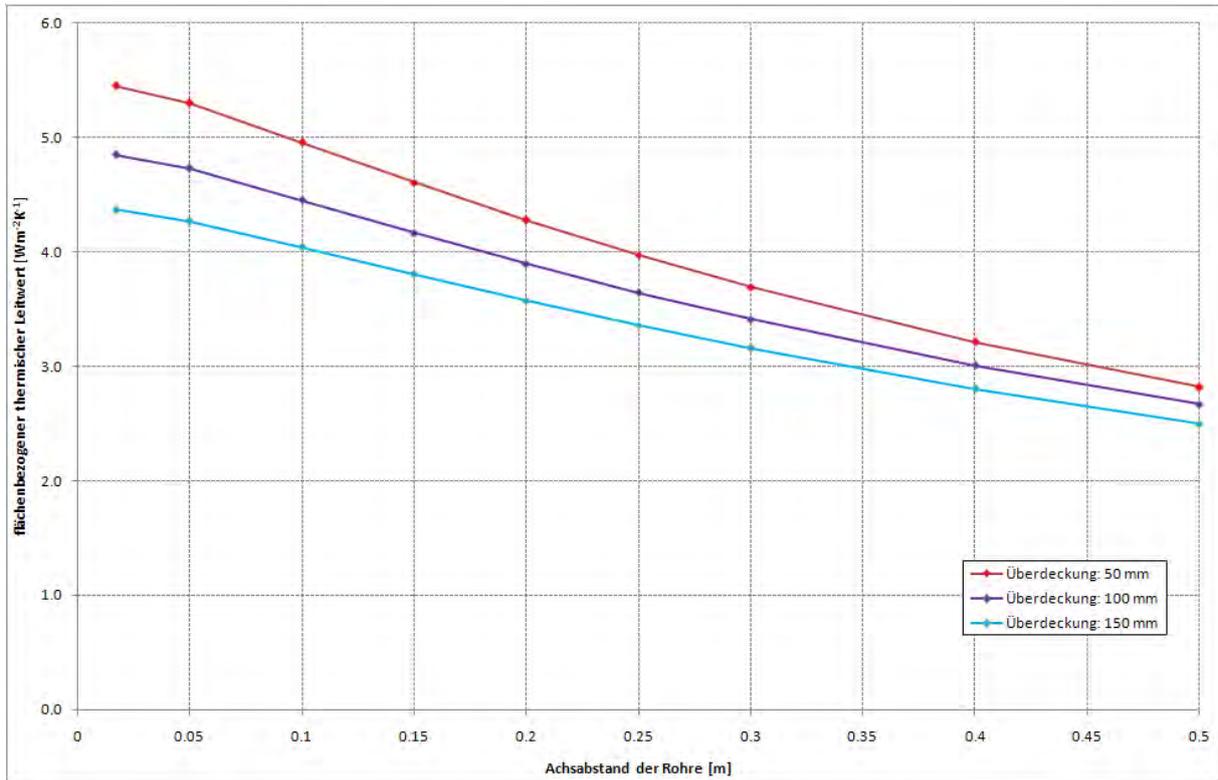


Abb. 4.11: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ von der Lage des Rohrregisters in der Decke

Es zeigt sich deutlich, dass mit steigender Überdeckung der flächenbezogene thermische Leitwert – und damit die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung – der beheizten Geschoßdecke abnimmt. Diese Abnahme der Wärmeabgabeleistung ist bei kleinen Rohrabständen deutlich größer als bei großen Achsabständen der Rohre.

Die folgende Tabelle Tab. 4.10 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.11 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
50	4,5267	-8,0363	5,7018
100	3,3653	-6,4566	5,0526
150	2,4664	-5,3223	4,5380

Tab. 4.10: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Parameterstudie für den Kühlfall.

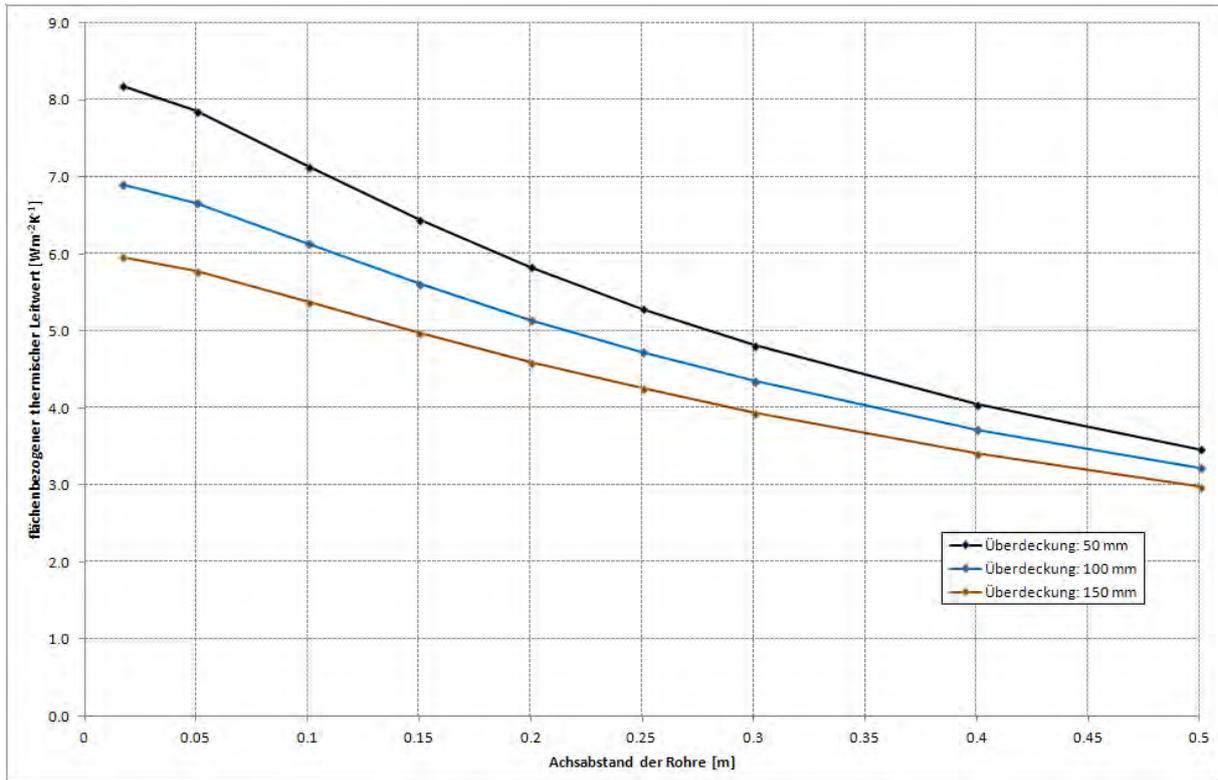


Abb. 4.12: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ von der Lage des Rohrregisters in der Decke

Es zeigt sich ein zum Heizfall qualitativ gleiches Bild. Allerdings ist die Abnahme der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung mit zunehmender Überdeckung im Kühlfall stärker ausgeprägt als im Heizfall.

Die folgende Tab. 4.11 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.12 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
50	12,203	-16,428	8,6439
100	8,2023	-12,137	7,2535
150	5,6589	-9,3629	6,2472

Tab. 4.11: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>

Conclusio:

- Die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung sinkt bei zunehmender Betonüberdeckung des Rohrregisters.
- Dieser Effekt ist bei kleinen Rohrabständen deutlich ausgeprägter als bei großen Achsabständen der Rohre.

IV.1.2.5 Einfluss wärmedämmender Schichten an der Deckenuntersicht

Bisher wurde angenommen, dass die thermisch aktivierte Geschoßdecke an ihrer Unterseite weder verputzt noch mit anderen Schichten niedriger Wärmeleitfähigkeit versehen ist. In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die Aufbringung wärmedämmender Schichten an der Deckenuntersicht auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung (Heizfall) bzw. auf die Wärmeaufnahmeleistung (Kühlfall) der thermisch aktivierten Decke hat. Als für die Baupraxis wesentliche Fälle werden zum einen in diesem Zusammenhang die Verspachtelung der Deckenuntersicht mit einem Innenputz und zum anderen eine Verkleidung der Deckenuntersicht mittels einer Gipskartonplatte angenommen.

Um den Einfluss der Verspachtelung der Deckenuntersicht auf die Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung zu untersuchen, wird der in Tab. 4.1 gezeigte Schichtaufbau durch eine 10 mm dicke Schicht aus Innenputz erweitert. Für die Wärmeleitfähigkeit der Spachtelmasse werden aus der Tabelle 17 der ÖNorm B8110-7:2013 (7) die Werte unter der Rubrik „Normalmörtel“ angesetzt. Um die Auswirkung unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten des Putzes auf die Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke zeigen zu können, wird die zur niedrigsten Massendichte von 1300 kgm^{-3} angegebene Wärmeleitfähigkeit von $0,49 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ der Wärmeleitfähigkeit des schwersten Putzes (Massendichte 1800 kgm^{-3}) mit $1,05 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gegenüber gestellt.

Im Fall der Deckenverkleidung wird angenommen, dass die Deckenuntersicht mit einer 12,5 mm dicken Gipskartonplatte abgedeckt wird. Die Befestigung dieser Verkleidung erfolgt auf einer Lattung, deren Dicke mit 25 mm angesetzt wird. Vereinfachend wird die Schicht zwischen der Unterseite der Stahlbetondecke und der Oberseite der Gipskartonplatte als 25 mm dicke, stehende Luftschicht modelliert.

Die Untersuchung wird für ein Register von Rohren mit 17 mm Außendurchmesser und mit einer Betonüberdeckung von 50 mm (siehe Abb. 4.10) durchgeführt; der Rohrabstand wird wiederum als Parameter der Untersuchung variiert.

In den folgenden beiden Abbildungen werden die flächenbezogenen thermischen Leitwerte zwischen Rohrregister und Raum unterhalb der Geschoßdecke $\Lambda_{r,u}$ der verputzten Decke jenen der unverputzten und jenen der verkleideten Decke gegenüber gestellt.

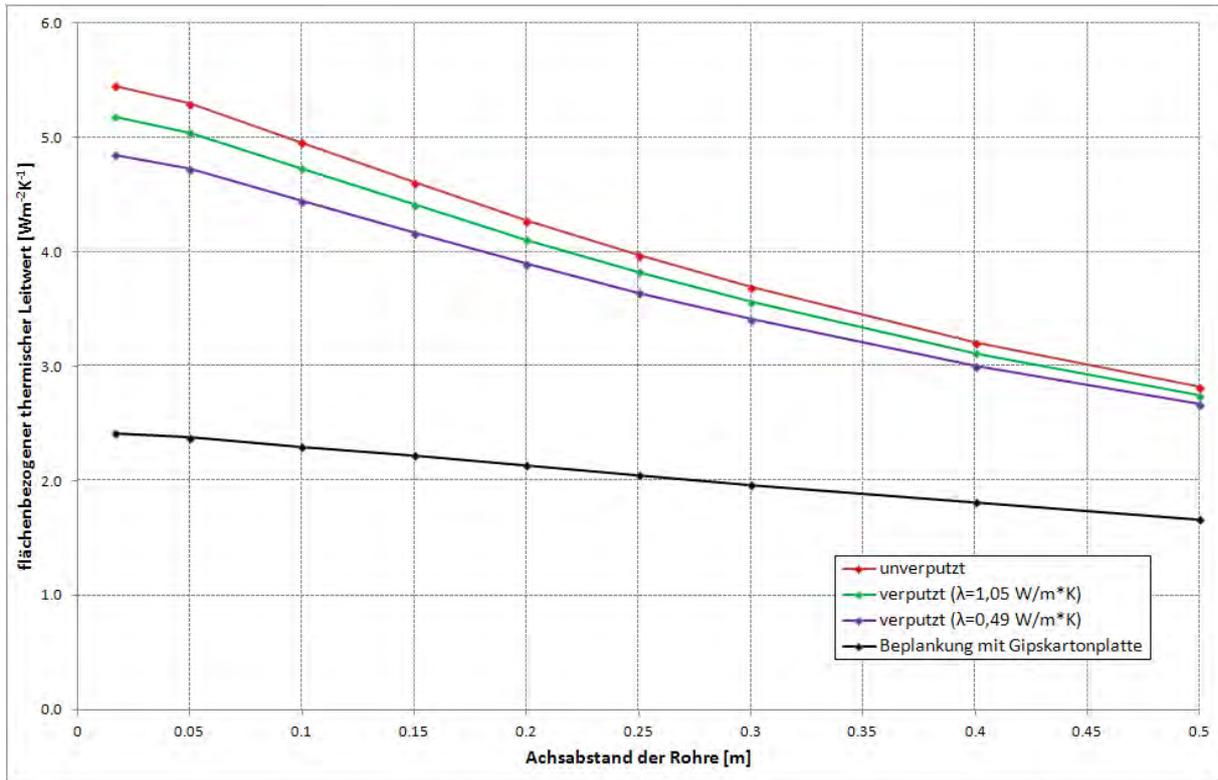


Abb. 4.13: Heizfall: Vergleich der flächenbezogenen thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ zwischen unverputzter, verputzter und verkleideter Geschoßdecke

Die folgende Tab. 4.12 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.13 dargestellten Verläufe.

	a [$Wm^{-4}K^{-1}$]	b [$Wm^{-3}K^{-1}$]	c [$Wm^{-2}K^{-1}$]
unverputzt	4,8608	-8,2603	5,7340
verputzt ($\lambda_{\text{Putz}} = 1,05 Wm^{-1}K^{-1}$)	3,9601	-7,3183	5,4117
verputzt ($\lambda_{\text{Putz}} = 0,49 Wm^{-1}K^{-1}$)	3,4070	-6,6280	5,1157
Beplankung mit Gipskartonplatte	0,2858	-1.7571	2,4681

Tab. 4.12: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Parameterstudie für den Kühlfall.

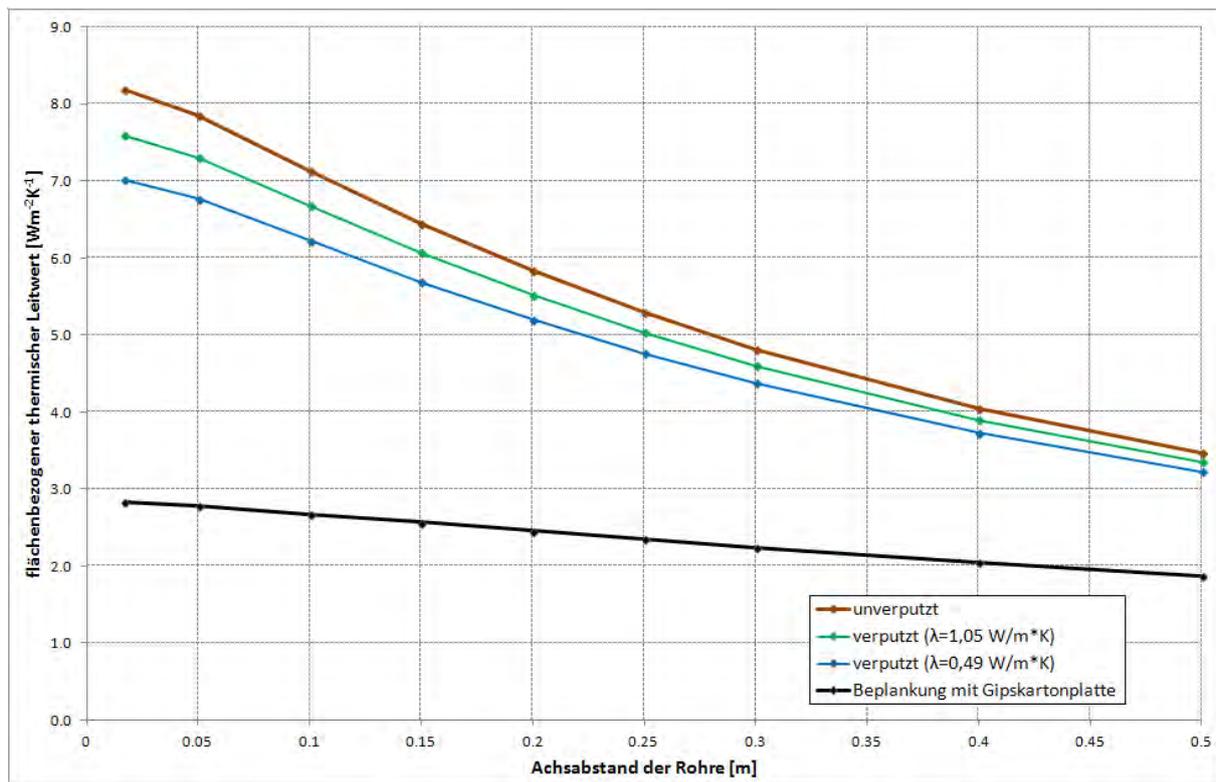


Abb. 4.14: Kühlfall: Vergleich der flächenbezogenen thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ zwischen unverputzter, verputzter und verkleideter Geschoßdecke

Die folgende Tab. 4.13 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.14 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
unverputzt	12,2030	-16,4280	8,6439
verputzt ($\lambda_{\text{Putz}} = 1,05 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	10,2620	-14,4140	8,0048
verputzt ($\lambda_{\text{Putz}} = 0,49 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	8,5111	-12,5650	7,3815
Beplankung mit Gipskartonplatte	0,5685	-2,3684	2,9052

Tab. 4.13: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>

Sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlfall zeigt sich, dass zum einen selbst die durch die Aufbringung der 10 mm dicken Putzschicht bewirkte Reduktion des flächenbezogenen thermischen Leitwerts – und damit der flächenbezogenen Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung – nicht vernachlässigbar ist. Zum anderen bewirkt die Verkleidung eine drastische Abnahme der flächenbezogenen Wärmeabgabe- und auch Wärmeaufnahmeleistung.

Die Auswirkung der wärmedämmenden Schicht auf den flächenbezogenen thermischen Leitwert ist für kleine Rohrabstände deutlich größer als für große. Im Fall der Heizung wird bei Verwendung eines leichten Putzmaterials ($\lambda = 0,49 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung durch die Putzschicht bei 5 cm Rohrabstand um 10% reduziert. Im Fall der Verkleidung mit der Gipskartonplatte führt die entsprechende Reduktion von 55% auf mehr als eine Halbierung der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung. Bei 50 cm Rohrabstand reduziert

sich die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung im Fall des leichten Putzes hingegen nur um 6%. Die entsprechende Reduktion bei der Deckenverkleidung fällt mit 41% ebenso etwas weniger ausgeprägt aus.

Im Fall der Kühlung ist der gezeigte Effekt noch deutlicher spürbar. Beim Verputzen der Deckenuntersicht mit Leichtputz steht einer 14%igen Reduktion bei 5 cm Rohrabstand eine 7%ige Reduktion bei 50 cm Rohrabstand gegenüber. Die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung reduziert sich im Fall der Deckenverkleidung bei einem Rohrabstand von 5 cm um 64%. Bei einem Rohrabstand von 50 cm ist diese Reduktion mit 46% weit kleiner, jedoch noch immer sehr stark ausgeprägt.

Es zeigt sich somit, dass im Fall des Verputzens der Deckenuntersicht selbst die Wahl des Putzmaterials in Hinblick auf dessen Wärmeleitfähigkeit die Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme deutlich beeinflusst.

Eine Verkleidung der Deckenuntersicht führt zu einer Abnahme der flächenbezogenen Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme, die in etwa auf eine Halbierung hinausläuft. Die Konditionierung mittels thermisch aktivierten Decken, die durch Gipskartonplatten verkleidet sind, wird somit nur dann sinnvoll sein, wenn die zur Verfügung stehende beheizte Fläche sehr groß ist und/oder die erforderliche Heiz- bzw. Kühlleistung aufgrund einer sehr hohen thermischen Qualität der Gebäudehülle klein ist. Dies gilt sinngemäß sicherlich auch für den Fall von abgehängten Decken.

Conclusio:

- Im Fall der Aufbringung einer Putzschicht an der Deckenuntersicht sinkt die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung des Rohrregisters.
- Eine Beplankung der Deckenuntersicht mit einer Gipskartonplatte reduziert sowohl die Wärmeabgabe- als auch die Wärmeaufnahmeleistung der Decke massiv.
- Die Reduktion der flächenbezogenen Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung ist bei kleinen Rohrabständen ausgeprägter als bei großen.
- Im Fall hoher erforderlicher flächenbezogener Wärmeabgabe- und/oder Wärmeaufnahmeleistungen ergibt sich hieraus die Planungsempfehlung, die Deckenuntersicht entweder unverputzt zu belassen oder die Schichtdicke des Verputzes so klein als möglich und die Wärmeleitfähigkeit des Putzes so groß als möglich zu wählen. Von einer Deckenverkleidung wird in solch' einem Fall dringend abgeraten.

IV.1.2.6 Obergrenze der Heizmitteltemperatur

Bei der Beladung einer thermisch aktivierten Decke darf die Temperatur des Heizmittels eine Obergrenze nicht überschreiten, um zu hohe Temperaturen an der Deckenuntersicht auszuschließen. Diese Obergrenze kann nicht unmittelbar angegeben werden, da sie sicherlich sowohl von der Betonüberdeckung des Rohrregisters als auch vom Rohrabstand abhängt.

Hier soll vorerst die Berechnung der maximal zulässigen Heizmitteltemperatur für den stationären Fall – d. h. für den Fall einer permanent mit konstantem Durchfluss betriebenen Umwälzpumpe und konstanter Temperatur der Flüssigkeit im Rohr – behandelt werden.

Wie bereits in Abschnitt IV.1.2.2 betont, tritt der flächenbezogene Leitwert zwischen dem Rohrregister und dem unter der Decke liegenden Raum $\Lambda_{r,u}$ als wichtiges Charakteristikum einer thermisch aktivierten Decke auf. Auch für die Beantwortung der hier anstehenden Frage

spielt diese Größe eine zentrale Rolle. Eine einfache Umformung der Gleichung <4.1> führt auf folgende Beziehung für die „Rohrtemperatur“ Θ_r :

$$\Theta_r = \Theta_u + \frac{q}{\Lambda_{r,u}} \quad . \quad <4.4>$$

Wie bereits besprochen, ist Θ_r ein Ansatz für die Temperatur des im Inneren der Rohre zirkulierenden Heizmittels und kann als arithmetisches Mittel zwischen Vorlauf- und Rücklaufemperatur angenähert werden.

Θ_u in Gleichung <4.4> ist die Lufttemperatur im zu beheizenden Raum und entspricht in guter Näherung der für diesen Raum angesetzten Solltemperatur. Im hier betrachteten stationären Fall sind sowohl Θ_r als auch Θ_u zeitunabhängige Größen.

Wird nun angenommen, dass die Wärmeabgabe der Deckenuntersicht ortsunabhängig ist, so kann die Wärmestromdichte q als Mittelwert über die gesamte thermisch aktivierte Deckenfläche angesehen werden. Wie in Abschnitt IV.1.1 gezeigt, ist diesem Mittelwert eine gering ausgeprägte „Welligkeit“ überlagert. Direkt unter den Registerrohren ist die Oberflächentemperatur – und damit die Wärmestromdichte – etwas höher als zwischen jeweils 2 Rohren des Registers. Diese Welligkeit ist wenig ausgeprägt und beeinflusst das Strahlungsfeld im Raum nur unwesentlich. Der Bezug auf die mittlere Deckentemperatur erweist sich somit als brauchbarer und sinnvoller Ansatz.

Die mittlere Wärmestromdichte q an der Deckenuntersicht errechnet sich gemäß

$$q = \alpha_{su} \cdot (\bar{\Theta}_s - \Theta_u) \quad . \quad <4.5>$$

α_{su} ist der Wärmeübergangskoeffizient für die Deckenuntersicht und $\bar{\Theta}_s$ die mittlere Temperatur der Deckenuntersicht. Gemäß ÖNorm EN 1264-5:2009 (8) ist der Wärmeübergangskoeffizient für eine beheizte Decke mit $\alpha_{su} = 6,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ anzusetzen.

Wird Gleichung <4.5> in Gleichung <4.4> eingesetzt, so ergibt sich

$$\Theta_r = \Theta_u + \Delta\Theta = \Theta_u + \frac{\alpha_{su}}{\Lambda_{r,u}} \cdot (\bar{\Theta}_s - \Theta_u) \quad . \quad <4.6>$$

Die maximal zulässige Heizmitteltemperatur liegt somit um den Betrag $\Delta\Theta$ höher als die Solltemperatur Θ_u des zu beheizenden Raums.

Wird die Forderung aufgestellt, dass die Differenz zwischen mittlerer Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der Lufttemperatur im beheizten Raum ($\bar{\Theta}_s - \Theta_u$) nicht größer als 4,0 K sein darf (siehe (2)), so ergibt sich für die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta_{\max}$ folgender, einfacher Zusammenhang:

$$\Delta\Theta_{\max} = \frac{6,5 \cdot 4}{\Lambda_{r,u}} = \frac{26,0}{\Lambda_{r,u}} \quad . \quad <4.7>$$

Wie gezeigt, ist der flächenbezogene thermische Leitwert $\Lambda_{r,u}$ abhängig von der Lage des Rohrregisters in der Stahlbetondecke bzw. der „Betonüberdeckung“ und von dem Achsabstand der Rohre. Natürlich besteht auch eine Abhängigkeit vom Schichtaufbau der thermisch aktivierten Decke.

Für die Geschoßdecke, deren Aufbau in Tab. 4.1 dokumentiert ist, wurden die thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ für verschiedene Rohrabstände berechnet und eine analytische Näherung für die Abhängigkeit vom Rohrabstand entwickelt. Unter Anwendung dieser Erkenntnisse kann die in stationärer Näherung ermittelte Abhängigkeit der Obergrenze für die Heizmitteltemperatur vom Rohrabstand mittels Anwendung von Gleichung <4.7> leicht errechnet werden. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis dieser rechnerischen Abschätzung für Betonüberdeckungen von 5, 10 und 15 cm.

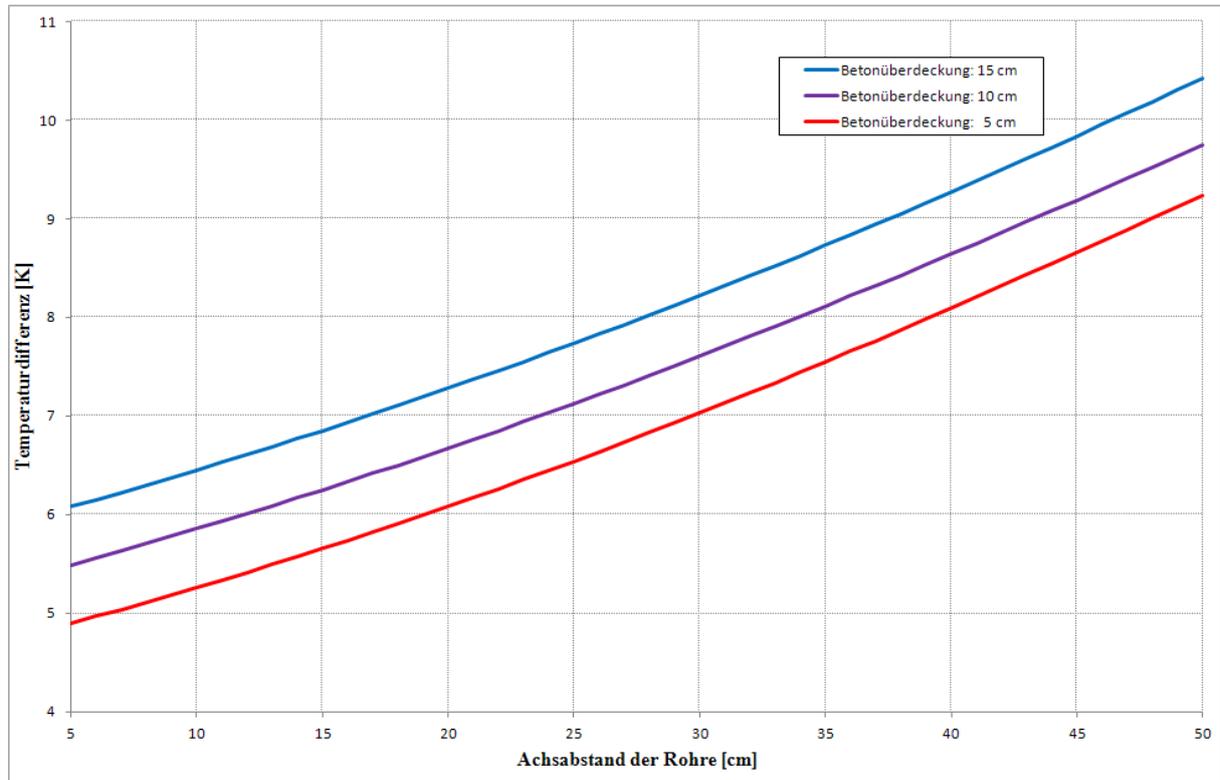


Abb. 4.15: Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta_{\max}$ gemäß Gleichung <4.7> vom Rohrabstand und der Betonüberdeckung

Ersichtlich besteht eine deutliche Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der maximal zulässigen Temperatur im Rohr und der Lufttemperatur im beheizten Raum $\Delta\Theta_{\max} = (\Theta_{r,\max} - \Theta_u)$ vom Achsabstand der Rohre. Mit größer werdendem Achsabstand der Rohre wird $\Delta\Theta_{\max}$ - und damit die Obergrenze für die Temperatur des Heizmittels im Rohr bei gegebener Solltemperatur im Raum - größer. Die drei in Abb. 4.15 gezeigten Verläufe erscheinen auf den ersten Blick parallel verschoben. Obzwar dies nicht genau der Fall ist, kann in guter Näherung gesagt werden, dass $\Delta\Theta_{\max}$ bei Erhöhung der Betonüberdeckung um 5 cm um ca. 0,5 K größer wird.

Anmerkung: Die Temperatur im Rohr Θ_r ist mit der gesuchten Heizmitteltemperatur Θ_h insofern nicht identisch als sich Θ_r erst durch die Bildung der Wärmebilanz über das Rohrrinnere ergibt. Auf der einen Seite wird diesem Volumen Wasser mit der Temperatur Θ_h zugeführt. Auf der anderen Seite fließt Wärme über die Deckenkonstruktion sowohl nach unten als auch nach oben ab. Der Zusammenhang zwischen der Heizmitteltemperatur und der Temperatur im Rohr ist durch folgende Beziehung gegeben.

$$\Theta_h = \Theta_r + \frac{\Lambda_{r,u}}{c_w \cdot \rho_w \cdot \dot{V}} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) + \frac{\Lambda_{r,o}}{c_w \cdot \rho_w \cdot \dot{V}} \cdot (\Theta_r - \Theta_o) \quad . \quad <4.8>$$

Die Heizmitteltemperatur Θ_h ist somit immer größer als die Temperatur im Rohr Θ_r . Da die volumenbezogene Wärmekapazität von Wasser $c_w \cdot \rho_w$ mit ca. $1140 \text{ Whm}^{-3}\text{K}^{-1}$ (siehe Gleichung <3.9>) sehr groß ist, fällt die Differenz zwischen Θ_h und Θ_r eher klein aus und ist abhängig vom Volumendurchsatz des Heizmittels \dot{V} . Bei dem im Folgenden eher klein angesetzten Massendurchsatz von 24 kg h^{-1} ergibt sich $\dot{V} = 0,024 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, was einem Wasserwert von $c_w \cdot \rho_w \cdot \dot{V} = 27,7 \text{ WK}^{-1}$ entspricht. Bei 5 cm Betonüberdeckung stellt sich damit eine Differenz zwischen Heizmitteltemperatur und Rohrtemperatur von $\Theta_h - \Theta_r = 1,0 \text{ K}$ ein. Bei Massendurchsätzen von 120 kg h^{-1} , wie sie bei der Bauteilaktivierung anzutreffen sind, reduziert sich diese Differenz auf ca. $0,2 \text{ K}$. Somit kann für überschlägige Abschätzungen die Temperatur im Rohr mit der Heizmitteltemperatur gleichgesetzt werden.

Conclusio:

- Für den stationären Fall – also im Fall der permanent durchlaufenden Umwälzpumpe und konstanter Heizmitteltemperatur – liegt die maximal zulässige Heizmitteltemperatur bei sehr engen Rohrabständen (5 bis 10 cm Achsabstand) um ca. 5 bis 6 K über der Solltemperatur des beheizten Raums.
- Bei deutlich vergrößertem Achsabstand (45 bis 50 cm) liegt diese zulässige Temperatur des Heizmittels bei ca. 9 bis 10 K über der Solltemperatur des beheizten Raums.
- Die Betonüberdeckung – also die Lage des Registers in der Stahlbetondecke – wirkt sich bei stationären Verhältnissen vergleichsweise wenig auf die maximal zulässige Heizmitteltemperatur aus. Grob gesagt führt eine Vergrößerung der Betonüberdeckung von 5 cm auf eine Erhöhung der maximal zulässigen Heizmitteltemperatur von ca. $0,5 \text{ K}$.
- Die errechneten maximal zulässigen Heizmitteltemperaturen zeigen, dass die thermische Aktivierung von Betondecken Heizmitteltemperaturen erfordern, die im Niedrigtemperaturbereich angesiedelt sind.

IV.1.3 Instationäre Parameterstudien

Bisher wurden in diesem Kapitel ausschließlich Ergebnisse von Berechnungen präsentiert, die stationär, also zeitunabhängig durchgeführt wurden. Dies bedeutet nicht nur, dass die Temperaturen unter- und oberhalb der Decke konstant angesetzt sind, sondern auch, dass die Temperatur der im Rohrregister zirkulierenden Flüssigkeit auf einem konstanten Wert gehalten wird. Gemäß dem in Abschnitt III.2.1 über die Konvektion Gesagten darf zudem auch der Massenstrom der Flüssigkeit keinen zeitlichen Schwankungen unterworfen sein. In Hinblick auf die Betriebsweise der Umwälzpumpe bedeutet dies, dass diese ohne Unterbrechung mit konstanter Drehzahl läuft.

Wie in Abschnitt III.3 angesprochen, kommen Effekte der Wärmespeicherfähigkeit erst bei instationären Berechnungen zum Tragen. Da Stahlbetondecken eine sehr hohe Wärmespeicherfähigkeit aufweisen, ist es klar, dass eine umfassende Beschreibung des thermischen Verhaltens

von thermisch aktivierten Decken den Übergang auf instationäre Berechnungsmodelle umfassen muss.

Im Fall einer instationären Berechnung können grundsätzlich alle genannten Randbedingungen zeitabhängig angesetzt werden. Anstelle der konstanten Werte für die Temperaturen und den Massenstrom treten in diesem Fall Zeitverläufe auf, die im Normalfall mittels Angabe von Stundenwerten fixiert werden. In der überwiegenden Zahl der hier untersuchten Fälle wird den Berechnungen die Tagesperiode zugrunde gelegt, womit sich die Definitionen der zeitlichen Änderungen der Randbedingungen auf die Angabe von Tagesverläufen reduzieren.

Die zur Beantwortung gestellter Fragen erforderliche Analyse von Berechnungsergebnissen wird nur dann einfach möglich sein, wenn nur eine der Randbedingungen zeitabhängig angesetzt wird, alle anderen jedoch konstant gehalten werden. Nahe liegend ist es, die Lufttemperaturen unter- und oberhalb der untersuchten thermisch aktivierten Decke konstant anzusetzen. Dies bedeutet, dass die Solltemperaturen gehalten und etwaige Abweichungen von diesen Temperaturen vernachlässigt werden. Zudem soll auch die Temperatur der im Rohrregister zirkulierenden Flüssigkeit vereinfachend mit einem zeitunabhängigen Wert angesetzt werden. Der instationäre Berechnungsansatz geht in diesem Fall allein durch die Zeitabhängigkeit beim Betrieb der Umwälzpumpe ein. Auch hier hilft in Hinblick auf die Interpretierbarkeit der Berechnungsergebnisse, wenn nur zwischen ein- und ausgeschaltetem Betriebszustand der Umwälzpumpe unterschieden wird. Die Länge des Zeitintervalls, in dem die Umwälzpumpe läuft, soll im Folgenden als „Beladungszeit“ bezeichnet werden.

In folgender Abbildung ist das Modell für die instationären Berechnungen mit ihren Randbedingungen skizziert.

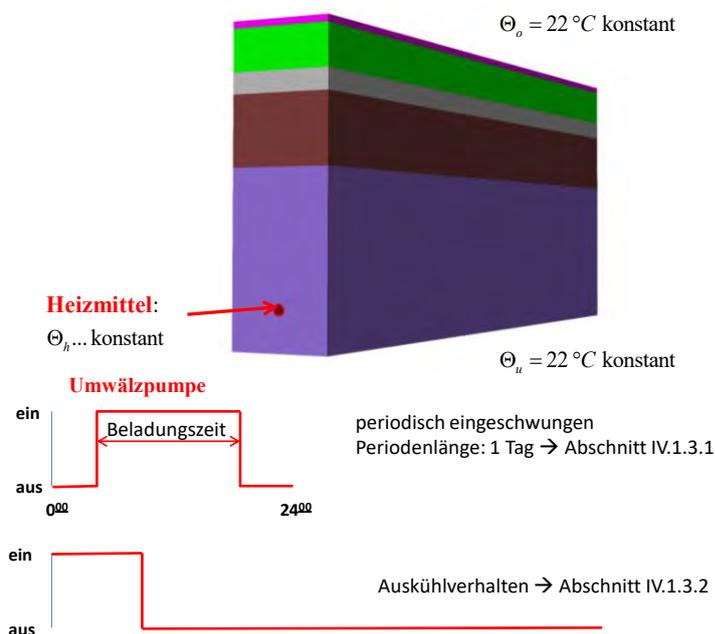


Abb. 4.16: Skizze von Modell und Randbedingungen für die instationären Berechnungen

Im folgenden Abschnitt IV.1.3.1 werden die Schwankungen periodisch mit der Tagesperiode angesetzt. Wie in Abschnitt III.3 angesprochen, hat dieser Ansatz zum einen den Vorteil, dass die Berechnungsergebnisse im Vergleich zu nicht periodischen Berechnungen sehr genau sind. Zum anderen sind die Berechnungsergebnisse sehr leicht zu interpretieren. Die theoretischen Grundlagen des periodisch eingeschwungenen Berechnungsansatzes sind in (9) dokumentiert.

Die Frage der Abkühl- oder Aufheizdauer einer thermisch aktivierten Decke wird unter Beibehaltung des Ansatzes der zeitlichen Periodizität beantwortet, wobei die Periodenlänge auf eine Woche vergrößert wird – siehe Abschnitt IV.1.3.2.

IV.1.3.1 Variation der Beladungszeit

Die folgenden Untersuchungen werden für den periodisch eingeschwungenen Zustand mit der Periodenlänge von einem Tag durchgeführt. Der Skizze von Abb. 4.16 entsprechend wird nur zwischen eingeschalteter und ausgeschalteter Umwälzpumpe unterschieden und alle anderen Randbedingungen zeitunabhängig angesetzt. Die Laufzeit der Umwälzpumpe - d. h. die „Beladungszeit“ - geht als Parameter in die Untersuchungen ein, wobei der periodisch eingeschwungene Zustand impliziert, dass die Betriebsweise der Umwälzpumpe sich Tag für Tag ungeändert wiederholt.

Für die Planungspraxis der Bauteilaktivierung sind diese Simulationsläufe insofern von großem Interesse, als prognostiziert werden kann, in welchem Ausmaß eine thermisch aktivierte Decke als Speicher für nur sporadisch anfallende Wärmemengen geeignet ist. Ein typisches Beispiel für eine solche Situation ist der Betrieb einer Wärmepumpe, der

- nur nachts (z. B. unter Ausnutzung des billigeren Nachtstroms),
- nur zu Zeiten von Stromüberschuss (z. B. aufgrund der Nutzung von Windstrom) oder
- nur tagsüber unter Ausnutzung des Stroms aus einer Photovoltaikanlage erfolgt.

Natürlich besteht eine ähnliche Situation, wenn die von einer thermischen Solaranlage gelieferte Wärme zur Beladung des Rohrregisters in der aktivierten Decke genutzt werden soll.

Vereinfachend wird angenommen, dass der Massenstrom des Heiz- bzw. Kühlmittels während der Betriebszeit der Umwälzpumpe gehalten wird. Im Fall, dass die Rohre des Rohrregisters die Dimension 17 x 2,0 haben und die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids im Rohr während des Betriebs konstant $0,5 \text{ ms}^{-1}$ beträgt⁵, ergibt sich der Massenstrom in einem Rohr zu ca. 240 kg h^{-1} .

Auch die Heiz- bzw. Kühlmitteltemperatur während der Betriebszeit der Pumpe wird im Rahmen dieser Untersuchungen konstant gehalten. Diese Temperatur wird allerdings nicht von vornherein festgesetzt, sondern ergibt sich aus der Randbedingung, dass im Heizfall eine Obergrenze der Temperatur an der Deckenuntersicht nicht überschritten werden darf. Entsprechend wird im Kühlfall eine Untergrenze der Oberflächentemperatur für die Deckenuntersicht gesetzt.

Im Fall der Beheizung der thermisch aktivierten Decke wird vorgegeben, dass die Oberflächentemperatur einen Maximalwert von 26 °C im Tagesverlauf nicht überschreiten darf. Es wird dabei angenommen, dass die Lufttemperatur im beheizten Raum auf 22 °C gehalten wird.

Die Länge der Beladungszeit wird in drei Schritten variiert: 16, 12 und 8 Stunden. Die Unterbrechung der Heizmittelzufuhr – also die Stillstandszeit der Umwälzpumpe – beträgt somit 8, 12 und 16 Stunden. Um die Ergebnisse leichter vergleichbar zu machen, wird der Zeitpunkt des Ausschaltens der Pumpe mit 6⁰⁰ früh für alle Berechnungsvarianten gleich angesetzt.

Es wird periodisch eingeschwungen gerechnet, also angenommen, dass sich die angenommene Betriebsweise Tag für Tag ungeändert wiederholt. Die Heizmitteltemperatur wird vorerst mit konstant 30 °C angesetzt.

⁵ Diese Annahmen werden für alle folgenden Berechnungen getroffen und nicht geändert.

Die folgende Abbildung zeigt den Tagesverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum in Abhängigkeit von der Dauer des Stillstands der Umwälzpumpe.

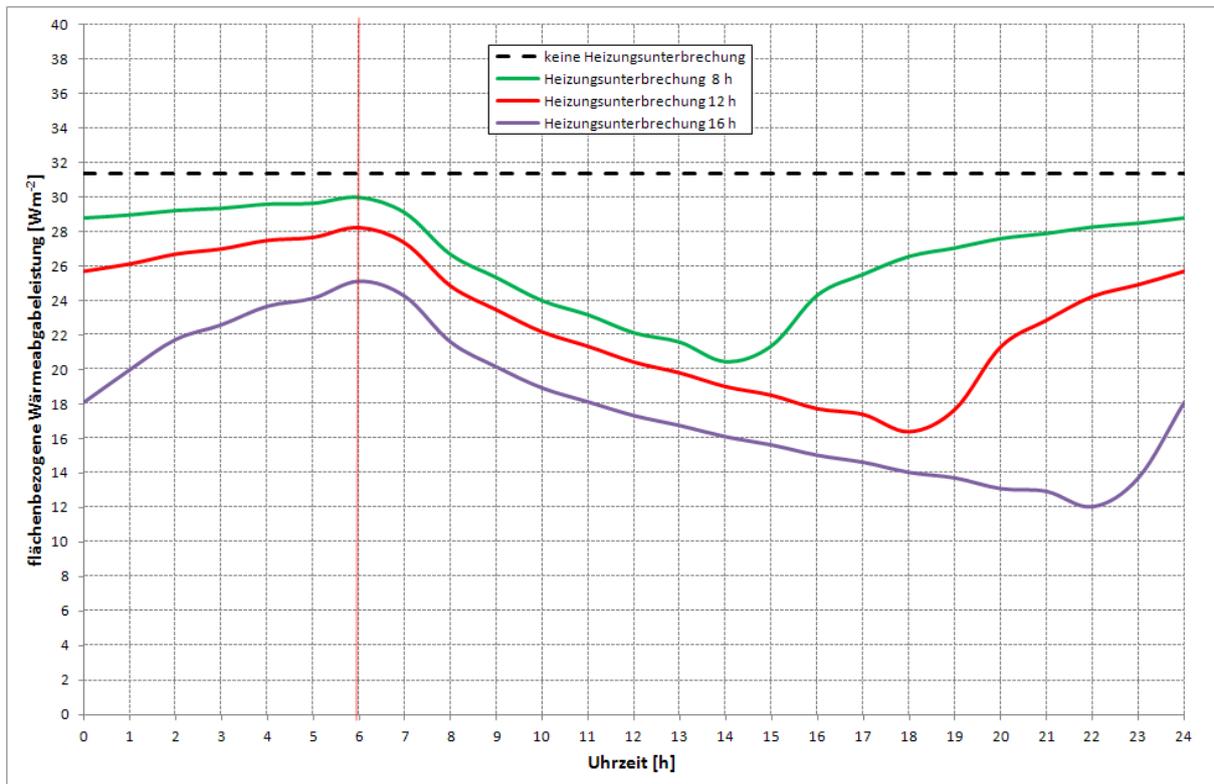


Abb. 4.17: Heizfall: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei nicht durchlaufender Umwälzpumpe

Unmittelbar nach Abschaltung der Umwälzpumpe um 6⁰⁰ früh sinkt die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung ab. Natürlich ergeben sich bei kürzerer Abschaltung der Pumpe höher liegende Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen als bei länger dauernden Pumpenabschaltungen. Die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung ohne Pumpenabschaltung ergibt sich tageszeitlich konstant zu 31,4 Wm⁻² (siehe die strichlierte schwarze Linie in Abb. 4.17) und wird in den untersuchten Fällen der Heizungsunterbrechung nicht erreicht.

Anmerkung: Da hier nicht die Temperatur im Rohr vorgegeben wird, sondern die Temperatur des mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 ms⁻¹ dem Rohr zugeführten Heizmittels, ergibt sich die Temperatur im Rohr aus der Wärmebilanz. Bei der angenommenen Heizmitteltemperatur von 30 °C liegt diese Temperatur selbst im Fall des durchgehenden Betriebs der Pumpe mit 28,8 °C deutlich unter der Heizmitteltemperatur.

Die jeweils im Tagesverlauf an den unter der aktivierten Decke gelegenen Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge⁶ ergibt sich durch Integration der in Abb. 4.17 gezeigten Tagesverläufe. Dieser Wert entspricht somit der Fläche unter dem jeweiligen Tagesverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung und ist in folgender Tabelle für die drei untersuchten

⁶ Die Wärmemenge ist auf die Registerfläche bezogen.

Längen der Beladungszeit sowie für den Fall permanent durchlaufender Umwälzpumpe ausgewiesen.

Beladungszeit [h]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm ⁻²]	
24	752,8	100%
16	634,8	84%
12	548,1	73%
8	433,6	58%

Tab. 4.14: Im Tagesverlauf an den Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge

Bei der Interpretation der in obiger Tabelle ausgewiesenen Werte fällt auf, dass der naheliegende Schluss, wonach bei einem 12-stündigen Stillstand der Umwälzpumpe auch nur 50% der Wärmemenge im Vergleich zum 24 stündigen Betrieb der Umwälzpumpe von der Decke abgegeben wird, vorschnell und falsch ist. Im Vergleich zum durchlaufenden Betrieb kann die Decke bei nur 12-stündigem Betrieb der Umwälzpumpe immerhin ca. 73% der Wärmemenge abgeben. Die Ursache für dieses vorerst erstaunliche Ergebnis wird schnell klar, wenn die vom Heizmedium an das Rohrregister im Tagesverlauf übertragene flächenbezogene Wärmeleistung betrachtet wird – siehe die folgende Abbildung.

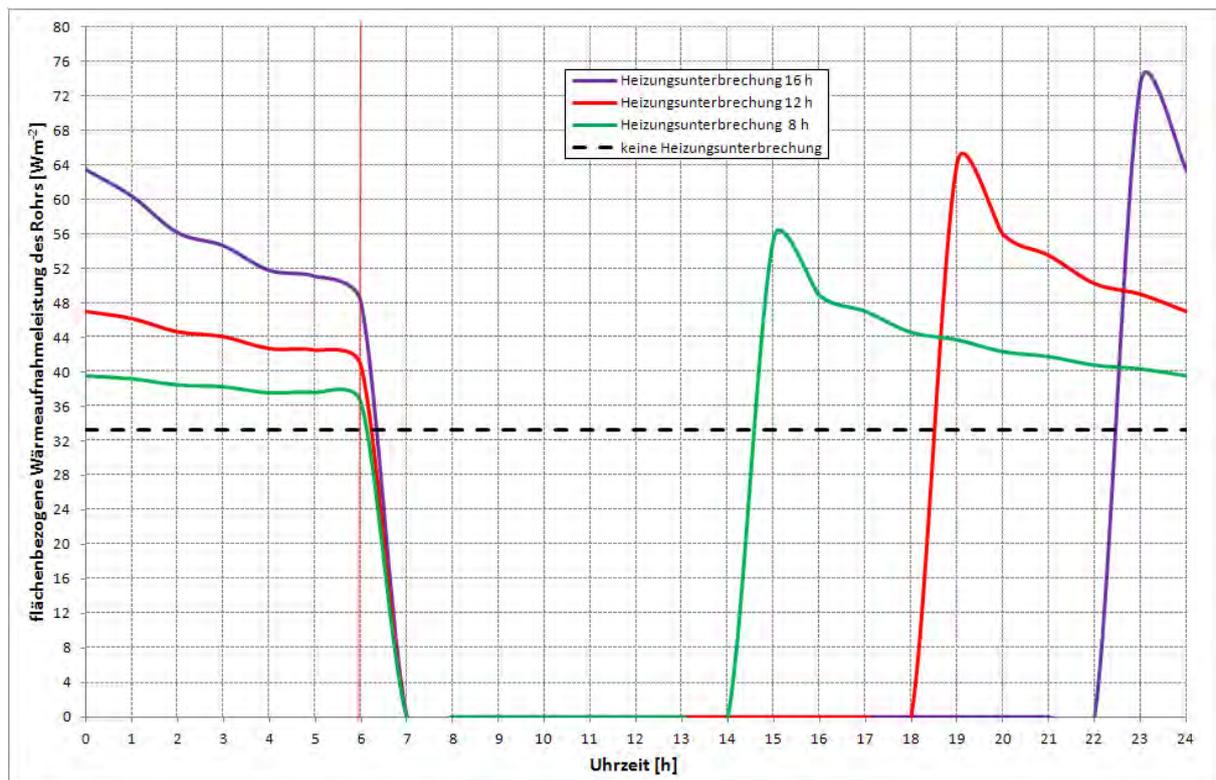


Abb. 4.18: Heizfall: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung des Heizmittels an das Rohrregister bei unterschiedlicher Dauer der Heizungsunterbrechung

Ersichtlich ist die vom Heizmittel auf das Rohr übertragene Wärmeleistung bei durchlaufender Umwälzpumpe deutlich kleiner als bei nicht durchlaufendem Betrieb. Dieser Effekt ist im Umstand begründet, dass die Wärmeaufnahmeleistung des Rohrs in guter Näherung proportional zur Differenz aus Heizmitteltemperatur und der inneren Oberflächentemperatur des Rohrs ist. Wird die Umwälzpumpe abgeschaltet, so geht diese Differenz sehr rasch gegen null – es wird

keine Wärme über das Rohrregister mehr aufgenommen. Je länger die Umwälzpumpe abgeschaltet bleibt, desto stärker kühlt die Decke (auch) im Bereich des Rohrregisters aus. Bei Wiederaanlaufen der Pumpe ist die Differenz zwischen Heizmitteltemperatur und Oberflächentemperatur an der Rohrinneiseite größer als im Fall ohne Heizungsunterbrechung. Es wird somit deutlich mehr Wärme an das Rohrregister übertragen – siehe die Abb. 4.18.

Bei der thermischen Aktivierung der Decke ist zu beachten, dass die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht nicht zu hoch liegt. Dies bedeutet natürlich, dass auch die Heizmitteltemperatur nicht zu groß werden darf. Um die Obergrenze für die Heizmitteltemperatur auszuloten, ist vorerst die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht unter Anwendung einer modifizierten Form von Gleichung <4.3> zu berechnen:

$$\bar{\Theta}_{s,u} = \Theta_u + \frac{q_{r,u}}{\alpha_{s,u}} \quad . \quad <4.9>$$

$q_{r,u}$ in Gleichung <4.9> ist die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum wie sie z. B. in Abb. 4.17 in ihrem Tagesverlauf gezeigt ist. Das Ergebnis dieser Berechnung bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Umwälzpumpe für eine Heizmitteltemperatur von jeweils 30 °C zeigt folgende Abbildung.

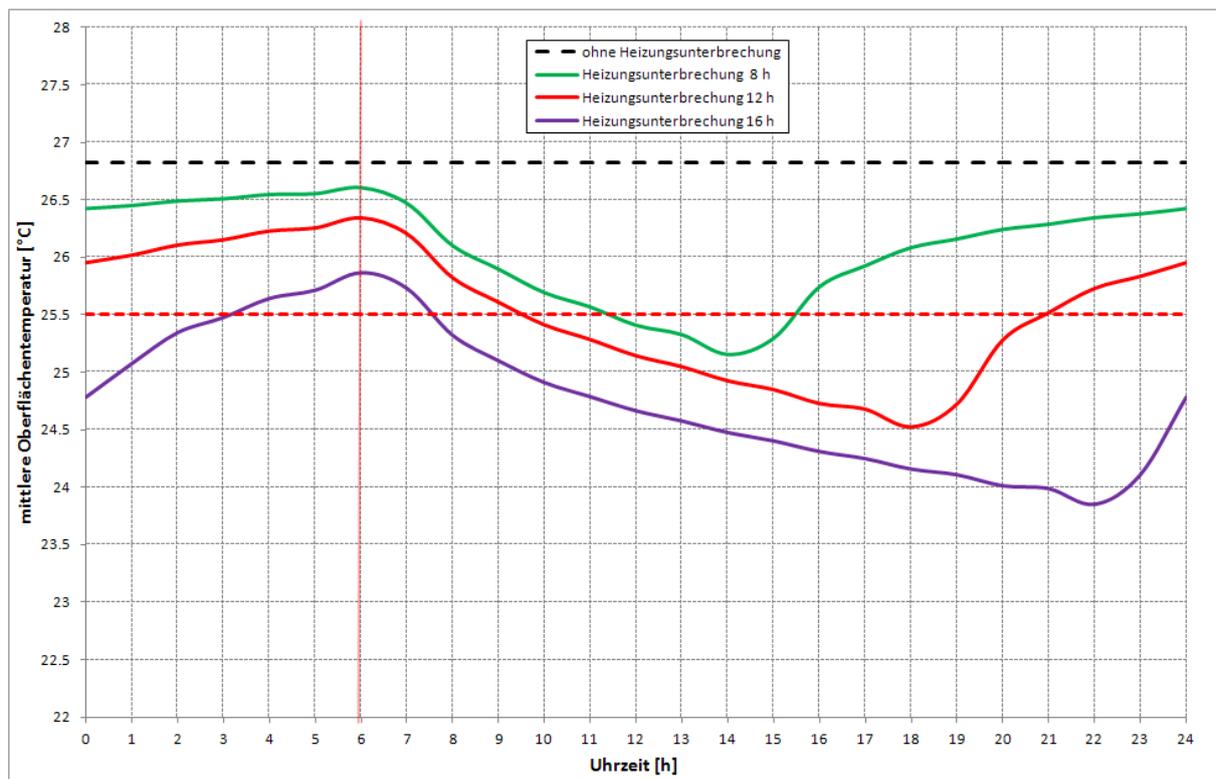


Abb. 4.19: Heizfall: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht

Es zeigt sich, dass mit anwachsender Unterbrechungszeit die mittleren Oberflächentemperaturen leicht absinken. Wird postuliert, dass die maximale Oberflächentemperatur nicht mehr als 4,0 K über der Soll-Temperatur des Raums (22 °C) liegen soll, so ergibt sich für die maximale Oberflächentemperatur ein oberer Grenzwert von 26,0 °C.

Im Zusammenhang mit den in Abb. 4.19 gezeigten Temperaturverläufen muss allerdings beachtet werden, dass es sich dort um mittlere Oberflächentemperaturen handelt. Wie die Detailuntersuchung in Abschnitt IV.1.1 gezeigt hat, ist der mittleren Oberflächentemperatur noch eine

(ortsabhängige) Schwankung („Welligkeit“) von max. $\pm 0,5$ K zu überlagern. Als Obergrenze für die mittlere Oberflächentemperatur ergibt sich somit ein Wert von $25,5$ °C. Diese Grenze ist in Abb. 4.19 rot punktiert eingetragen.

Die bisher angenommene Heizmitteltemperatur von 30 °C erweist sich für alle untersuchten Fälle als zu hoch. Bei ununterbrochenem Heizbetrieb liegt die mittlere Oberflächentemperatur mit $26,8$ °C ganztags deutlich zu hoch (schwarze, strichlierte Linie in Abb. 4.19). Im Fall einer Heizungsunterbrechung fällt die Oberflächentemperatur zeitweise unter die gesetzte Obergrenze. Bei einer Heizungsunterbrechung von 16 Stunden Dauer, also 8-stündiger Beladungszeit, (lila Linie in Abb. 4.19) wird die gesetzte Obergrenze nur zwischen 3^{00} und 7^{30} leicht überschritten.

Um die Obergrenze für die Heizmitteltemperatur abzuschätzen, wird im Folgenden die Heizmitteltemperatur in Schritten von $0,1$ K so lange gesenkt, bis die Obergrenze für die mittlere Oberflächentemperatur von $25,5$ °C im Tagesverlauf nicht überschritten wird. Die folgende Tabelle zeigt die derart errechneten maximal zulässigen Heizmitteltemperaturen.

Beladungszeit [h]	max. Heizmitteltemperatur [°C]
24	27,7
16	28,0
12	28,4
8	29,2

Tab. 4.15: Maximal zulässige Heizmitteltemperaturen in Abhängigkeit von der Beladungszeit

Wird die errechnete maximal zulässige Heizmitteltemperatur gemäß Tab. 4.15 den Simulationen zugrunde gelegt, so ergeben sich folgende Tagesverläufe der Oberflächentemperatur für die Deckenuntersicht.

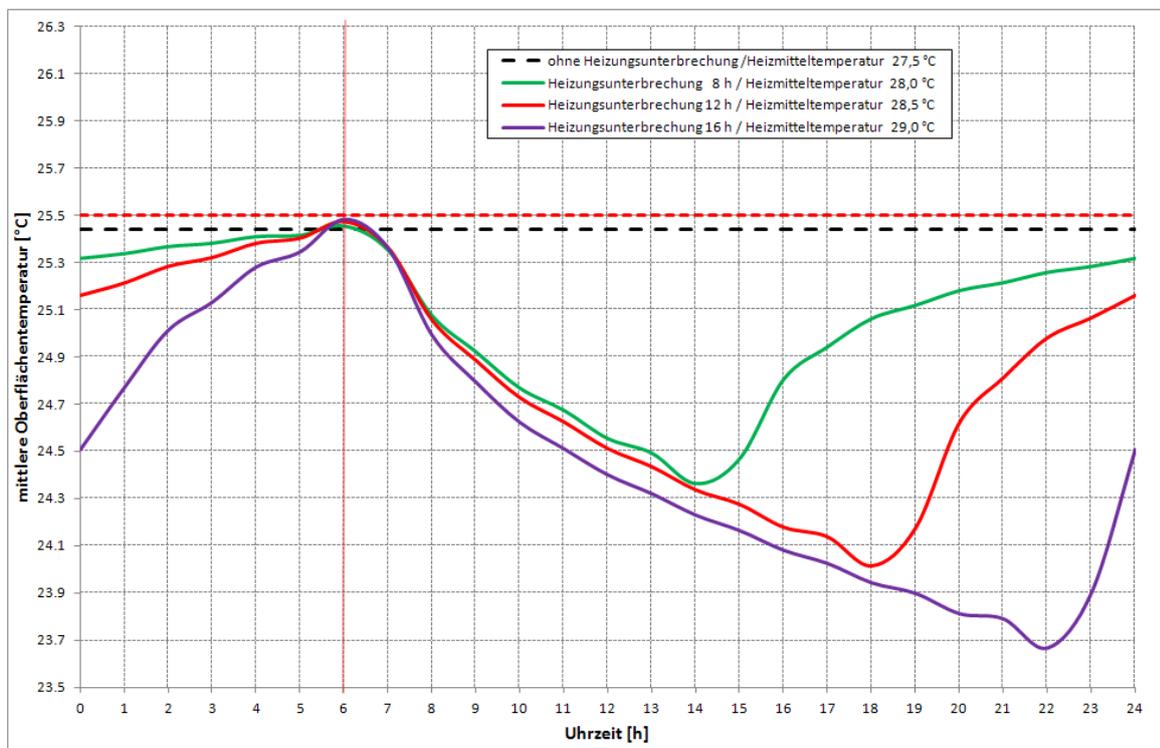


Abb. 4.20: Heizfall: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht bei maximaler Heizmitteltemperatur

Die gesetzte Obergrenze von 25,5 °C für die mittlere Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht wird somit unter den getroffenen Annahmen nicht überschritten.

Ein Vergleich der an den unter der Decke liegenden Raum während eines Tages abgegebenen Wärmemengen – siehe auch Tab. 4.14 – führt unter diesen Annahmen auf folgendes Ergebnis.

Beladungszeit [h]	Heizmitteltemp. [°C]	flächenbez. Wärmemenge [Whm ⁻²]	
24	27,7	536,4	100%
16	28,0	476,1	89%
12	28,4	438,5	82%
8	29,2	390,2	73%

Tab. 4. 16: Im Tagesverlauf an den Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge bei veränderten Heizmitteltemperaturen

Als Ergebnis der Untersuchung zeigt sich, dass bei täglicher Unterbrechung des Betriebs der Umwälzpumpe die Temperatur des Heizmittels erhöht werden kann ohne dass die Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht zu hoch ansteigen. Wird dieser Effekt gezielt ausgenutzt, so kann z. B. trotz 12-stündiger Heizungsunterbrechung dem Raum ca. 82% jener Wärmemenge zugeführt werden, die bei durchlaufendem Betrieb möglich ist.

Abb. 4.20 zeigt, dass auch bei unterbrochenem Heizungsbetrieb die Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht nicht zu hoch werden, sodass der Komfort im Raum nicht beeinträchtigt wird.

Conclusio:

Die instationär durchgeführten Detailuntersuchungen zur Auswirkung von Heizungsunterbrechungen, die durch ein Abschalten der Umwälzpumpe hervorgerufen werden, führen auf folgende Ergebnisse:

- Die Abschaltung der Umwälzpumpe führt zu einem sehr langsam voranschreitenden Auskühlen der Decke. Selbst nach einem Pumpenstillstand von 16 Stunden liegt die mittlere Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht mit ca. 24 °C noch 2 K über der Solltemperatur des Raums von 22 °C.
- Mit dem Auskühlen der Decke ist zum einen ein langsames Absinken der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum verbunden. Zum anderen führt das Absinken der Temperatur im Bereich der Heizregister dazu, dass die Decke nach Wiedereinschaltung der Umwälzpumpe wesentlich mehr Wärme aufnimmt als bei durchlaufendem Betrieb der Pumpe. Dies führt dazu, dass die im Tagesverlauf an den unter der Decke liegenden Raum abgegebene Wärmemenge bei einer Beladungszeit von 8 Stunden (d. h. einer Heizungsunterbrechung von 16 Stunden Dauer) bei gleich gehaltener Heizmitteltemperatur mit 58% jener Wärmemenge, die bei durchlaufender Umwälzpumpe abgegeben wird, unerwartet hoch liegt.
- Die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht ist im Fall einer Heizungsunterbrechung bei gleich gehaltener Temperatur des Heizmittels niedriger als bei durchlaufendem Pumpenbetrieb. Daher kann im Fall einer Unterbrechung des Betriebs der Umwälzpumpe die Heizmitteltemperatur erhöht werden, ohne die Komfortansprüche im Raum unter der Decke zu gefährden. Wird dieser Umstand ausgenutzt, so kann die im

Tagesverlauf an den Raum abgegebene Wärmemenge bei einer Beladungszeit von 8 Stunden Dauer bis auf ca. 73% jener Wärmemenge gesteigert werden, die bei durchlaufendem Pumpenbetrieb erreicht wird.

Wird nun der Fall der Kühlung durch die thermisch aktivierte Decke analog zum bisher für den Heizfall Beschriebenen untersucht, so sind vorerst die Anforderungen an die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur der gekühlten Decke festzulegen. Wird angenommen, dass die Lufttemperatur im Tagesverlauf den Wert von 26 °C nicht übersteigen darf, so ergibt sich die Forderung, dass die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht nicht unter 22 °C abfallen soll.

Die Länge der Kühlungsunterbrechung, d. h. des Stillstands der Umwälzpumpe, wird – analog zum Heizfall - in drei Schritten variiert: 8, 12 und 16 Stunden. Um die Ergebnisse leichter vergleichbar zu machen, wird der Zeitpunkt des Ausschaltens der Pumpe mit 18⁰⁰ Uhr für alle Berechnungsvarianten festgelegt.

Es wird – wie bisher – periodisch eingeschwungen gerechnet, also davon ausgegangen, dass die angenommene Betriebsweise sich Tag für Tag ungeändert wiederholt. Die Kühlmitteltemperatur wird vorerst mit konstant 18 °C angesetzt.

Die folgende Abbildung zeigt den Tagesverlauf der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum in Abhängigkeit von der Dauer des Stillstands der Umwälzpumpe.

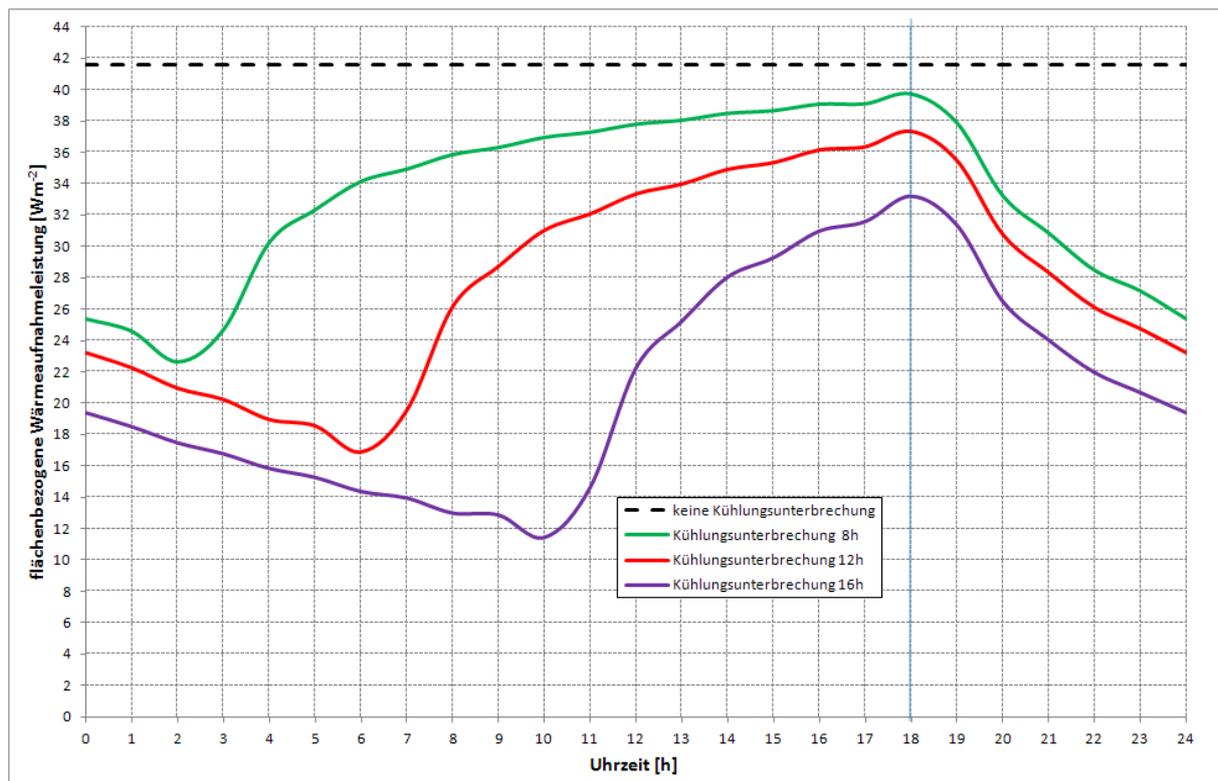


Abb. 4.21: Kühlfall: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei nicht durchlaufender Umwälzpumpe

Unmittelbar nach Abschaltung der Umwälzpumpe um 18⁰⁰ sinkt die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung ab. Natürlich ergeben sich bei kürzerer Abschaltung der Pumpe höher

liegende Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistungen als bei länger dauernden Pumpenabschaltungen. Die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung ohne Pumpenabschaltung ergibt sich tageszeitlich konstant zu $41,6 \text{ Wm}^{-2}$ (siehe die strichlierte schwarze Linie in Abb. 4.21) und wird in den untersuchten Fällen der Kühlungsunterbrechung nicht erreicht.

Anmerkung: Da hier nicht die Temperatur im Rohr vorgegeben wird, sondern die Temperatur des mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,5 \text{ ms}^{-1}$ dem Rohr zugeführten Kühlmittels, ergibt sich die Temperatur im Rohr aus der Wärmebilanz. Bei der angenommenen Kühlmitteltemperatur von $18 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt diese Temperatur selbst im Fall des durchgehenden Betriebs der Pumpe mit $19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ deutlich über der Kühlmitteltemperatur.

Die jeweils im Tagesverlauf von dem unter der aktivierten Decke gelegenen Raum aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge⁷ ergibt sich durch Integration der in Abb. 4.21 gezeigten Tagesverläufe. Dieser Wert entspricht somit der Fläche unter dem jeweiligen Tagesverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung und ist in folgender Tabelle für die drei untersuchten Längen der Betriebsunterbrechung sowie für den Fall durchgehender Kühlung ausgewiesen.

Kühlungsunterbrechung [h]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm^{-2}]	
0	998,4	100%
8	803,6	80%
12	671,1	67%
16	508,7	51%

Tab. 4.17: Im Tagesverlauf von der Decke aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge

Der schon im Falle des Heizbetriebs erkannte Effekt, wonach eine Halbierung der Laufzeit der Umwälzpumpe nicht automatisch eine Halbierung der täglichen Heiz- bzw. Kühlarbeit bedeutet, tritt auch hier in etwas abgeschwächter Form auf. Im Vergleich zum durchlaufenden Betrieb der Umwälzpumpe nimmt die aktivierte Decke bei nur 12-stündigem Betrieb der Umwälzpumpe immerhin ca. 67% der Wärmemenge auf und transportiert sie über das Kühlregister ab. In der folgenden Abbildung wird dieser Effekt mittels Darstellung der vom Rohrregister an das Kühlmittel abgegebenen registerflächenbezogenen Wärmeleistung erklärt.

⁷ Die Wärmemenge ist auf die Registerfläche bezogen.

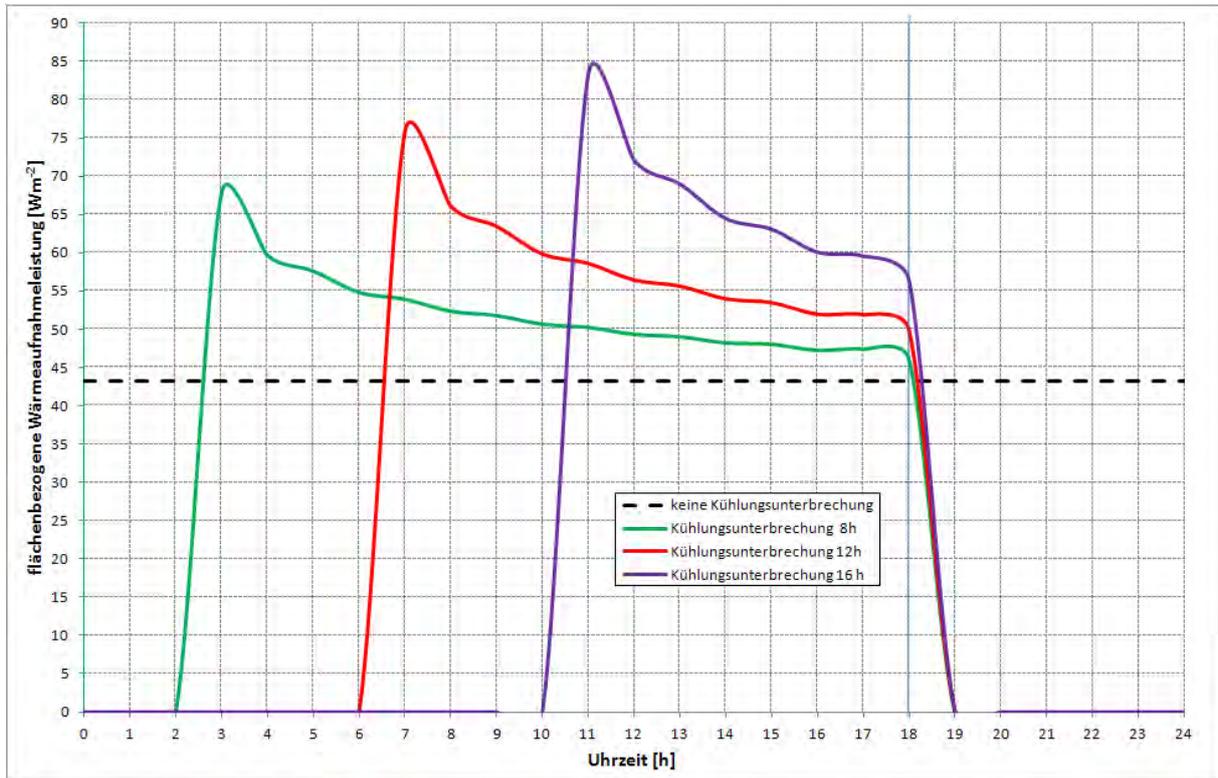


Abb. 4.22: Errechnete Tagesverläufe der registerflächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung des Kühlmittels bei unterschiedlicher Dauer der Kühlungsunterbrechung

Ersichtlich ist die vom Kühlmittel aufgenommene Wärmeleistung bei durchlaufender Umwälzpumpe deutlich kleiner als bei nicht durchlaufendem Betrieb. Dieser Effekt ist im Umstand begründet, dass die Wärmeaufnahmeleistung des Kühlmittels in guter Näherung proportional zur Differenz aus innerer Oberflächentemperatur des Rohrs und Kühlmitteltemperatur ist. Wird die Umwälzpumpe abgeschaltet, so geht diese Differenz sehr rasch gegen null – es wird keine Wärme vom Kühlmittel mehr aufgenommen. Je länger die Umwälzpumpe abgeschaltet bleibt, desto wärmer wird die Decke (auch) im Bereich des Rohrregisters. Bei Wiederanlaufen der Pumpe ist die Differenz zwischen Oberflächentemperatur an der Rohrinneenseite und Kühlmitteltemperatur größer als im Fall ohne Kühlungsunterbrechung. Es wird somit deutlich mehr Wärme vom Kühlmittel aufgenommen (siehe Abb. 4.22).

Wie im Fall der Beheizung kann auch im Fall der Kühlung die mittlere Oberflächentemperatur direkt aus der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung rückgerechnet werden – siehe Gleichung <4.9>. Natürlich ist im Fall der Kühlung der Wärmeübergangskoeffizient für die Deckenuntersicht auf $\alpha_{s,u} = 10,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zu setzen (siehe Tab. 4.3).

Die folgende Tabelle zeigt die errechneten mittleren Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für die vier untersuchten Betriebszustände der Umwälzpumpe, wobei eine oberflächennahe Positionierung des Rohrregisters (Betonüberdeckung: 5 cm) angenommen wurde.

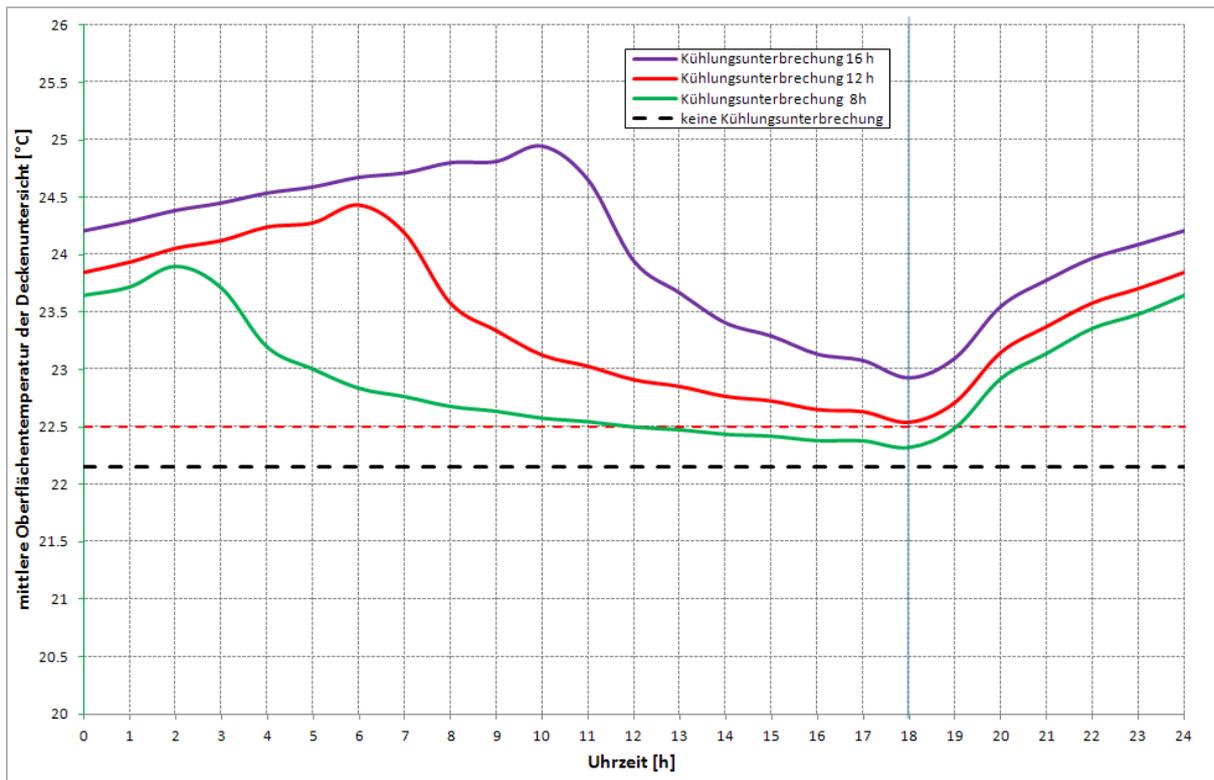


Abb. 4.23: Kühlfall: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenunterseite

Es zeigt sich, dass mit anwachsender Unterbrechungszeit die mittleren Oberflächentemperaturen ansteigen. Wird postuliert, dass die minimale Oberflächentemperatur nicht mehr als 4,0 K unter der Obergrenze für die Soll-Temperatur des Raums von 26 °C liegen soll, so ergibt sich für die minimale Oberflächentemperatur ein unterer Grenzwert von 22,0 °C.

Im Zusammenhang mit den in Abb. 4.23 gezeigten Temperaturverläufen muss allerdings beachtet werden, dass es sich dort um mittlere Oberflächentemperaturen handelt. Wie die Detailuntersuchung in Abschnitt IV.1.1 gezeigt hat, ist der mittleren Oberflächentemperatur noch eine (ortsabhängige) Schwankung („Welligkeit“) von max. $\pm 0,5$ K zu überlagern. Als Untergrenze für die mittlere Oberflächentemperatur ergibt sich somit 22,5 °C. Diese Grenze ist in Abb. 4.23 rot punktiert eingetragen.

Die angenommene Kühlmitteltemperatur von 18 °C erweist sich für den durchgehenden Pumpenbetrieb als zu niedrig. Bei ununterbrochenem Kühlbetrieb liegt die mittlere Oberflächentemperatur mit 22,1 °C ganztags deutlich zu tief (schwarze, strichlierte Linie in Abb. 4.23). Im Fall einer Kühlungsunterbrechung von 8 Stunden Dauer fällt die Oberflächentemperatur am Nachmittag unter die gesetzte Untergrenze. Für einen Pumpenstillstand von 12 Stunden Dauer (rote Linie in Abb. 4.23) erweist sich die Kühlmitteltemperatur von 18 °C als gerade noch zulässig. Für den Fall der 16-stündigen Unterbrechung kann die Kühlmitteltemperatur sogar noch weiter erniedrigt werden, ohne dass der thermische Komfort im Raum beeinträchtigt wird.

Um die Untergrenze für die Kühlmitteltemperatur abzuschätzen, wird die Kühlmitteltemperatur in Schritten von 0,1 K so lange variiert, bis die Untergrenze für die mittlere Oberflächentemperatur von 22,5 °C im Tagesverlauf nicht unterschritten wird. Die folgende Tabelle zeigt die derart errechneten minimal zulässigen Kühlmitteltemperaturen.

Kühlungsunterbrechung [h]	Min. Kühlmitteltemperatur [°C]
0	18,7
8	18,4
12	18,0
16	17,0

Tab. 4.18: Minimal zulässige Kühlmitteltemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe

Wird die errechnete minimal zulässige Kühlmitteltemperatur gemäß Tab. 4.18 den Simulationen zugrunde gelegt, so ergeben sich folgende Tagesverläufe der Oberflächentemperatur für die Deckenuntersicht.

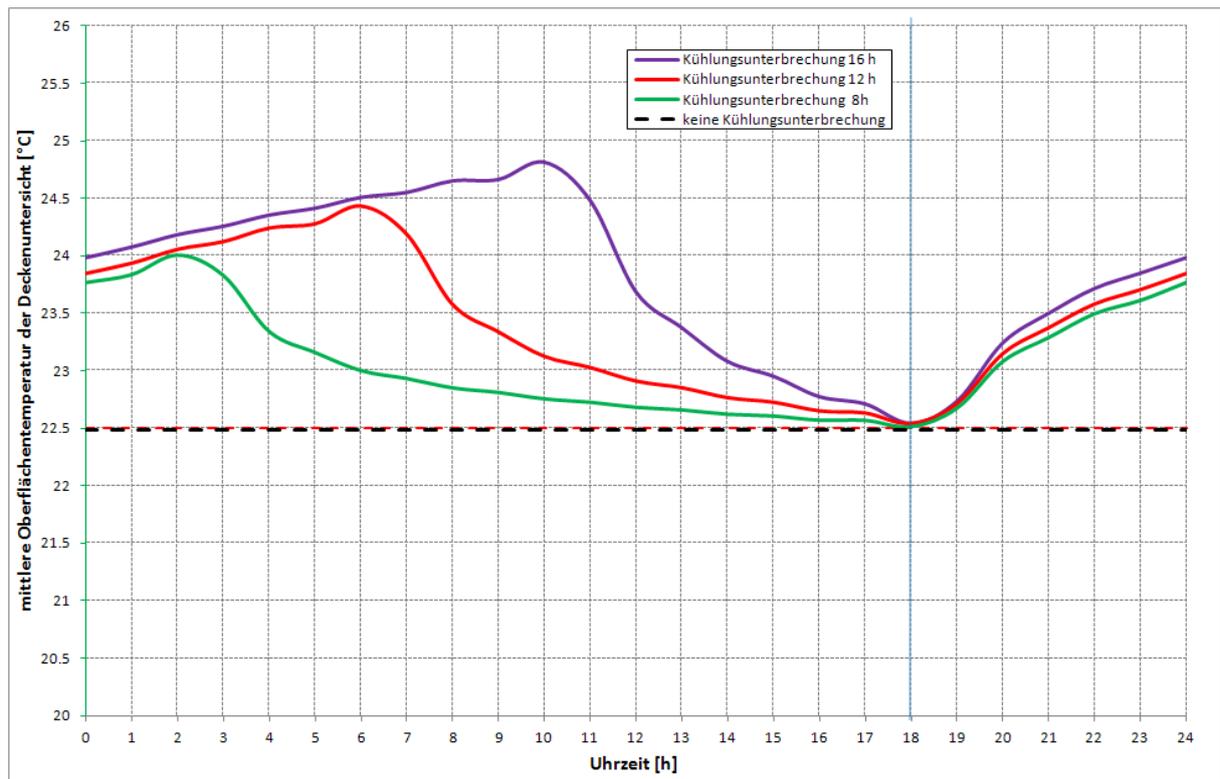


Abb. 4.24: Kühlfall: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht bei minimaler Kühlmitteltemperatur

Die gesetzte Untergrenze von 22,5 °C für die mittlere Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht wird somit unter den getroffenen Annahmen nicht unterschritten.

Ein Vergleich der von dem unter der Decke liegenden Raum während eines Tages aufgenommenen Wärmemengen – siehe zum Vergleich auch Tab. 4.17 – führt unter diesen Annahmen auf folgendes Ergebnis.

Kühlungsunterbrechung [h]	Kühlmitteltemp. [°C]	flächenbez. Wärmemenge [Whm ⁻²]	
0	18,7	911,0	100%
8	18,4	763,4	84%
12	18,0	671,1	74%
16	17,0	572,3	63%

Tab. 4.19: Im Tagesverlauf vom Raum aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge bei veränderten Kühlmitteltemperaturen

Als Ergebnis der Untersuchung zeigt sich, dass bei täglicher Unterbrechung des Betriebs der Umwälzpumpe die Temperatur des Kühlmittels abgesenkt werden kann, ohne dass die Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht zu stark abfallen. Wird dieser Effekt gezielt ausgenutzt, so können z. B. trotz 12-stündiger Kühlungsunterbrechung aus dem Raum ca. 74% jener Wärmemenge abgeführt werden, die bei durchlaufendem Betrieb der Umwälzpumpe möglich wäre.

Abb. 4.24 zeigt, dass auch bei unterbrochenem Kühlungsbetrieb die Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht nicht zu tief abfallen, sodass der Komfort im Raum nicht beeinträchtigt wird.

Conclusio:

Die instationär durchgeführten Detailuntersuchungen zur Auswirkung von Kühlungsunterbrechungen, die durch ein Abschalten der Umwälzpumpe hervorgerufen werden, führen auf folgende Ergebnisse:

- Eine Abschaltung der Umwälzpumpe führt zu einer langsam voranschreitenden Aufwärmung der Decke. Selbst nach einem sich im Tagesverlauf wiederholenden Pumpenstillstand von 16 Stunden liegt die mittlere Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht mit ca. 24,9 °C noch 1,1 K unter der Obergrenze für die Solltemperatur des Raums von 26 °C.
- Mit der Aufwärmung ist zum einen ein langsames Absinken der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum verbunden. Zum anderen führt die Erhöhung der Temperatur im Bereich des Kühlregisters dazu, dass das Kühlmittel nach Wiedereinschaltung der Umwälzpumpe wesentlich mehr Wärme aufnimmt als dies bei einem durchlaufenden Betrieb der Pumpe möglich wäre. Dies führt dazu, dass die im Tagesverlauf aus dem unter der Decke liegenden Raum aufgenommene Wärmemenge bei einer Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr von 16 Stunden Dauer bei gleich gehaltener Kühlmitteltemperatur mit 51% jener Wärmemenge, die bei durchlaufender Umwälzpumpe aufgenommen wird, unerwartet hoch liegt.
- Die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht ist im Fall einer Kühlungsunterbrechung bei gleich gehaltener Temperatur des Kühlmittels höher als bei durchlaufendem Pumpenbetrieb. Daher kann im Fall einer Unterbrechung des Betriebs der Umwälzpumpe die Kühlmitteltemperatur abgesenkt werden, ohne die Komfortansprüche im Raum unter der Decke zu gefährden. Wird dieser Umstand ausgenutzt, so kann die im Tagesverlauf vom Raum aufgenommene Wärmemenge bei einer Beladungszeit von 8 Stunden Dauer bis auf ca. 63% jener Wärmemenge gesteigert werden, die bei durchlaufendem Pumpenbetrieb erreicht wird.

IV.1.3.1.1 Einfluss der Betonüberdeckung

Bei den im vorhergehenden Abschnitt präsentierten Untersuchungen wurde die Lage des Rohrregisters mit einem Abstand von 5 cm über der Untersicht der Decke konstant gehalten. Im Folgenden wird der Einfluss der Lage des Rohrregisters innerhalb der Betondecke untersucht. Hierbei wird die Betonüberdeckung (Definition: siehe Abb. 4.10) von 5 cm über 10 cm bis auf 15 cm gesteigert.

Bei einer angenommenen Heizmitteltemperatur von 30 °C ergeben sich für eine Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 Stunden Dauer die folgenden Tagesverläufe für die flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen der thermisch aktivierten Decke.

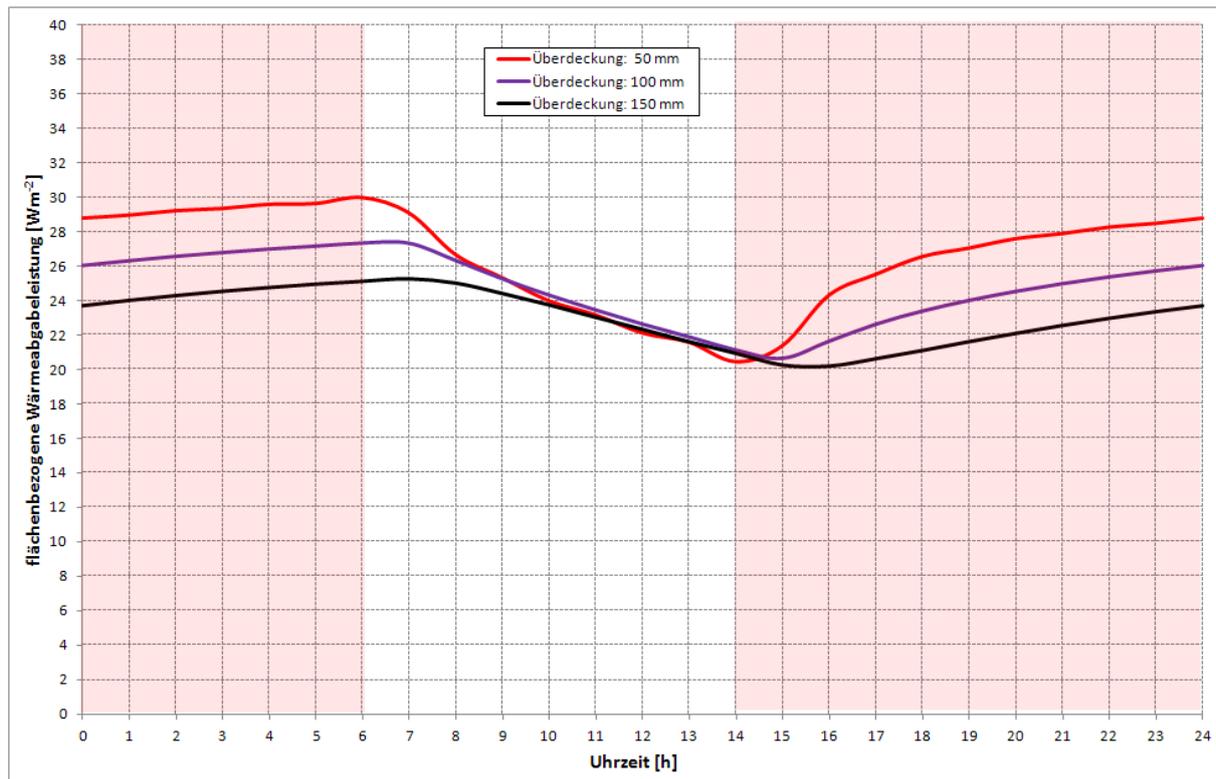


Abb. 4.25: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr

Die unterschiedliche Position des Rohrregisters wirkt sich dahin gehend aus, dass während des Betriebs der Umwälzpumpe (in Abb. 4.25 rot hinterlegt) die Wärmeabgabe umso höher ausfällt, je näher das Rohrregister an der Untersicht der Decke positioniert ist. Nach Abschaltung der Umwälzpumpe sinkt die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung langsam ab. Bemerkenswert ist, dass ab 10 Uhr, also ca. 4 Stunden nach dem Zeitpunkt des Abschaltens der Umwälzpumpe, die Wärmeabgabeleistung nahezu unabhängig von der Position des Rohrregisters ist. Dies ist eine Folge des Umstands, dass nach Abschalten der Umwälzpumpe die Wärmeabgabe der Decke mit kleiner Betonüberdeckung (siehe die rote Linie in Abb. 4.25) etwas schneller abnimmt als bei größerer Betonüberdeckung des Rohrregisters (siehe die lila und die schwarze Linie in Abb. 4.25).

Die folgende Tabelle zeigt als Auswertung der in Abb. 4.25 gezeigten Tagesverläufe die während eines Tages an den unter der aktivierten Decke gelegenen Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge.

Betonüberdeckung [cm]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	634,8	100%
10	592,9	93%
15	552,4	87%

Tab. 4.20: Im Tagesverlauf bei 8-stündiger Abschaltung der Umwälzpumpe an den Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters

Es zeigt sich, dass bei gleich gehaltener Heizmitteltemperatur die von der Decke im Tagesverlauf aufgenommene und an den Raum unter der Decke abgegebene Wärmemenge mit steigender Betonüberdeckung des Rohrregisters leicht abnimmt.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen im Fall des 12-stündigen Abschaltens der Umwälzpumpe.

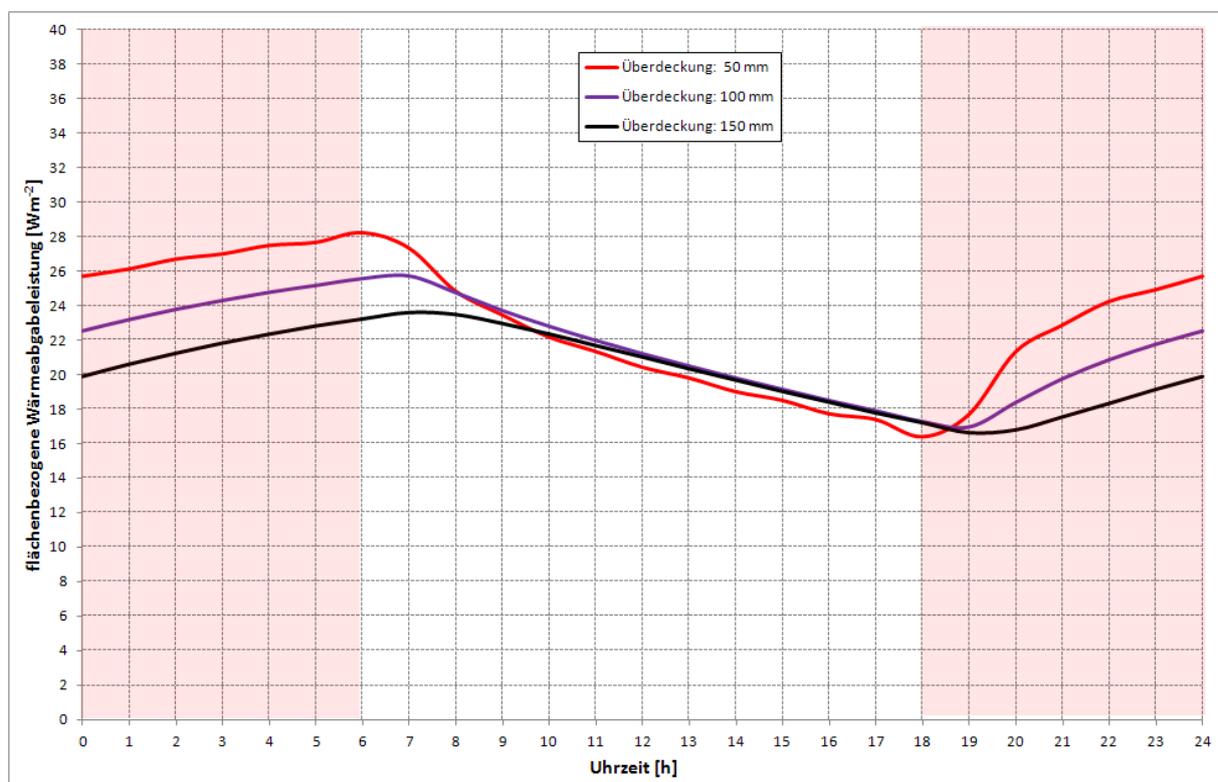


Abb. 4.26: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei einer 12-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr

Im Vergleich zu Abb. 4.25 liegen die flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen aufgrund der längeren Unterbrechung der Heizmittelzufuhr etwas niedriger. Zudem fällt auf, dass ab 10⁰⁰ die Wärmeabgabeleistung bei 5 cm Betonüberdeckung (rote Linie) etwas niedriger ist als bei höherer Betonüberdeckung.

In folgender Tabelle sind die während eines Tages an den unter der aktivierten Decke gelegenen Raum abgegebenen flächenbezogenen Wärmemengen angegeben.

Betonüberdeckung [cm]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	548,1	100%
10	519,9	95%
15	488,0	89%

Tab. 4.21: Im Tagesverlauf bei 12-stündiger Abschaltung der Umwälzpumpe an den Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters

Die Abnahme der flächenbezogenen Wärmemenge mit der Betonüberdeckung erweist sich bei steigender Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr als weniger ausgeprägt (siehe zum Vergleich Tab. 4.20).

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen im Fall eines 16-stündigen Abschaltens der Umwälzpumpe. Die Beladungszeit der thermisch aktivierten Decke in der Zeit zwischen 22⁰⁰ und 6⁰⁰ früh erlaubt in diesem Fall z. B. die Nutzung von Strom zum Nachttarif.

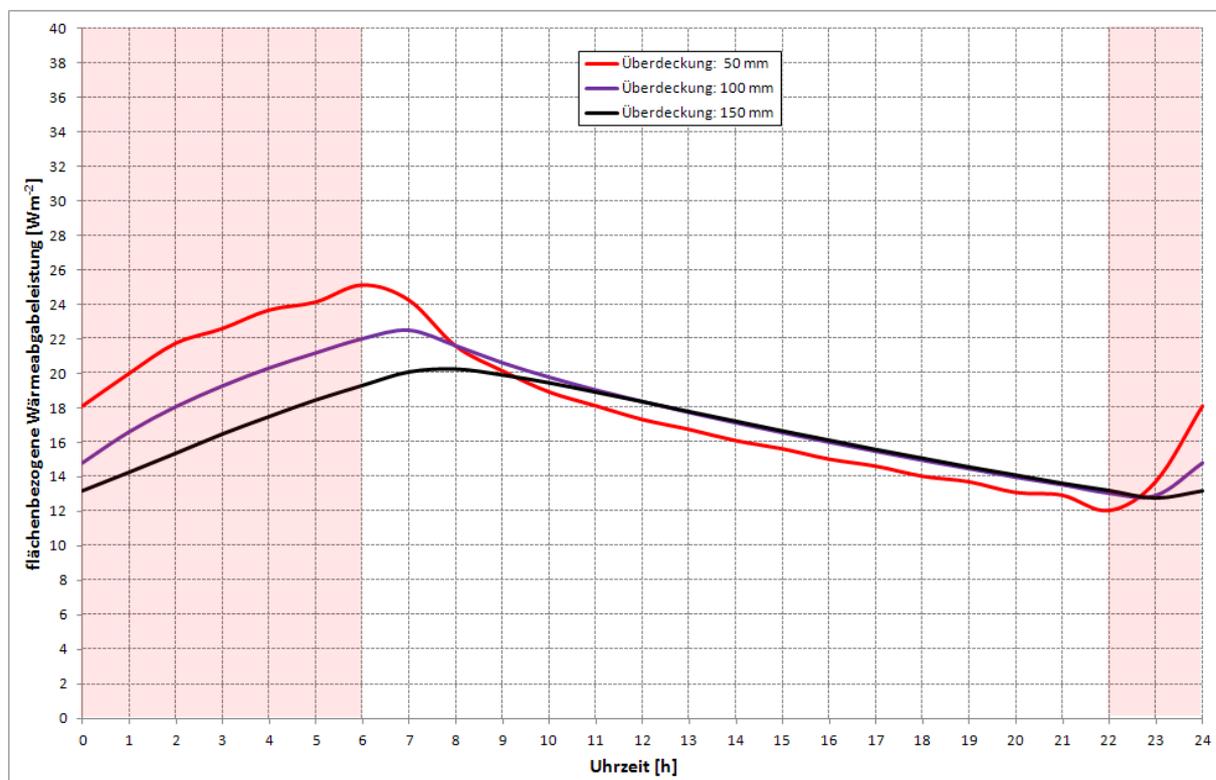


Abb. 4.27: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei einer 16-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr

Im Vergleich zu Abb. 4.25 und Abb. 4.26 liegen die flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen bei der sehr lang gewählten Unterbrechung der Heizmittelzufuhr etwas niedriger. Es zeigt sich, dass bei einer Betonüberdeckung von 10 cm und darüber (lila und schwarze Kurve in Abb. 4.27) ab 11⁰⁰ – also 5 Stunden nach Abschaltung der Umwälzpumpe – die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung bis 23⁰⁰ – also 1 Stunde nach dem Wiedereinschalten der Pumpe – nahezu gleich ist.

In folgender Tabelle sind die während eines Tages an den unter der aktivierten Decke gelegenen Raum abgegebenen flächenbezogenen Wärmemengen angegeben.

Betonüberdeckung [cm]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	433,6	100%
10	419,5	97%
15	398,2	92%

Tab. 4.22: Im Tagesverlauf bei 16-stündiger Abschaltung der Umwälzpumpe an den Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters

Bei den bisher in diesem Abschnitt präsentierten Untersuchungen wurde für alle Varianten die Heizmitteltemperatur auf 30 °C konstant gehalten. Wie bereits ausführlich angesprochen, muss zur Wahrung eines hohen Komforts im Raum verhindert werden, dass die Oberflächentemperatur über einen Grenzwert ansteigt. Der obere Grenzwert für die mittlere Oberflächentemperatur wurde bei einer Solltemperatur von 22 °C mit 25,5 °C festgelegt.

In den folgenden 3 Abbildungen sind die Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur der Untersicht der thermisch aktivierten Decke für eine Heizmitteltemperatur von 30 °C in Abhängigkeit von der Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr und von der Betonüberdeckung ausgewiesen.

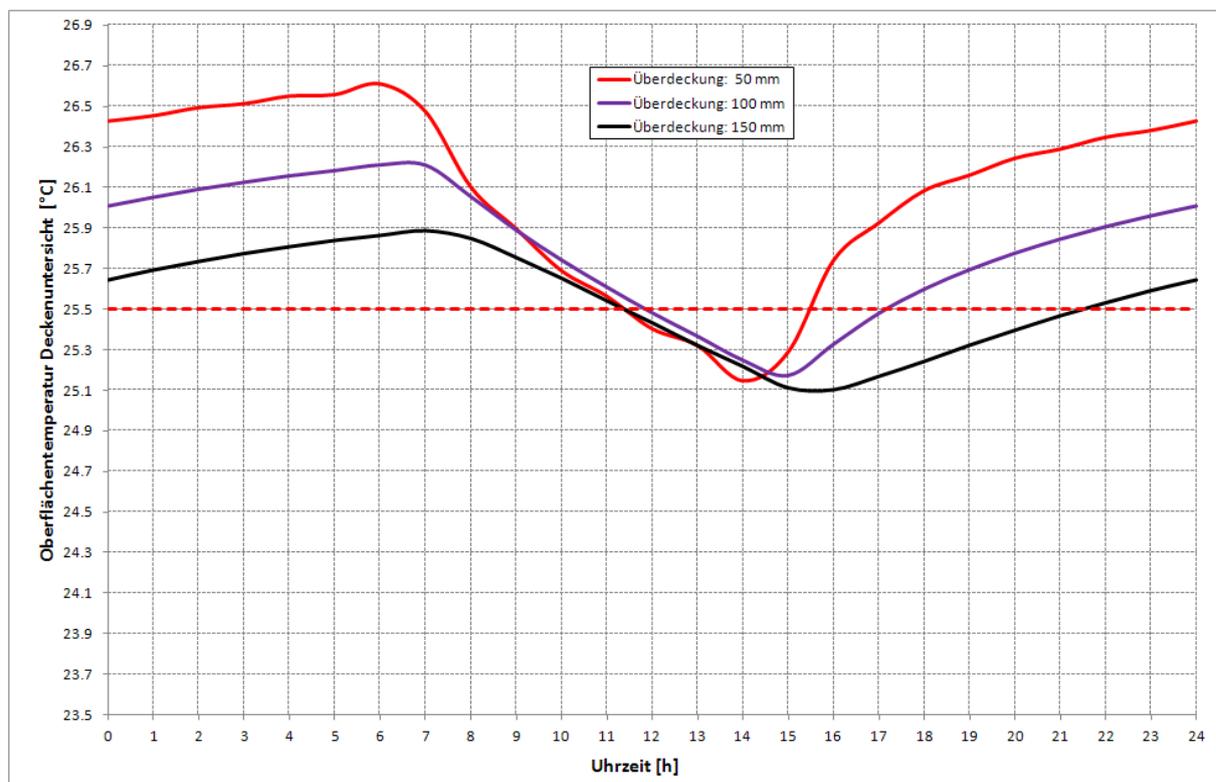


Abb. 4.28: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **8-stündigen** Unterbrechung der Heizmittelzufuhr; Heizmitteltemperatur: 30 °C

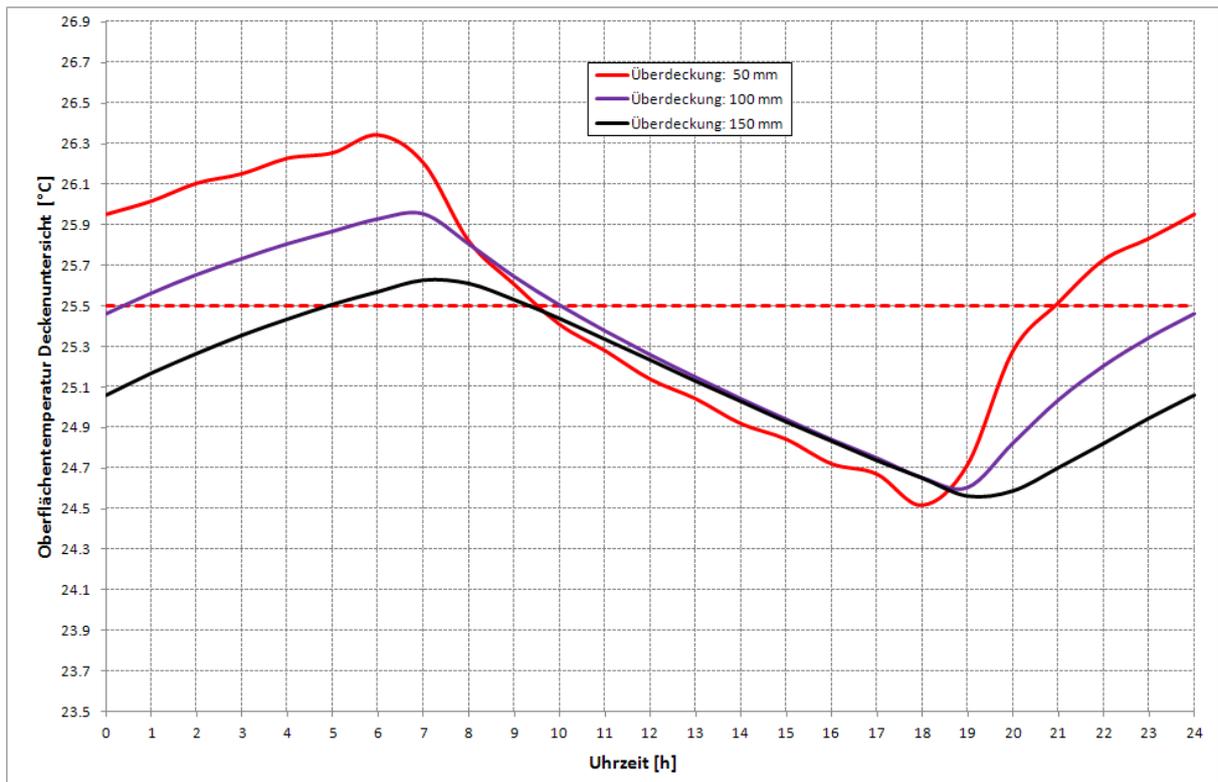


Abb. 4.29: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **12-stündigen** Unterbrechung der Heizmittelzufuhr; Heizmitteltemperatur: 30 °C

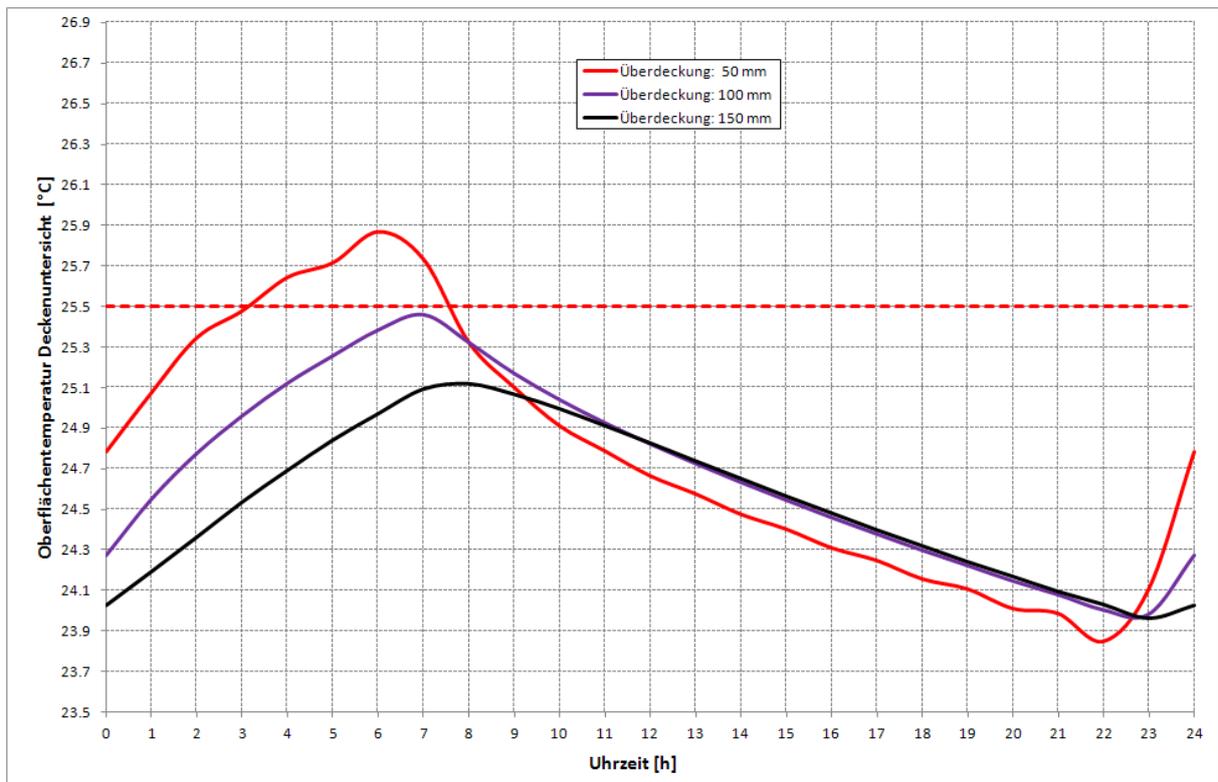


Abb. 4.30: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **16-stündigen** Unterbrechung der Heizmittelzufuhr; Heizmitteltemperatur: 30 °C

Es zeigt sich, dass bei der gewählten Heizmitteltemperatur von 30 °C die mittlere Oberflächentemperatur nur im Fall einer 16-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr und bei Betonüberdeckungen von 10 cm und mehr (siehe die lila und die schwarze Kurve in Abb. 4.30) ganztägig unter der gesetzten Obergrenze (rot gestrichelte Kurve in den Abb. 4.28 bis Abb. 4.30) liegt. In allen anderen Fällen muss somit die Heizmitteltemperatur reduziert werden, um hohen thermischen Komfort im Raum zu gewährleisten.

Um die Obergrenze für die Heizmitteltemperatur abzuschätzen, wird im Folgenden die Heizmitteltemperatur in Schritten von 0,1 K so lange variiert, bis die Obergrenze für die mittlere Oberflächentemperatur von 25,5 °C im Tagesverlauf gerade nicht überschritten wird. Die folgende Tabelle zeigt die derart errechneten maximal zulässigen Heizmitteltemperaturen.

Betonüberdeckung [cm]	Heizungsunterbrechung [h]	max. Heizmitteltemperatur [°C]
5	8	28,0
5	12	28,4
5	16	29,2
10	8	28,6
10	12	29,0
10	16	30,0
15	8	29,1
15	12	29,5
15	16	30,5

Tab. 4.23: Maximal zulässige Heizmitteltemperaturen in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung und der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe

Es zeigt sich, dass bei Erhöhung der Betonüberdeckung von 10 auf 15 cm die Heizmitteltemperatur unabhängig von der Dauer der Heizungsunterbrechung um 0,5 K angehoben werden kann. Im Vergleich dazu liegt die mögliche Temperaturerhöhung bei Vergrößerung der Betonüberdeckung und gleich gehaltener Dauer der Heizungsunterbrechung zwischen 0,6 und 0,8 K.

Unabhängig von der Betonüberdeckung erlaubt eine Erweiterung der Dauer der Heizungsunterbrechung von 8 auf 12 Stunden eine Erhöhung der Heizmitteltemperatur von 0,4 K. Bei einer zusätzlichen Erhöhung der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe von 12 auf 16 Stunden steigt bei einer Betonüberdeckung von 5 cm die mögliche Temperaturerhöhung des Heizmittels auf 0,8 K. Bei einer Betonüberdeckung von 10 und 15 cm vergrößert sich diese mögliche Temperaturerhöhung auf 1,0 K.

Wird die errechnete maximal zulässige Heizmitteltemperatur gemäß Tab. 4.23 den Simulationen zugrunde gelegt, so ergeben sich die Tagessummen der an den Raum abgegebenen Wärmemengen gemäß folgender Tabelle.

Betonüberdeckung [cm]	Heizungsunterbrechung [h]	Heizmitteltemperatur [°C]	Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	8	28,0	476,1	97%
5	12	28,4	438,5	89%
5	16	29,2	390,2	80%
10	8	28,6	489,2	100%
10	12	29,0	454,9	93%
10	16	30,0	419,5	86%
15	8	29,1	490,2	100%
15	12	29,5	457,4	93%
15	16	30,5	423,1	86%

Tab. 4.24: Von der aktivierten Decke in einem Tag an den Raum abgegebene Registerflächenbezogene Wärmemengen in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung und der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe

Bei Betonüberdeckungen von über 10 cm Dicke ergeben sich in Abhängigkeit von der Dauer der Heizungsunterbrechung nahezu gleiche flächenbezogene tägliche Wärmeabgabemengen. Liegt das Register näher an der Oberfläche (5 cm Betonüberdeckung), so ergeben sich etwas niedrigere Wärmeabgabemengen. Die prozentuellen Angaben in Tab. 4.24 dienen der leichteren Orientierung und beziehen sich auf die maximale für einen Tag errechnete Wärmeabgabemenge. Diese stellt sich bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Umwälzpumpe und einer Lage des Rohrregisters mit 15 cm Betonüberdeckung mit 490,2 Whm⁻² ein.

Bei Erhöhung der Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 auf 12 Stunden sinkt die Wärmeabgabemenge im Fall einer Betonüberdeckung über 10 cm um 7%. Eine weitere Erhöhung der Heizungsunterbrechung auf 16 Stunden reduziert die mögliche Wärmeabgabemenge um weitere 7%. Im Fall einer Betonüberdeckung von 5 cm ergeben sich analog 8% (Sprung von 8 auf 12 h Unterbrechungsdauer) bzw. 9% (Sprung von 12 h auf 16 h Unterbrechungsdauer).

Conclusio:

Die vertiefenden Detailuntersuchungen zur Auswirkung der Betonüberdeckung des Heizregisters auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke bei unregelmäßiger Wärmezufuhr führen auf folgende Ergebnisse:

- Mit größer werdender Betonüberdeckung des Rohrregisters sinkt bei gleich gehaltener Heizmitteltemperatur die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung an den unter der thermisch aktivierten Decke gelegenen Raum.
- Die pro Tag an den Raum abgegebene flächenbezogene Wärmemenge sinkt im Fall der 8-stündigen Heizungsunterbrechung bei einer Erhöhung der Betonüberdeckung von 5 auf 15 cm um 13%. Bei einer 16-stündigen Heizungsunterbrechung, d. h. einer Beladungszeit von nur 8 Stunden Dauer, beträgt die entsprechende Abnahme nur mehr 8%. Der Einfluss der Betonüberdeckung sinkt somit mit ansteigender Dauer der Heizungsunterbrechung.

- Mit größer werdender Betonüberdeckung des Rohrregisters sinkt bei gleich gehaltener Heizmitteltemperatur die maximale Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht. Dies bedeutet, dass bei größerer Betonüberdeckung höhere Heizmitteltemperaturen unter Wahrung des thermischen Komforts im Raum zulässig sind.
- Wird die Heizmitteltemperatur derart gesetzt, dass unabhängig von der Lage des Rohrregisters eine Obergrenze der mittleren Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht im Tagesverlauf nicht überschritten wird, so ist die während eines Tages an den Raum abgegebene Wärmemenge für eine Betonüberdeckung von 10 cm in etwa gleich wie jene bei 15 cm Betonüberdeckung. Dies gilt für alle untersuchten Dauern der Heizungsunterbrechung.
- Bei einer Betonüberdeckung von 5 cm liegt die während eines Tages an den Raum abgegebene Wärmemenge im Fall einer Heizungsunterbrechung von 8 Stunden Dauer ca. 3% unter jener, die für Betonüberdeckungen von 10 bzw. 15 cm errechnet wurde. Bei 16 Stunden Heizungsunterbrechung steigt diese Reduktion auf ca. 8% an. Für den Fall kurzer Beladungszeiten erweist sich daher eine größere Betonüberdeckung des Rohrregisters als günstiger.

Im Folgenden wird die Auswirkung der Betonüberdeckung des Rohrregisters für den Fall der Kühlung untersucht. Bei einer angenommenen Kühlmitteltemperatur von 18 °C ergeben sich für eine Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr von 18⁰⁰ bis 2⁰⁰ früh die folgenden Tagesverläufe für die flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistungen der thermisch aktivierten Decke.

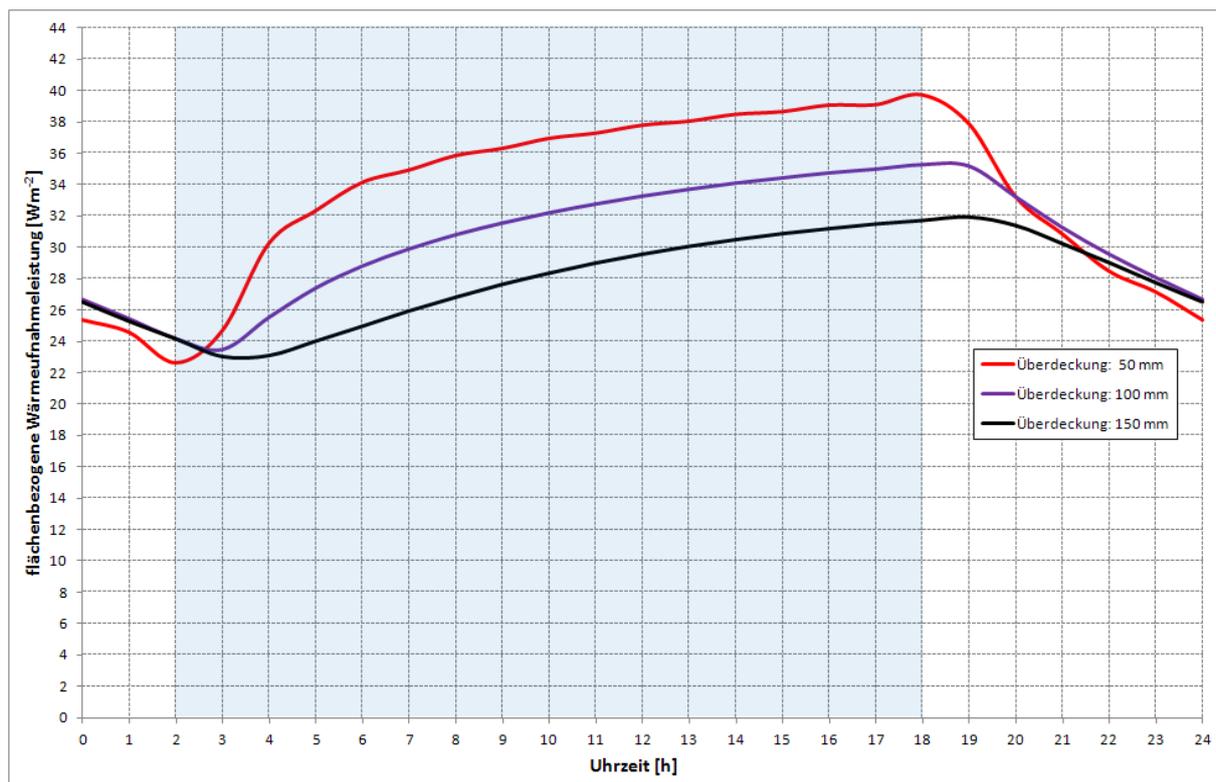


Abb. 4.31: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr

Die unterschiedliche Position des Rohrregisters wirkt sich dahin gehend aus, dass während des Betriebs der Umwälzpumpe (in Abb. 4.31 blau hinterlegt) die Wärmeaufnahme der Geschöß-

decke umso höher ausfällt, je näher das Rohrregister an der Untersicht der Decke positioniert ist. Nach Abschaltung der Umwälzpumpe sinkt die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung langsam ab.

Die folgende Tabelle zeigt als Auswertung der in Abb. 4.31 gezeigten Zeitverläufe die während eines Tages aus dem unter der aktivierten Decke gelegenen Raum aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge.

Betonüberdeckung [cm]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	803,6	100%
10	736,7	92%
15	675,3	84%

Tab. 4.25: Im Tagesverlauf bei **8-stündiger Abschaltung** der Umwälzpumpe aus dem Raum aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters

Es zeigt sich, dass bei gleich gehaltener Kühlmitteltemperatur die von der Decke aus dem Raum im Tagesverlauf aufgenommene Wärmemenge mit steigender Betonüberdeckung des Rohrregisters leicht abnimmt.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistungen im Fall des 12-stündigen Abschaltens der Umwälzpumpe.

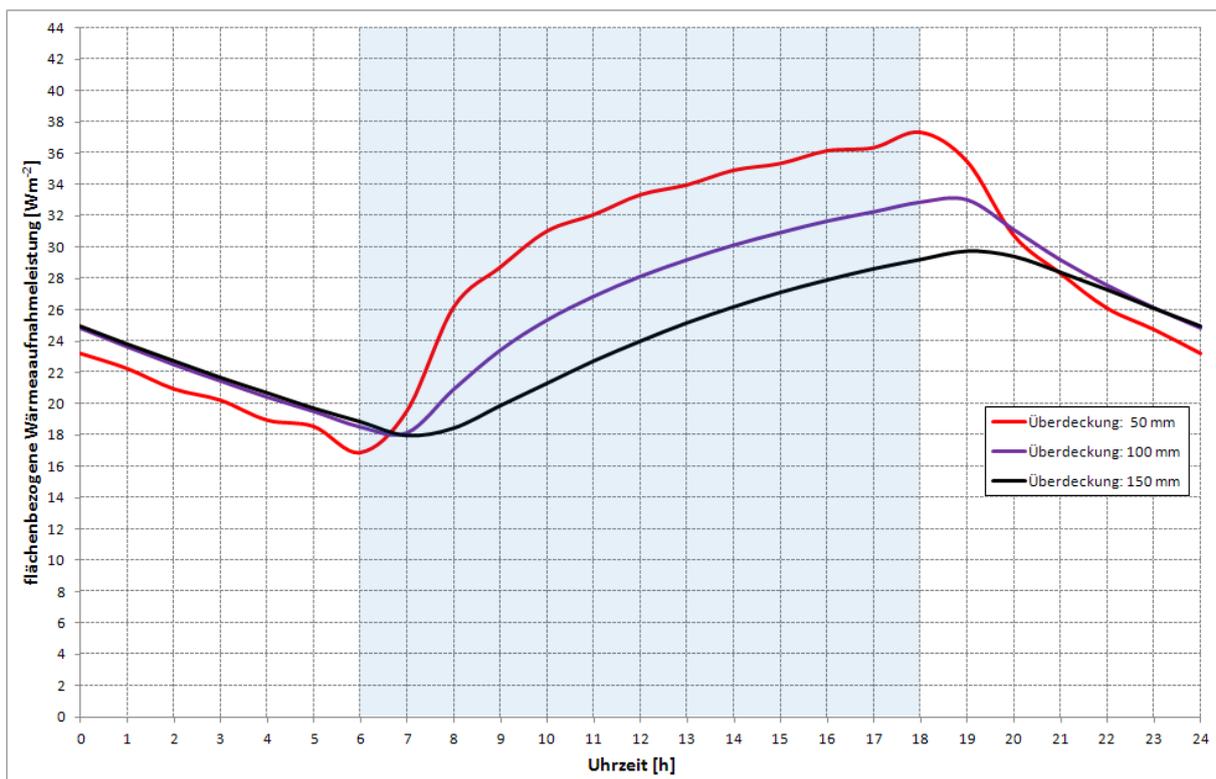


Abb. 4.32: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei einer **12-stündigen Unterbrechung** der Kühlmittelzufuhr

Im Vergleich zu Abb. 4.31 liegen die flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen aufgrund der längeren Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr etwas niedriger. Zudem fällt auf, dass ab 21⁰⁰ bis 6⁰⁰ früh die Wärmeaufnahmeleistung bei 5 cm Betonüberdeckung (rote Linie) etwas niedriger ist als bei höherer Betonüberdeckung.

In folgender Tabelle sind die während eines Tages vom unter der aktivierten Decke gelegenen Raum aufgenommenen flächenbezogenen Wärmemengen angegeben.

Betonüberdeckung [cm]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	671,1	100%
10	627,7	94%
15	582,0	87%

Tab. 4.26: Im Tagesverlauf bei 12-stündiger Abschaltung der Umwälzpumpe aus dem Raum aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters

Die Abnahme der flächenbezogenen Wärmemenge mit der Betonüberdeckung erweist sich bei steigender Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr als weniger ausgeprägt (siehe zum Vergleich Tab. 4.25).

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistungen im Fall eines 16-stündigen Abschaltens der Umwälzpumpe.

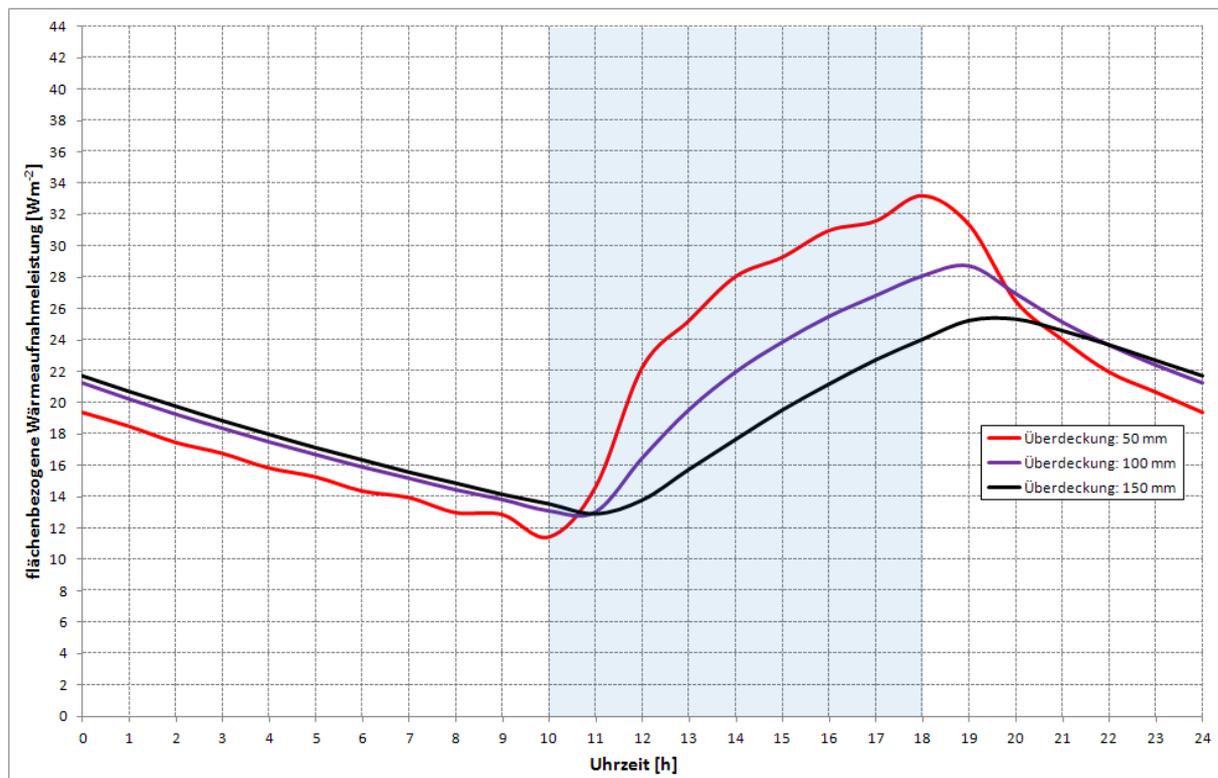


Abb. 4.33: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei einer 16-stündigen Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr

Im Vergleich zu Abb. 4.31 und Abb. 4.32 liegen die flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen bei der sehr lang gewählten Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr etwas niedriger.

In folgender Tabelle sind die während eines Tages dem unter der aktivierten Decke gelegenen Raum entzogenen flächenbezogenen Wärmemengen angegeben.

Betonüberdeckung [cm]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	508,7	100%
10	487,9	96%
15	459,9	90%

Tab. 4.27: Im Tagesverlauf bei **16-stündiger Abschaltung** der Umwälzpumpe aus dem Raum aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters

Bei den bisher in diesem Abschnitt präsentierten Untersuchungen wurde für alle Varianten die Kühlmitteltemperatur auf 18 °C konstant gehalten. Wie bereits ausführlich angesprochen, muss zur Wahrung eines hohen Komforts im Raum verhindert werden, dass die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht unter einen vorgegebenen Grenzwert abfällt. Der untere Grenzwert für die mittlere Oberflächentemperatur wurde bei einer Obergrenze für die Solltemperatur von 26 °C mit 22,5 °C festgelegt.

In den folgenden drei Abbildungen sind die Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur der Untersicht der thermisch aktivierten Decke für eine Kühlmitteltemperatur von 18 °C in Abhängigkeit von der Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr und von der Betonüberdeckung ausgewiesen.

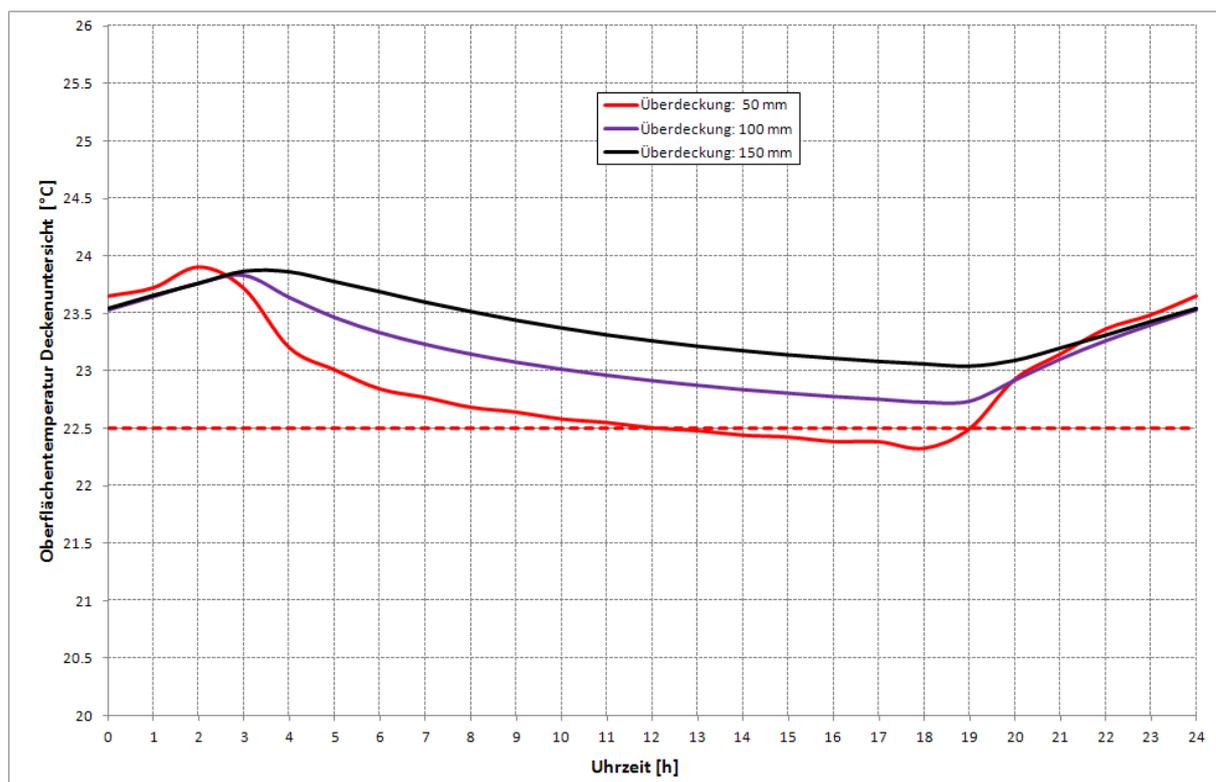


Abb. 4.34: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **8-stündigen Unterbrechung** der Kühlmittelzufuhr; Kühlmitteltemperatur: 18 °C

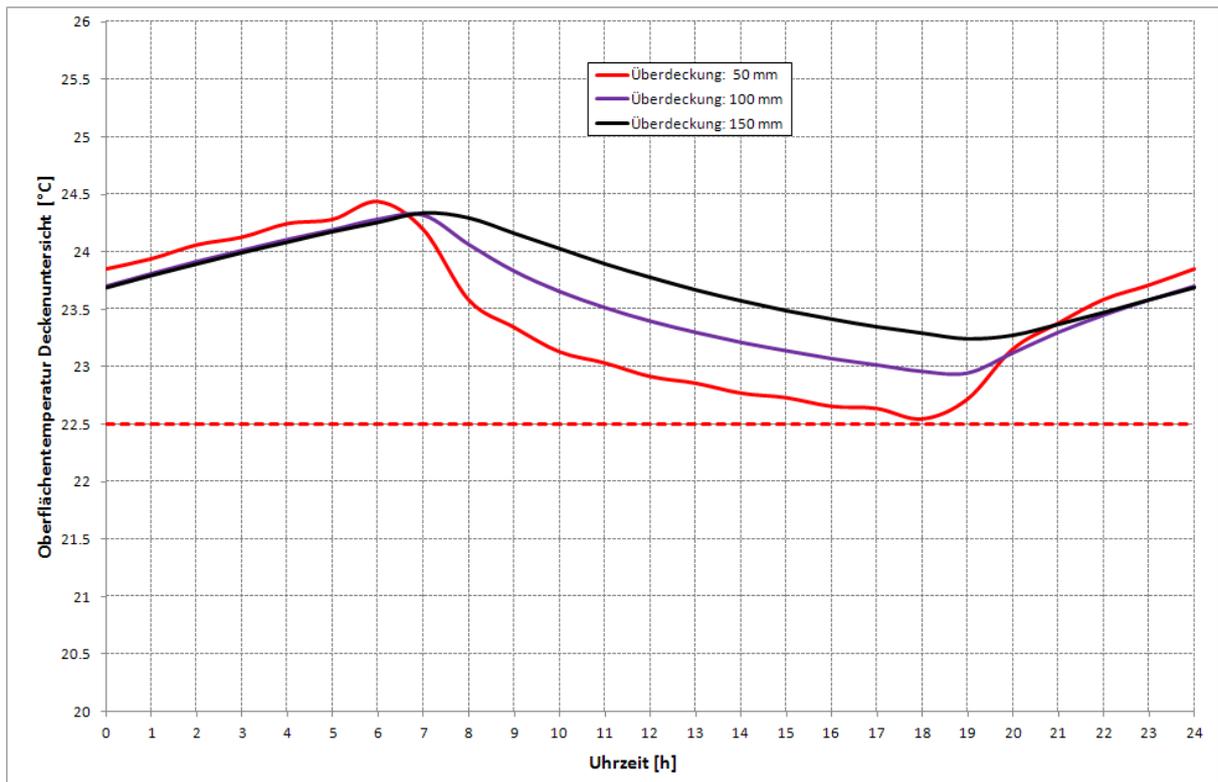


Abb. 4.35: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **12-stündigen Unterbrechung** der Kühlmittelzufuhr; Kühlmitteltemperatur: 18 °C

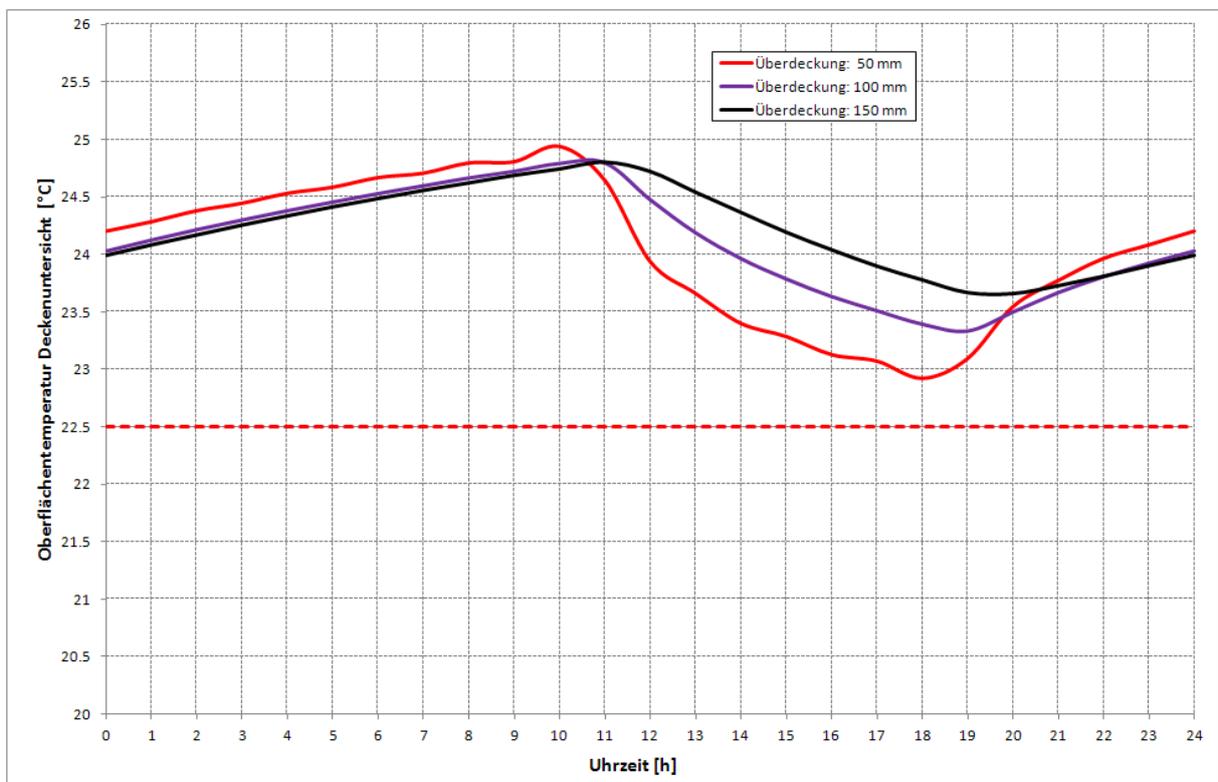


Abb. 4.36: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **16-stündigen Unterbrechung** der Kühlmittelzufuhr; Kühlmitteltemperatur: 18 °C

Es zeigt sich, dass die gewählte Kühlmitteltemperatur von 18 °C bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr (Abb. 4.34) nur für den Fall mit 5 cm Betonüberdeckung zu niedrig ist, um das Kriterium für die mittlere Oberflächentemperatur zu erfüllen. Bei einer Unterbrechungsdauer von 12 Stunden (Abb. 4.35) sind 18 °C Kühlmitteltemperatur für 5 cm Betonüberdeckung genau geeignet. Für höhere Werte der Betonüberdeckung kann die Kühlmitteltemperatur abgesenkt werden. Im Fall der 16-stündigen Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr (Abb. 4.36) kann die Kühlmitteltemperatur in allen Fällen abgesenkt werden.

Um die Untergrenze für die Kühlmitteltemperatur abzuschätzen, wird im Folgenden die Kühlmitteltemperatur in Schritten von 0,1 K so lange variiert, bis die Untergrenze für die mittlere Oberflächentemperatur von 22,5 °C im Tagesverlauf gerade nicht unterschritten wird. Die folgende Tabelle zeigt die derart errechneten, minimal zulässigen Kühlmitteltemperaturen.

Betonüberdeckung [cm]	Kühlungsunterbrechung [h]	min. Kühlmitteltemperatur [°C]
5	8	18,4
5	12	18,0
5	16	17,0
10	8	17,5
10	12	16,9
10	16	15,6
15	8	16,6
15	12	15,9
15	16	14,2

Tab. 4.28: Minimal zulässige Kühlmitteltemperaturen in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung und der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe

Es zeigt sich, dass bei Erhöhung der Betonüberdeckung von 5 auf 10 cm, aber auch von 10 auf 15 cm, die Kühlmitteltemperatur bei einer Unterbrechungsdauer von 8 Stunden um 0,9 K abgesenkt werden kann. Bei einer 12-stündigen Unterbrechung erhöht sich dieser Wert auf ca. 1,1 K, bei 16-stündiger Unterbrechung auf 1,4 K.

Unabhängig von der Betonüberdeckung erlaubt die Verlängerung der Dauer der Kühlungsunterbrechung eine deutliche Absenkung der Kühlmitteltemperatur. Bei Erhöhung der Stillstandszeit der Umwälzpumpe von 8 auf 16 Stunden kann die Kühlmitteltemperatur bei einer Betonüberdeckung von 5 cm um 1,4 K abgesenkt werden. Bei einer Betonüberdeckung von 15 cm beträgt die entsprechende Temperaturdifferenz 2,4 K.

Wird die errechnete maximal zulässige Kühlmitteltemperatur gemäß Tab. 4.28 den Simulationen zugrunde gelegt, so ergeben sich die Tagessummen der an den Raum abgegebenen Wärmemengen gemäß folgender Tabelle.

Betonüberdeckung [cm]	Kühlungsunterbrechung [h]	Kühlmitteltemperatur [°C]	Wärmemenge [Whm ⁻²]	
5	8	18,4	763,4	96%
5	12	18,0	671,1	85%
5	16	17,0	572,3	72%
10	8	17,5	782,7	99%
10	12	16,9	714,0	90%
10	16	15,6	634,3	80%
15	8	16,6	793,5	100%
15	12	15,9	734,8	93%
15	16	14,2	678,3	85%

Tab. 4.29: Von der aktivierten Decke in einem Tag aufgenommene registerflächenbezogene Wärmemengen in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung und der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe

Die prozentuellen Angaben in Tab. 4.29 dienen der leichteren Orientierung und beziehen sich auf die maximale für einen Tag errechnete Wärmehaufnahmehenge. Diese stellt sich bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Umwälzpumpe und einer Lage des Rohrregisters mit 15 cm Betonüberdeckung mit 793,5 Whm⁻² ein.

Conclusio:

Die vertiefenden Detailuntersuchungen zur Auswirkung der Betonüberdeckung des Kühlregisters auf die flächenbezogene Wärmehaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke bei unregelmäßigem Betrieb der Umwälzpumpe führen auf folgende Ergebnisse:

- Mit größer werdender Betonüberdeckung des Rohrregisters sinkt bei gleich gehaltener Kühlmitteltemperatur die flächenbezogene Wärmehaufnahmeleistung aus dem unter der thermisch aktivierten Decke gelegenen Raum.
- Die pro Tag dem Raum entzogene flächenbezogene Wärmehenge sinkt bei gleich gehaltener Kühlmitteltemperatur bei einer 8-stündigen Kühlungsunterbrechung mit der Erhöhung der Betonüberdeckung von 5 auf 15 cm um 14%. Bei einer 16-stündigen Kühlungsunterbrechung, d. h. einer Entladungszeit von nur 8 Stunden Dauer, beträgt die entsprechende Abnahme nur mehr 10%. Der Einfluss der Betonüberdeckung sinkt somit mit ansteigender Dauer der Kühlungsunterbrechung.
- Mit größer werdender Betonüberdeckung des Rohrregisters steigt bei gleich gehaltener Kühlmitteltemperatur die minimale Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht an. Dies bedeutet, dass bei größerer Betonüberdeckung niedrigere Kühlmitteltemperaturen zulässig sind, ohne dass der thermische Komfort im Raum beeinträchtigt wäre.
- Wird die Kühlmitteltemperatur derart gesetzt, dass unabhängig von der Lage des Rohrregisters eine Untergrenze der mittleren Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht im Tagesverlauf nicht unterschritten wird, so ist die während eines Tages von der thermisch aktivierten Decke aufgenommene Wärmehenge für eine Betonüberdeckung von

5 cm niedriger als bei einer Betonüberdeckung von 10 bzw. 15 cm. Dies gilt für alle untersuchten Dauern der Kühlungsunterbrechung.

- Bei einer Betonüberdeckung von 5 cm liegt die während eines Tages an den Raum abgegebene Wärmemenge im Fall einer Kühlungsunterbrechung von 8 Stunden Dauer ca. 4% unter jener, die für Betonüberdeckungen von 15 cm errechnet wurde. Bei 16 Stunden Kühlungsunterbrechung steigt diese Reduktion auf ca. 16% an. Für den Fall kurzer Beladungszeiten erweist sich daher eine größere Betonüberdeckung des Rohrregisters als günstiger.

IV.1.3.1.2 Einfluss der Plattendicke

Bisher wurden die Berechnungen für eine Geschoßdecke mit dem in Tab. 4.1 gezeigten Aufbau durchgeführt. Die Dicke der Stahlbetonplatte blieb damit mit 25 cm unverändert. Nun soll untersucht werden, in wie weit eine Veränderung der Dicke der Stahlbetonplatte das thermische Verhalten der thermisch aktivierten Decke bei unregelmäßiger Wärmezufuhr beeinflusst.

Sowohl der Rohrabstand von 15 cm als auch die Dimension des Heizrohrs bleiben unverändert. Die Position des Rohrregisters wird vorerst als oberflächennah mit einer Betonüberdeckung von 5 cm angesetzt.

Wie bisher wird angenommen, dass die Heizmitteltemperatur tageszeitlich konstant ist. Als Heizmitteltemperatur wird jeweils der nach Tab. 4.23 als maximal zulässig erkannte Wert angesetzt. Für eine Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 Stunden beträgt dieser Wert somit 28,0 °C, für 12 h 28,4 °C und für 16 h 29,2 °C. Natürlich werden die genannten Werte der Heizmitteltemperatur für alle untersuchten Plattendicken als gleich angenommen.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung an den unter der Geschoßdecke liegenden Raum für drei unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte (20 cm, 25 cm und 30 cm) und drei unterschiedliche Unterbrechungsintervalle für die Heizmitteltemperatur (8 h, 12 h und 16 h).

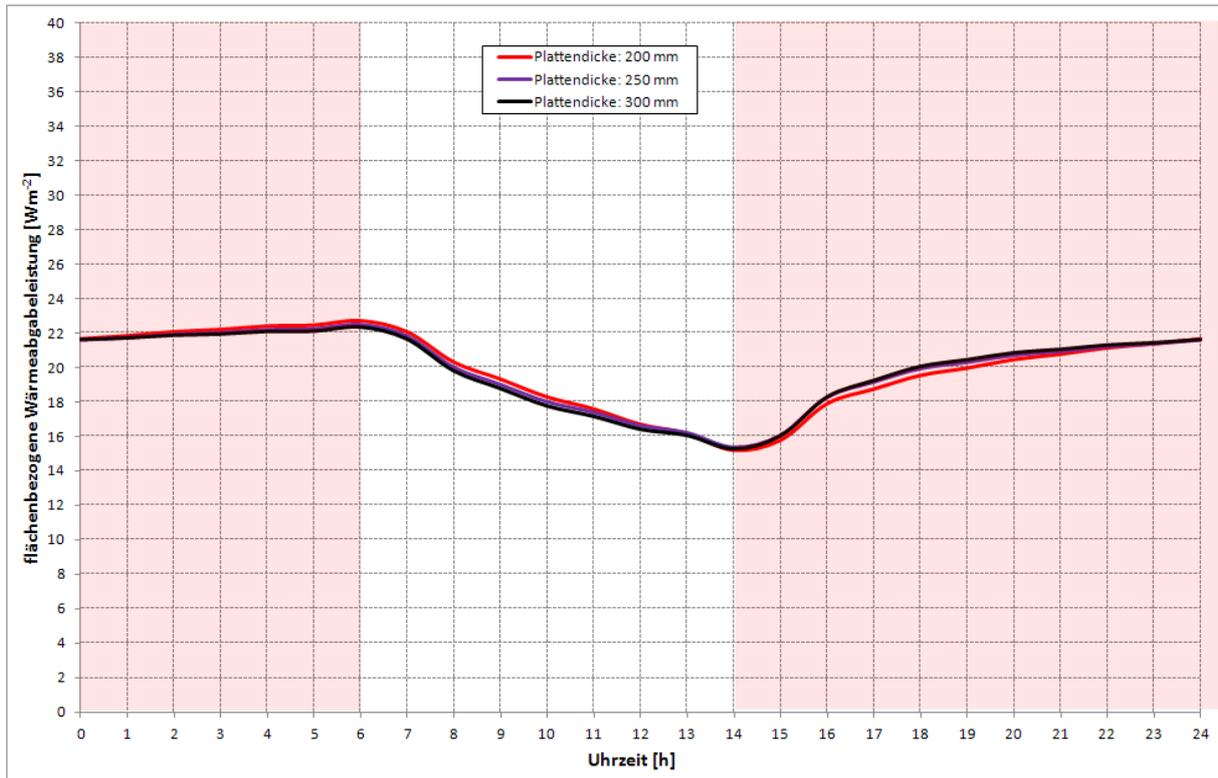


Abb. 4.37: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 8 h**

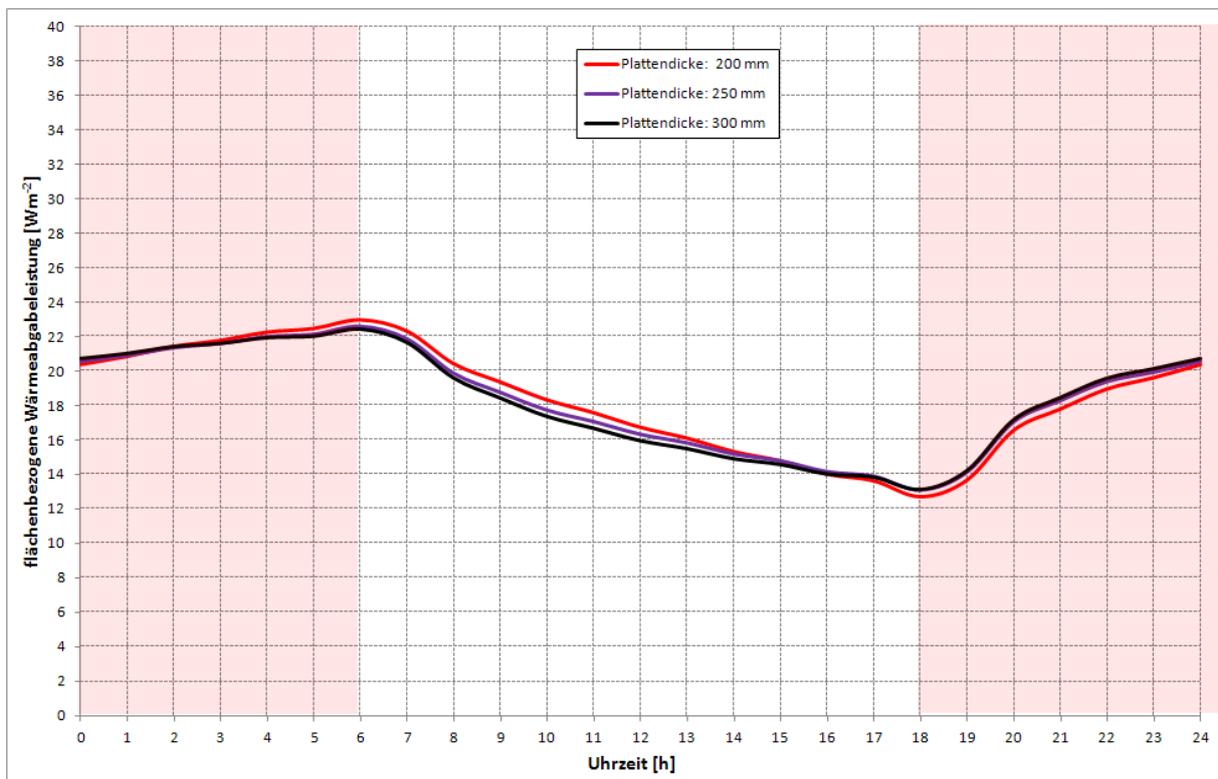


Abb. 4.38: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 12 h**

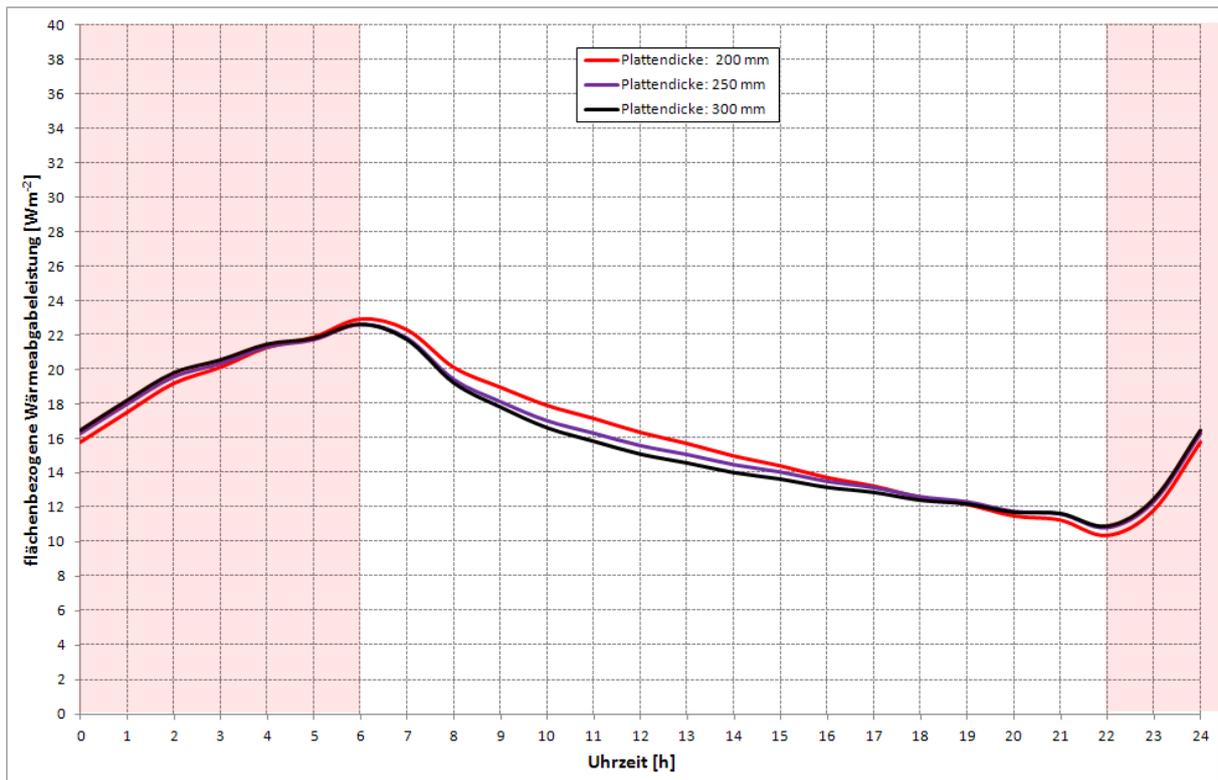


Abb. 4.39: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 16 h

Ersichtlich ist die Auswirkung der Plattendicke auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung klein. Erst bei größer werdender Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr zeigt sich ein Unterschied. Aus Abb. 4.39 ist ersichtlich, dass die Verkleinerung der Plattendicke auf 20 cm auf eine etwas höhere Tagesschwankung der Wärmeabgabeleistung führt. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da eine dünnere Stahlbetonplatte eine geringere Wärmespeicherfähigkeit besitzt als eine dickere. Der Unterschied zwischen den berechneten Tagesverläufen der Wärmeabgabeleistung für die Plattendicken von 25 cm und 30 cm ist selbst bei einer Unterbrechungsdauer von 16 h kaum noch auszumachen.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht.

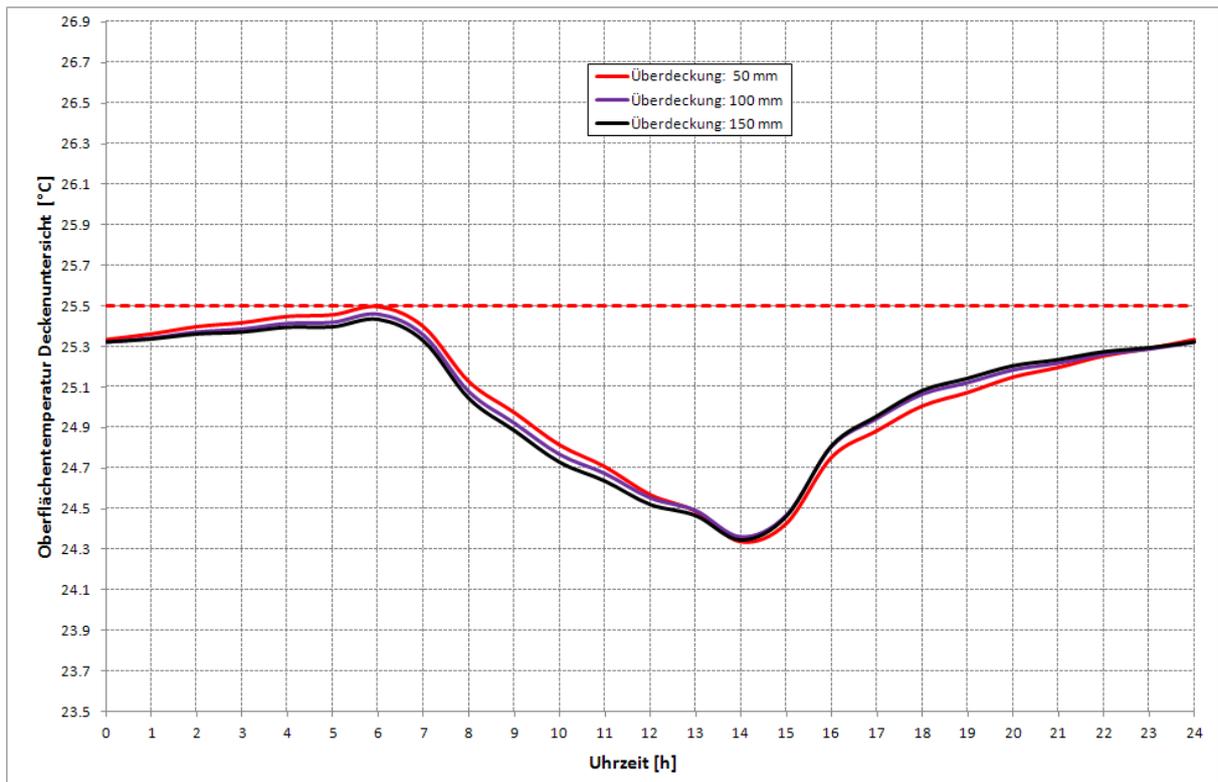


Abb. 4.40: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 8 h

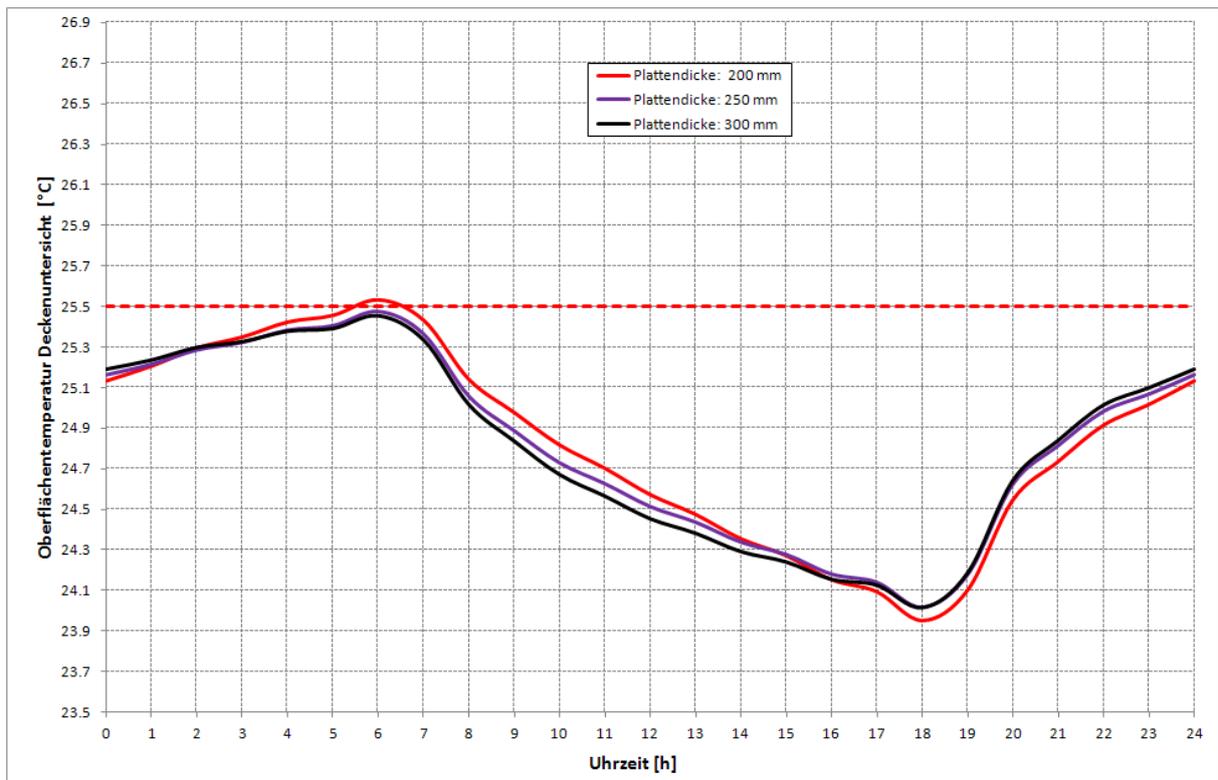


Abb. 4.41: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 12 h

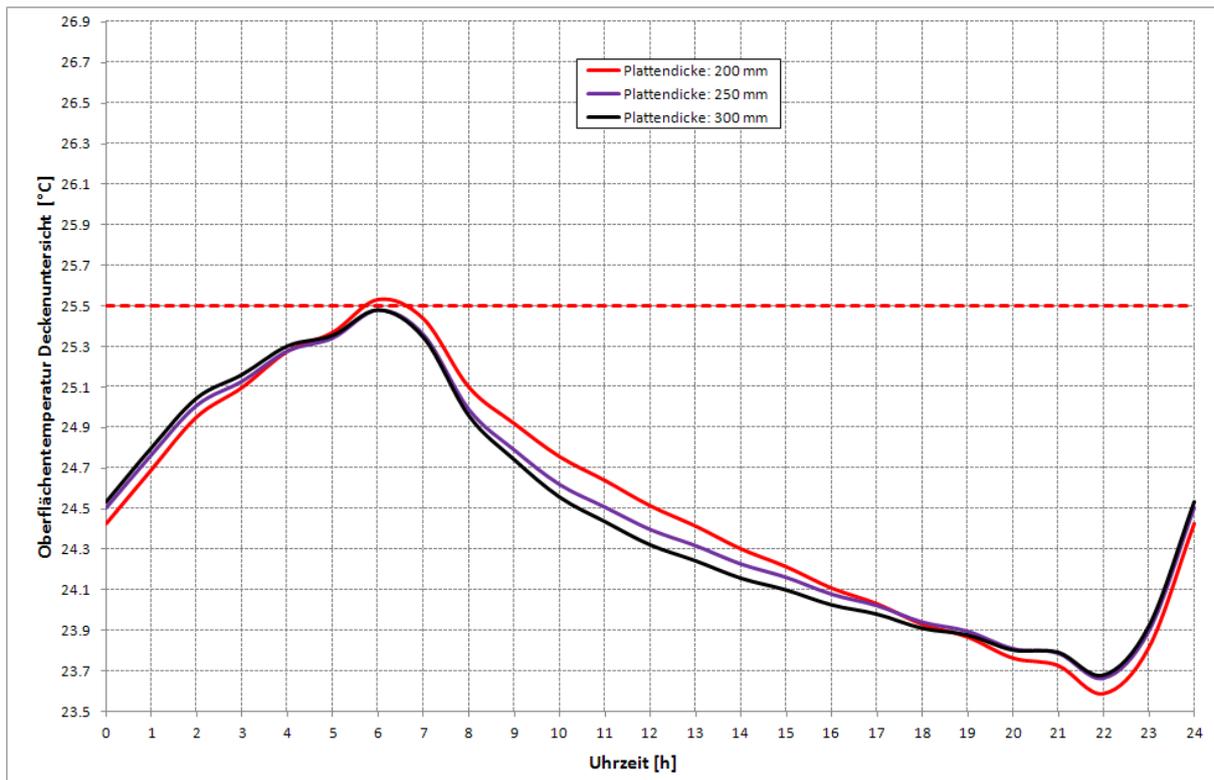


Abb. 4.42: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 16 h

Bei einer Plattendicke von 20 cm zeigt sich, dass die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur etwas größer ist als bei den größeren Dicken der Stahlbetonplatte. Dies führt zu einer kleinen Überschreitung der Obergrenze von 25,5 °C in einem engen Zeitraum um den Zeitpunkt des Abschaltens der Heizmittelzufuhr um 6⁰⁰ früh.

Die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur zeigt sich hauptsächlich von der angenommenen Dauer der Heizunterbrechung abhängig. Bei einer Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 Stunden ist diese Schwankung mit 1,1 K (Plattendicke größer 25 cm) bzw. 1,2 K (Plattendicke 20 cm) am kleinsten. Bei einem Unterbrechungsintervall von 16 Stunden Länge sind die entsprechenden Tagesschwankungen mit 1,8 K (Plattendicke größer 25 cm) bzw. 1,9 K (Plattendicke 20 cm) etwas größer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Dicke der Stahlbetonplatte keine gravierende Auswirkung auf das thermische Verhalten der aktivierten Geschoßdecke hat, wenn das Rohrregister mit einer Betonüberdeckung von 5 cm oberflächennah positioniert ist.

Um den Einfluss der Position des Rohrregisters in der Betonplatte auf das thermische Verhalten bei unregelmäßiger Wärmezufuhr zu ermitteln, werden die Berechnungen für eine Betonüberdeckung von 15 cm wiederholt.

Die geänderte Rohrposition erlaubt auch eine Erhöhung der Heizmitteltemperatur – siehe Tab. 4.23. Für eine Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 Stunden werden nun für die Heizmitteltemperatur 29,1 °C, für 12 h 29,5 °C und für 16 h 30,5 °C unabhängig von der Plattendicke angesetzt. Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung an den unter der Geschoßdecke liegenden Raum für drei unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte (20cm, 25 cm und 30 cm) und drei unter-

schiedliche Unterbrechungsintervalle für die Zufuhr des Heizmittels (8 h, 12 h und 16 h) im Falle einer Rohrregisterposition von 15 cm Betonüberdeckung.

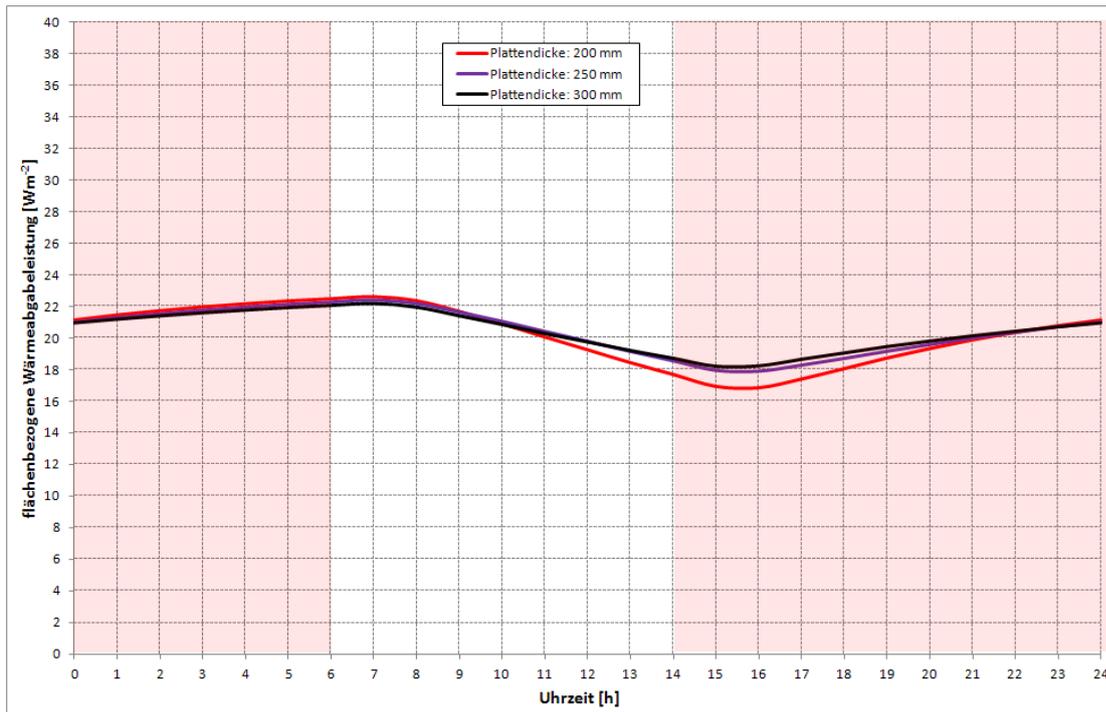


Abb. 4.43: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; **Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 8 h;** Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

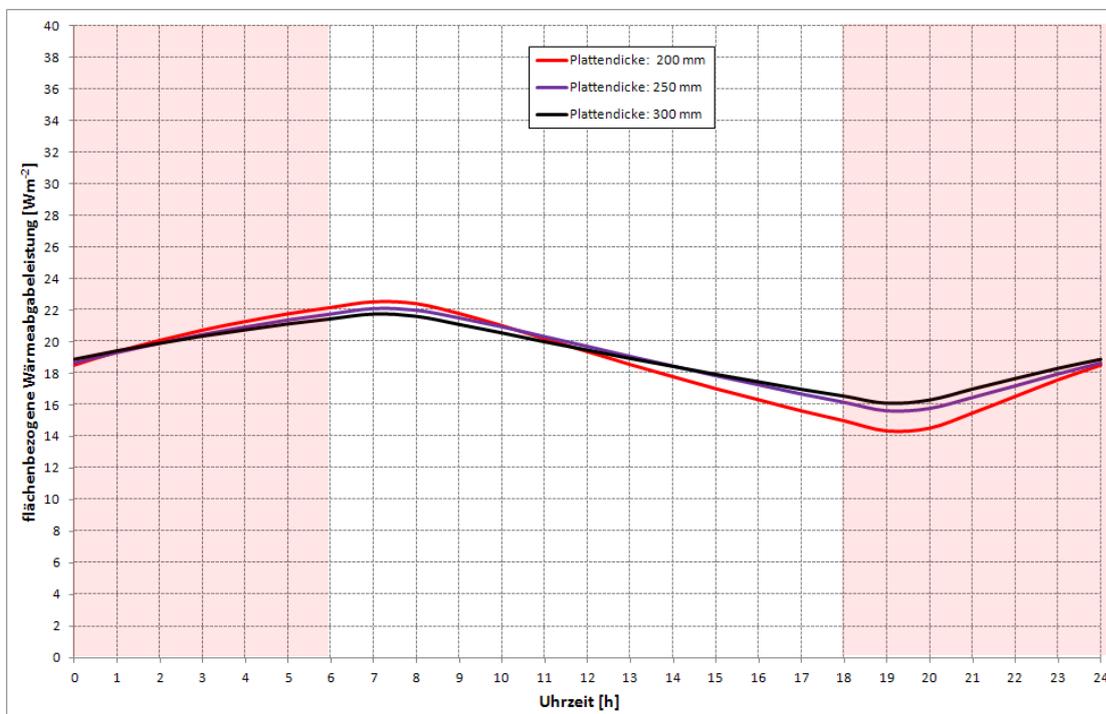


Abb. 4.44: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; **Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 12 h;** Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

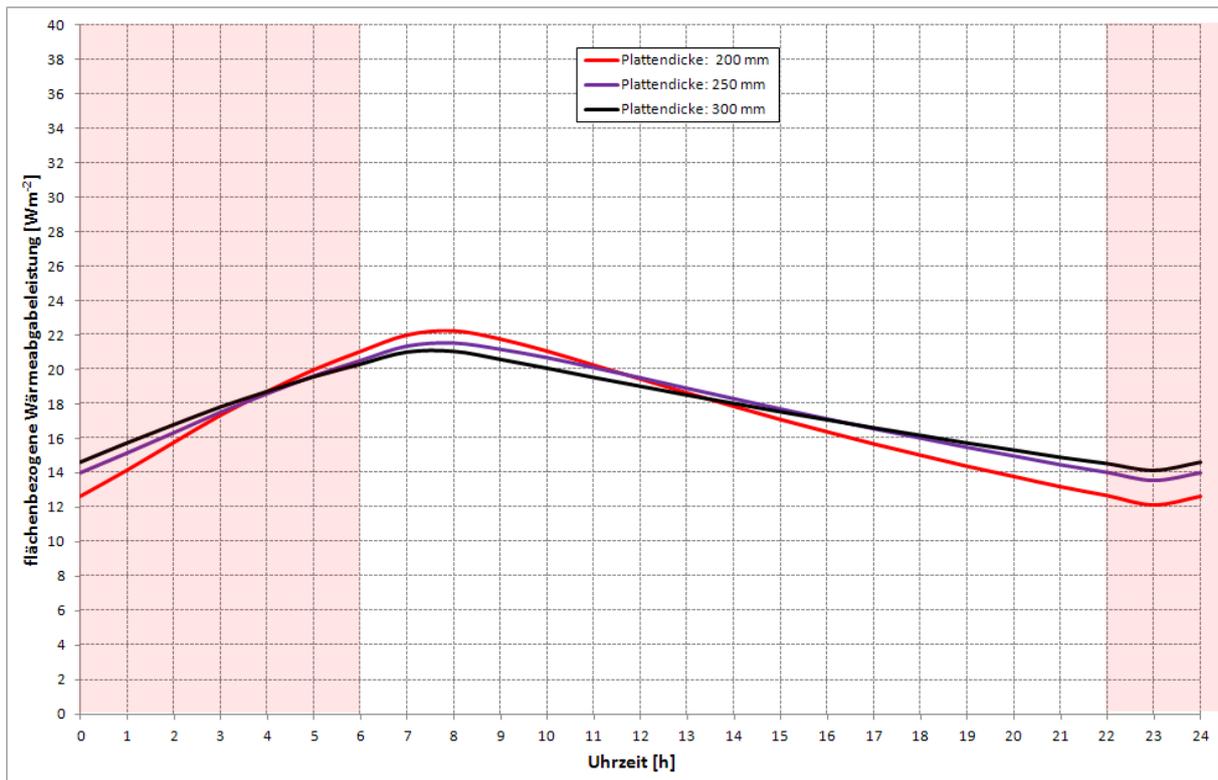


Abb. 4.45: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; **Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 16 h;** Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

Aufgrund der größeren Betonüberdeckung wird die Tagesschwankung der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung an den unter der thermisch aktivierten Geschoßdecke liegenden Raum deutlich kleiner. Zudem fällt auf, dass sich zwischen dem Zeitpunkt der Abschaltung der Heizmittelzufuhr um 6⁰⁰ und dem Absinken der Wärmeabgabeleistung eine Phasenverschiebung von ca. 1,5 bis 2,0 Stunden Dauer einstellt. Beim Einschalten der Heizmittelzufuhr am Nachmittag bzw. Abend und in der Nacht stellt sich ein ähnlicher Effekt ein. Die Phasenverschiebung ist jedoch mit 1,0 bis 1,5 Stunden etwas kleiner.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht für den Fall, dass das Rohrregister mit einer Betonüberdeckung von 15 cm in die Geschoßdecke eingebaut ist.

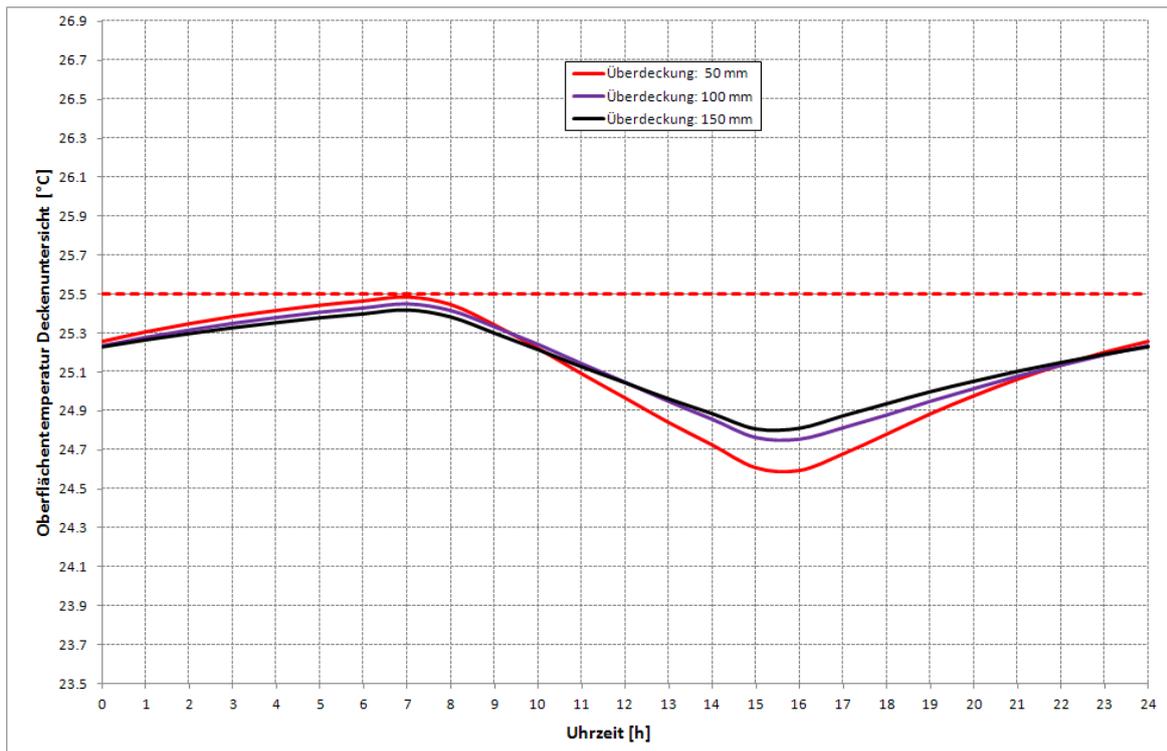


Abb. 4.46: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 8 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

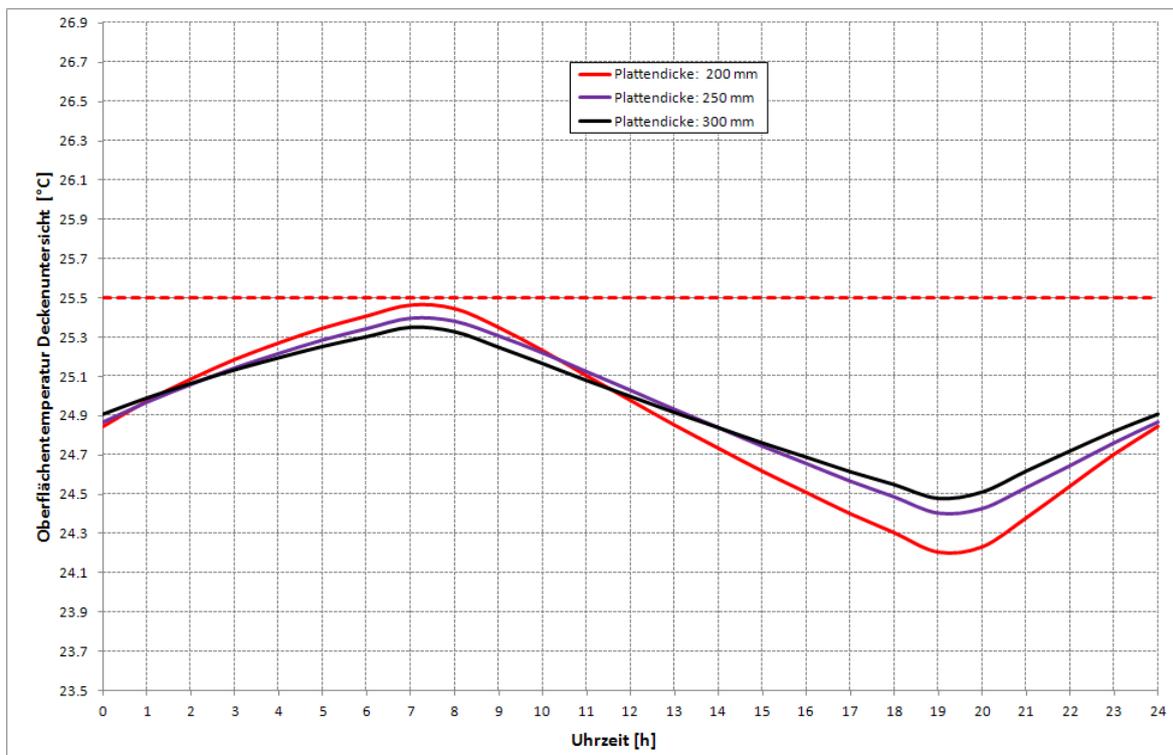


Abb. 4.47: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 12 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

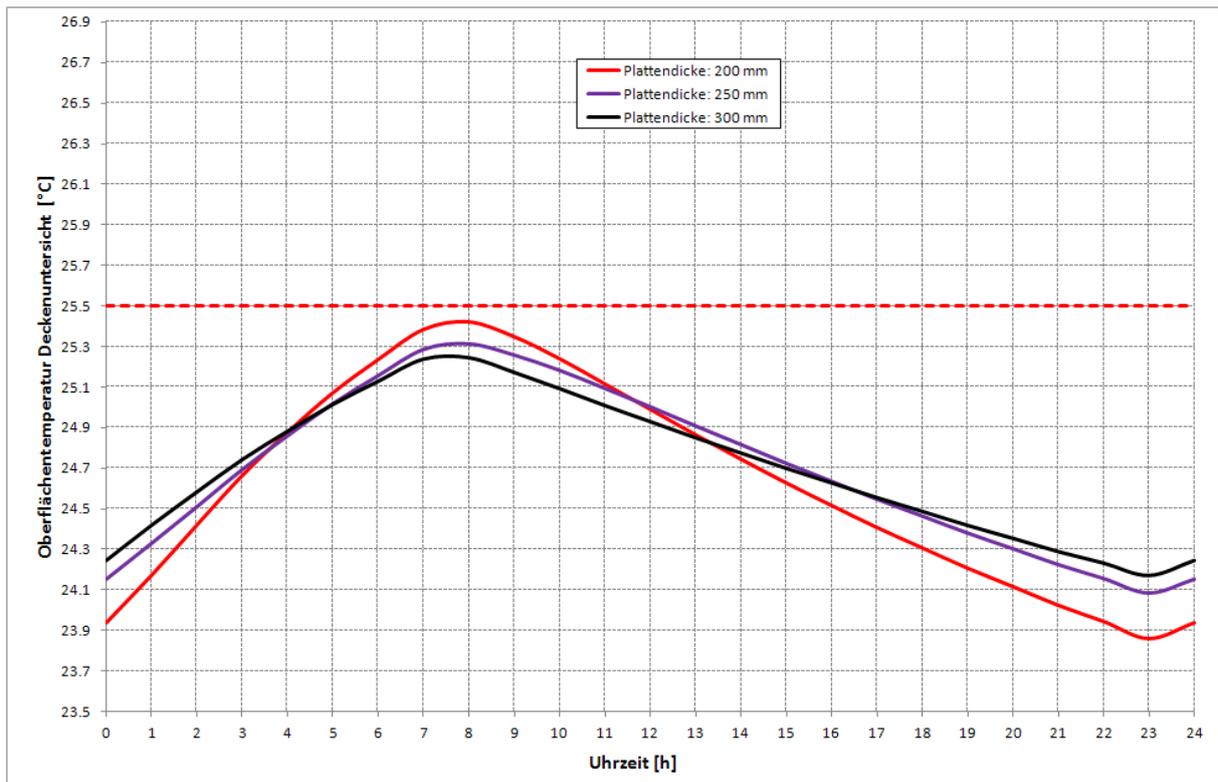


Abb. 4.48: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 16 h; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

Auch bei einer Betonüberdeckung von 15 cm zeigt sich, dass die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur bei einer Plattendicke von 20 cm größer ist als bei den größeren Dicken der Stahlbetonplatte. Da die mittleren Oberflächentemperaturen aber niedriger liegen als im Fall der oberflächennahen Lage des Rohrregisters (siehe Abb. 4.40 bis Abb. 4.42), wird die gesetzte Obergrenze für die Oberflächentemperatur in keinem Fall überschritten.

Die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur hat eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Dauer der Heizunterbrechung. Bei einer Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 Stunden ist diese Schwankung mit 0,9 K (Plattendicke 20 cm), 0,7 K (Plattendicke 25 cm) bzw. 0,6 K (Plattendicke 30 cm) am kleinsten. Bei einem Unterbrechungsintervall von 16 Stunden Länge sind die entsprechenden Tagesschwankungen mit 1,6 K (Plattendicke 20 cm), 1,2 K (Plattendicke 25 cm) bzw. 1,1 K (Plattendicke 30 cm) deutlich größer.

Ein Vergleich zwischen Abb. 4.40 bis Abb. 4.42 und Abb. 4.46 bis Abb. 4.48 zeigt, dass die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur bei steigender Betonüberdeckung deutlich kleiner wird, obwohl bei der Betonüberdeckung von 15 cm mit höheren Heizmitteltemperaturen gerechnet wurde als bei der oberflächennahen Lage des Rohrregisters (Überdeckung 5,0 cm).

Conclusio:

Die durchgeführten rechnerischen Untersuchungen zum Einfluss der Dicke der Stahlbetonplatte auf das thermische Verhalten einer thermisch aktivierten Geschoßdecke führen auf folgende Ergebnisse:

- Unter den im Tagesrhythmus schwankend angesetzten Zeitverläufen der Heizmittelzufuhr ist der Einfluss unterschiedlicher Plattendicken (20, 25 und 30 cm) sowohl auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung als auch auf die Verläufe der mittleren Oberflächentemperatur gering.
- Dünne Stahlbetonplatten (20 cm dick) führen sowohl bei der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung als auch bei den Oberflächentemperaturen zu etwas größeren Tagesschwankungen.
- Der Unterschied zwischen einer 25 cm dicken und einer 30 cm dicken Stahlbetonplatte ist beim Ansatz der Tagesperiode kaum mehr auszumachen.
- Bei oberflächennaher Position des Rohrregisters, also bei kleinen Betonüberdeckungen, wirkt sich die Dicke der Stahlbetonplatte auf das thermische Verhalten weniger aus als bei größeren Betonüberdeckungen.

Im Folgenden wird die Auswirkung der Dicke der Stahlbetonplatte auf das thermische Verhalten im Fall der Kühlung untersucht. Sowohl der Rohrabstand von 15 cm als auch die Dimension des Kühlrohrs bleiben unverändert. Die Position des Rohrregisters wird vorerst als oberflächennah mit einer Betonüberdeckung von 5 cm angesetzt. Wie bisher wird angenommen, dass die Kühlmitteltemperatur tageszeitlich konstant ist. Als Kühlmitteltemperatur wird jeweils der nach Tab. 4.28 als minimal zulässig erkannte Wert angesetzt. Für eine Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 Stunden beträgt dieser Wert somit 18,4 °C, für 12 h 18,0 °C und für 16 h 17,0 °C. Natürlich werden die genannten Werte der Kühlmitteltemperatur für alle untersuchten Plattendicken gleich angesetzt.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung aus dem unter der Geschoßdecke liegenden Raum für drei unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte (20 cm, 25 cm und 30 cm) und drei unterschiedliche Unterbrechungsintervalle für die Heizmitteltemperatur (8 h, 12 h und 16 h).

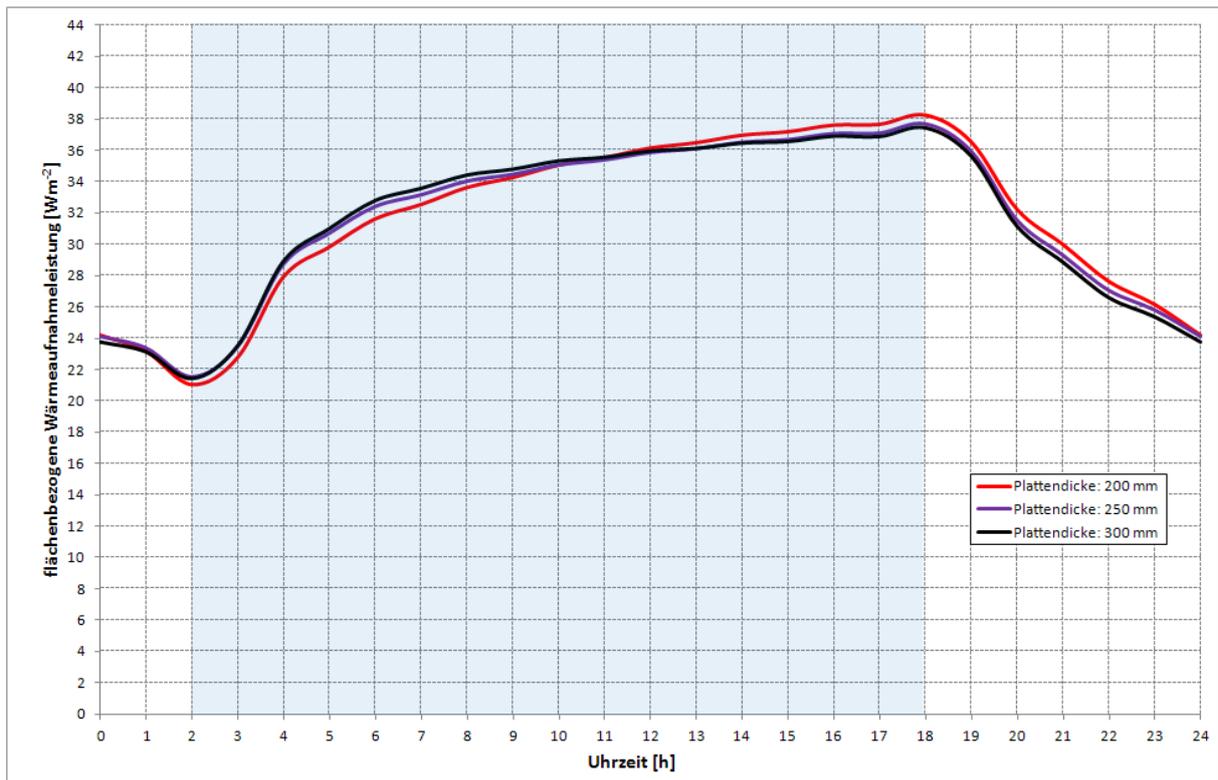


Abb. 4.49: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 8 h**

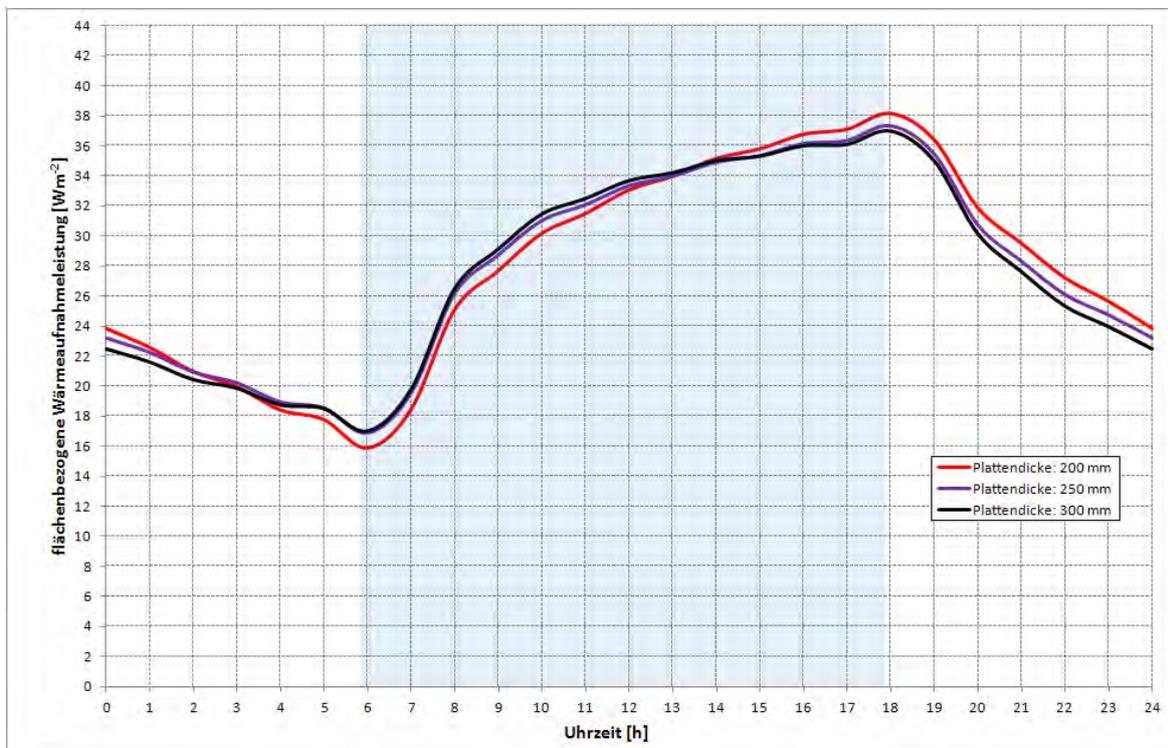


Abb. 4.50: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 12 h**

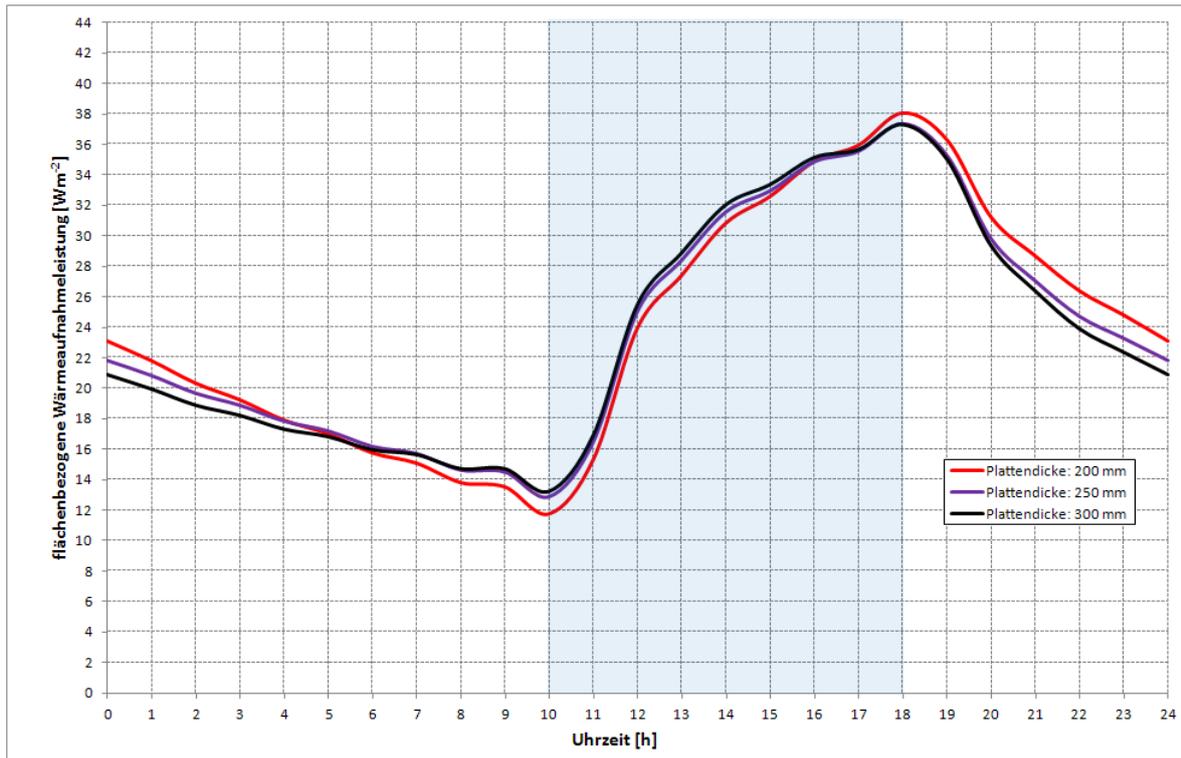


Abb. 4.51: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschosdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: 16 h**

Ersichtlich ist die Auswirkung der Plattendicke auf die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung klein. Erst bei größer werdender Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr zeigt sich ein Unterschied. Aus Abb. 4.51 ist ersichtlich, dass die Verkleinerung der Plattendicke auf 20 cm auf eine etwas höhere Tagesschwankung der Wärmeaufnahmeleistung führt. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da eine dünnere Stahlbetonplatte eine geringere Wärmespeicherfähigkeit besitzt als eine dickere.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht.

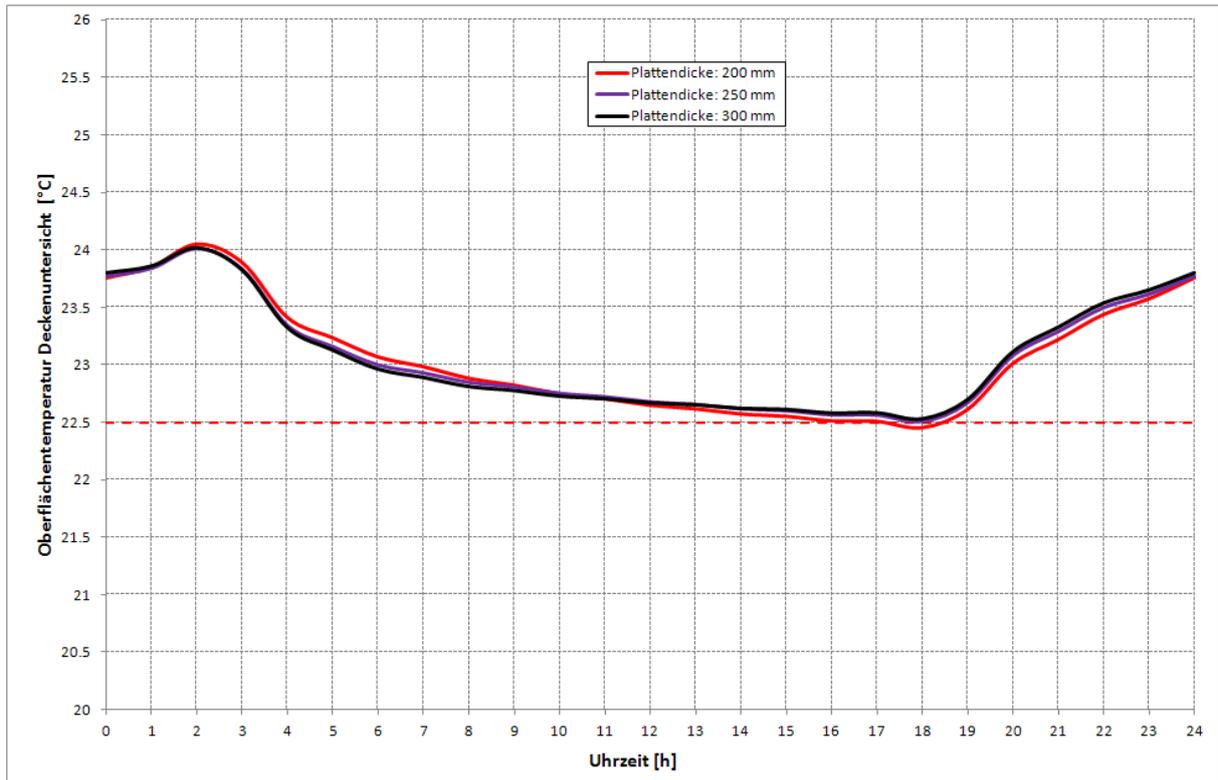


Abb. 4.52: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 8 h

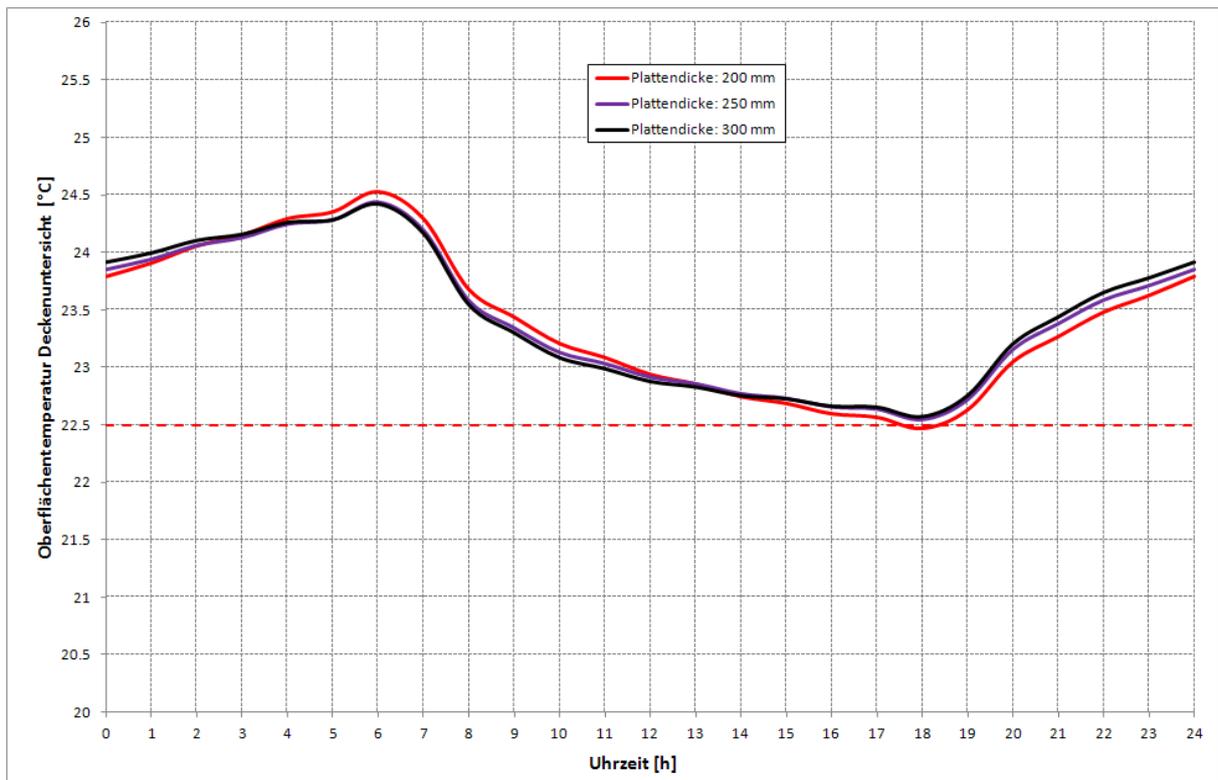


Abb. 4.53: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 12 h

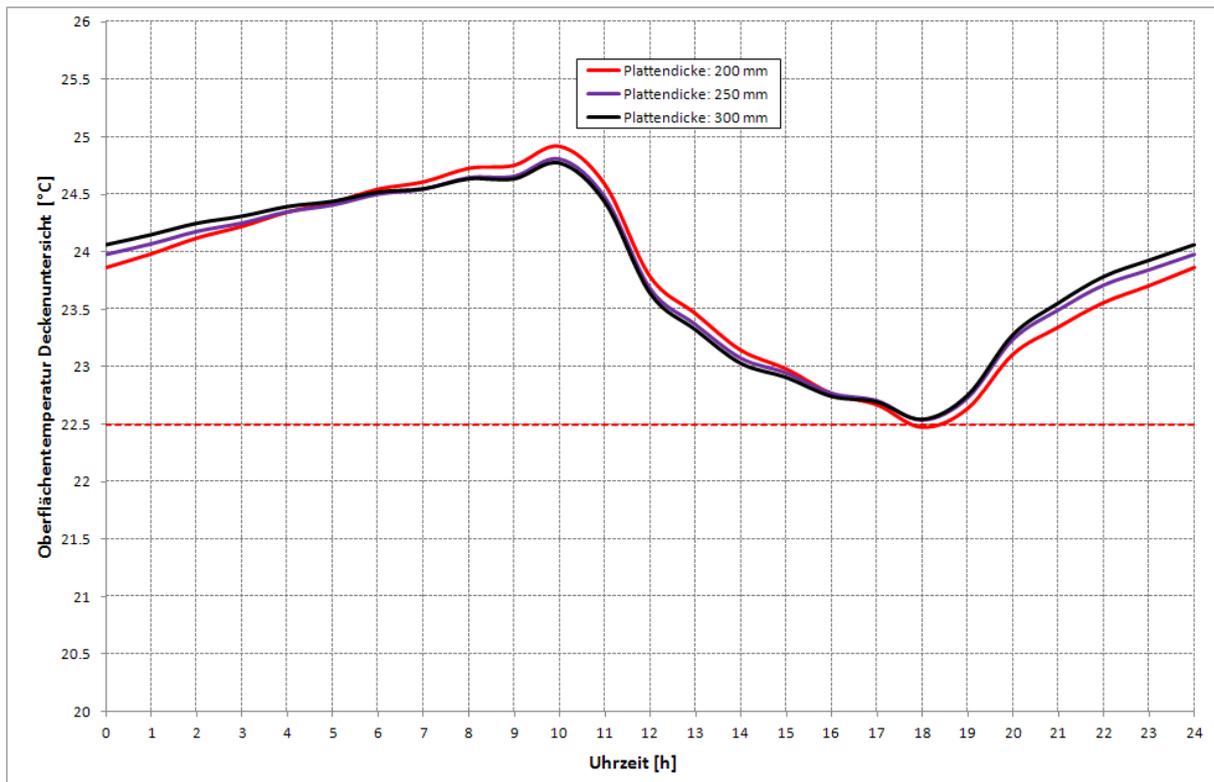


Abb. 4.54: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 16 h

Bei einer Plattendicke von 20 cm zeigt sich, dass die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur etwas größer ist als bei den größeren Dicken der Stahlbetonplatte. Dies führt zu einer geringfügigen Unterschreitung der Untergrenze für die Oberflächentemperatur von 22,5 °C in einem engen Zeitraum um den Zeitpunkt des Abschaltens der Kühlmittelzufuhr um 18⁰⁰. Die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur zeigt sich hauptsächlich von der angenommenen Dauer der Heizunterbrechung abhängig. Bei einer Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 8 Stunden ist diese Schwankung mit ca. 1,5 K (Plattendicke größer 25 cm) bzw. 1,6 K (Plattendicke 20 cm) am kleinsten. Bei einem Unterbrechungsintervall von 16 Stunden Länge sind die entsprechenden Tagesschwankungen mit 2,3 K (Plattendicke größer 25 cm) bzw. 2,4 K (Plattendicke 20 cm) etwas größer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Dicke der Stahlbetonplatte keine gravierende Auswirkung auf das thermische Verhalten der aktivierten Geschoßdecke hat, wenn das Rohrregister oberflächennah positioniert ist.

Um den Einfluss der Position des Rohrregisters in der Betonplatte auf das thermische Verhalten bei unregelmäßiger Wärmeabfuhr zu ermitteln, werden die Berechnungen für eine Betonüberdeckung von 15 cm wiederholt.

Die geänderte Rohrposition erlaubt auch eine Absenkung der Kühlmitteltemperatur (siehe Tab. 4.28). Für eine Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr von 8 Stunden werden nun für die Kühlmitteltemperatur 16,6 °C, für 12 h 15,9 °C und für 16 h 14,2 °C unabhängig von der Plattendicke angesetzt. Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung aus dem unter der Geschoßdecke liegenden Raum für drei unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte (20 cm, 25 cm und 30 cm) und drei unterschiedliche Unterbrechungsintervalle für die Heizmitteltemperatur (8 h, 12 h und 16 h) für eine Rohrregisterposition mit 15 cm Betonüberdeckung.

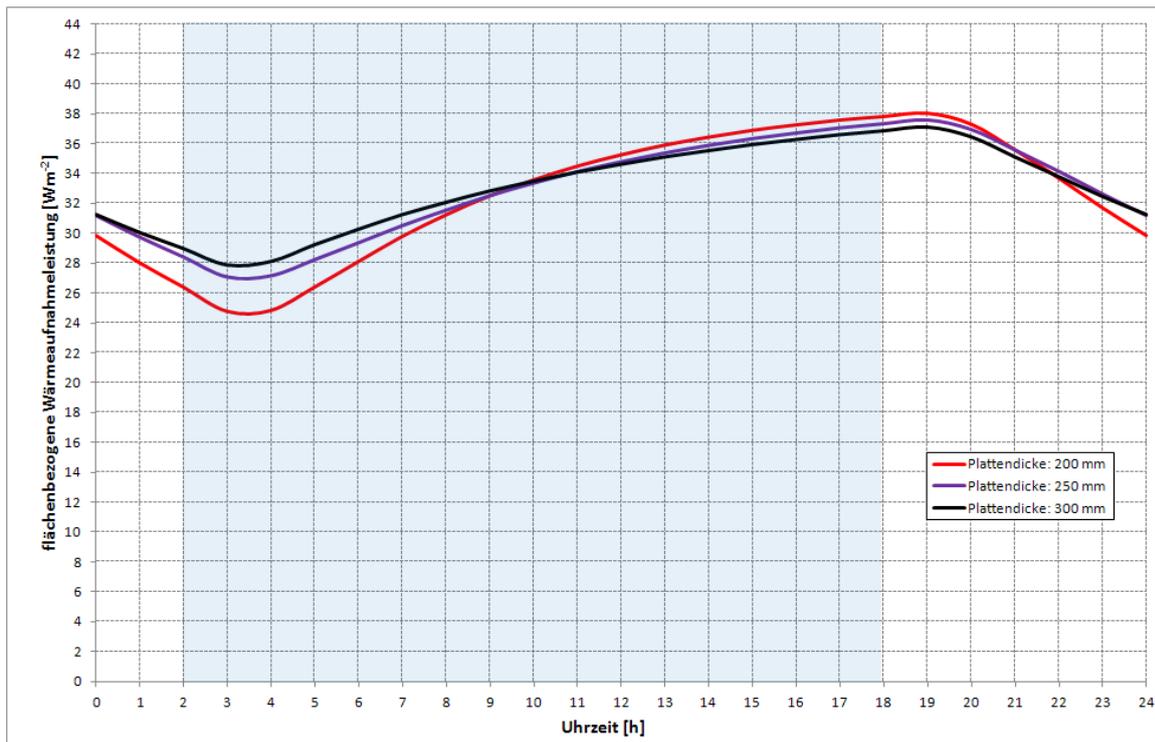


Abb. 4.55: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; **Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 8 h;** Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

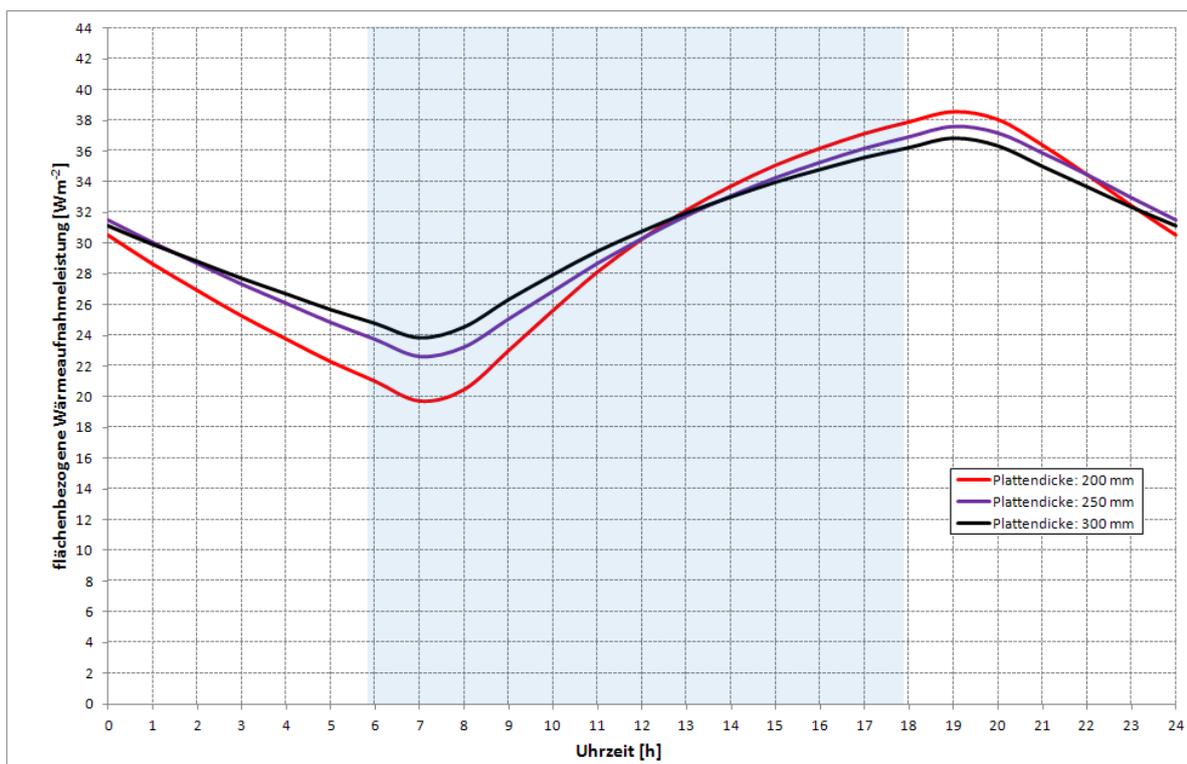


Abb. 4.56: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; **Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 12 h;** Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

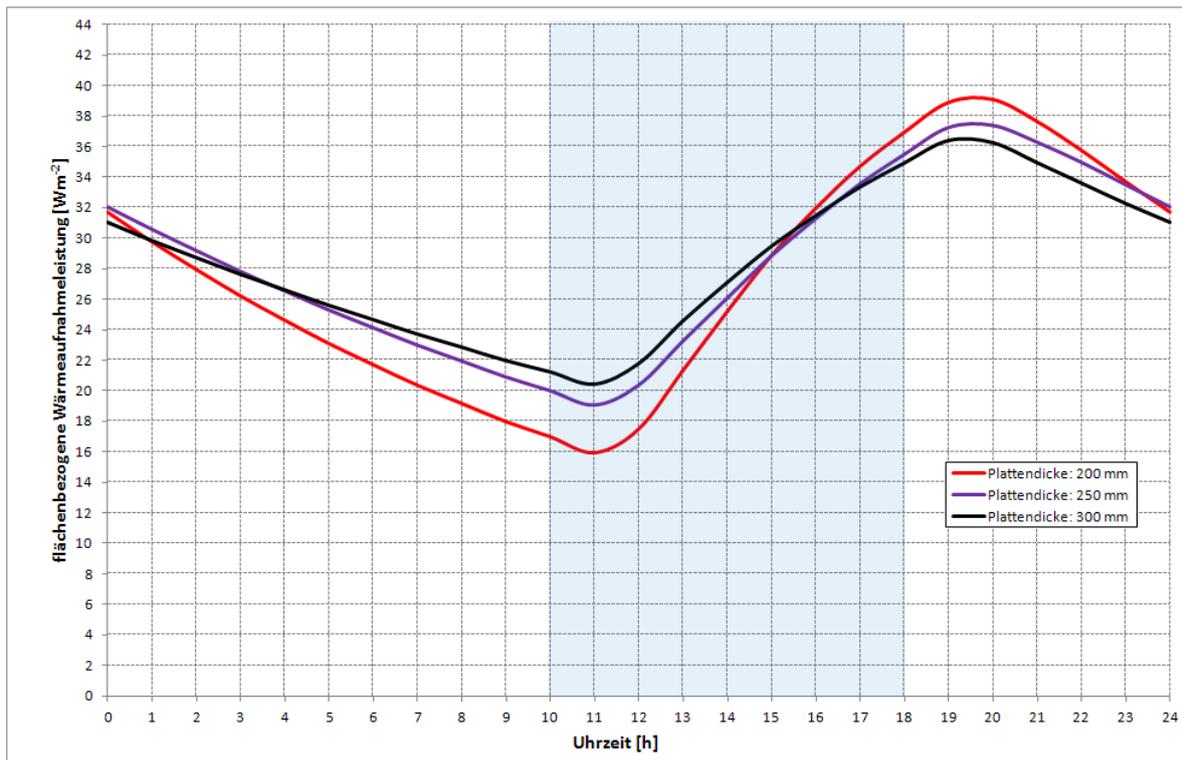


Abb. 4.57: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 16 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

Aufgrund der größeren Betonüberdeckung wird die Tagesschwankung der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung aus dem unter der thermisch aktivierten Geschoßdecke liegenden Raum deutlich kleiner. Zudem fällt auf, dass sich zwischen dem Zeitpunkt der Abschaltung der Kühlmittelzufuhr um 18⁰⁰ und dem Absinken der Wärmeaufnahmeleistung eine Phasenverschiebung von ca. 1,5 bis 2,0 Stunden Dauer einstellt.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die berechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht für den Fall, dass das Rohrregister mit einer Betonüberdeckung von 15 cm in die Geschoßdecke eingebaut ist.

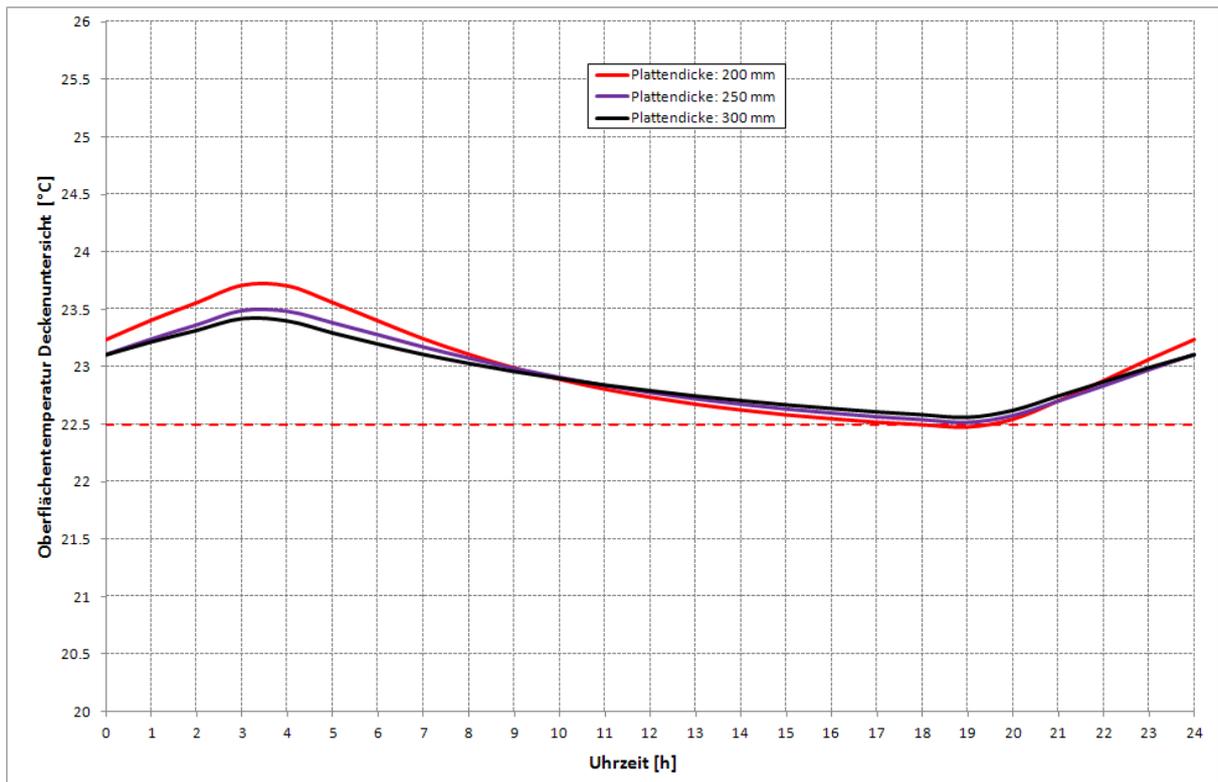


Abb. 4.58. Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 8 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

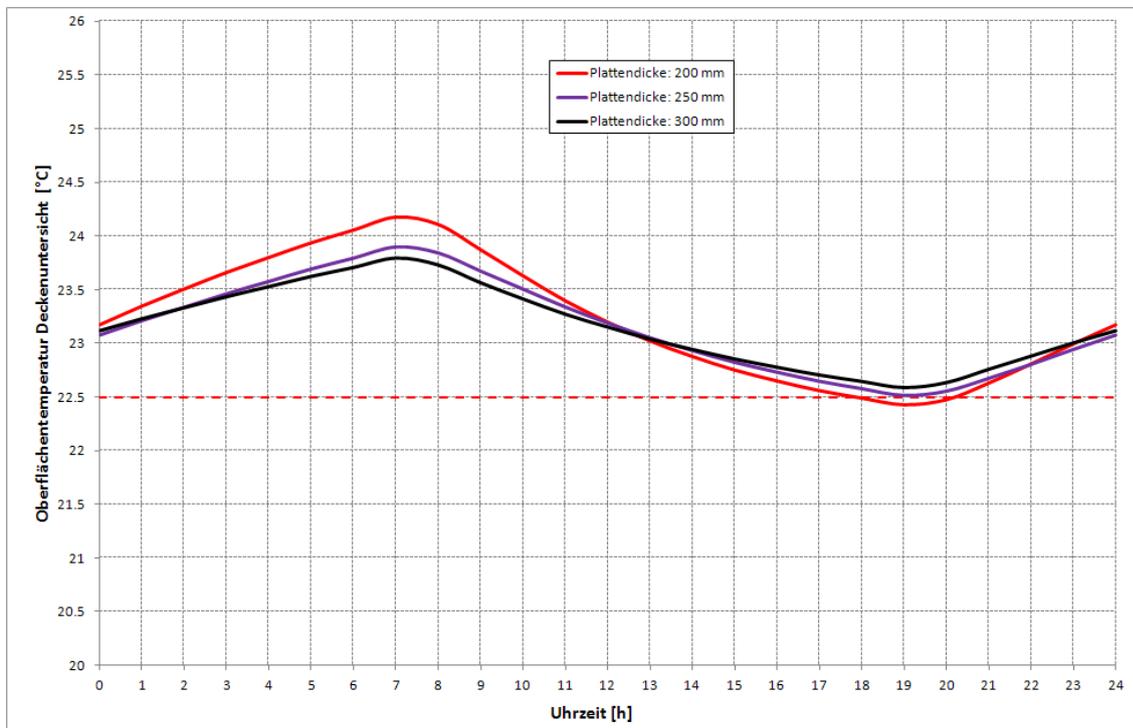


Abb. 4.59. Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der **Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 12 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

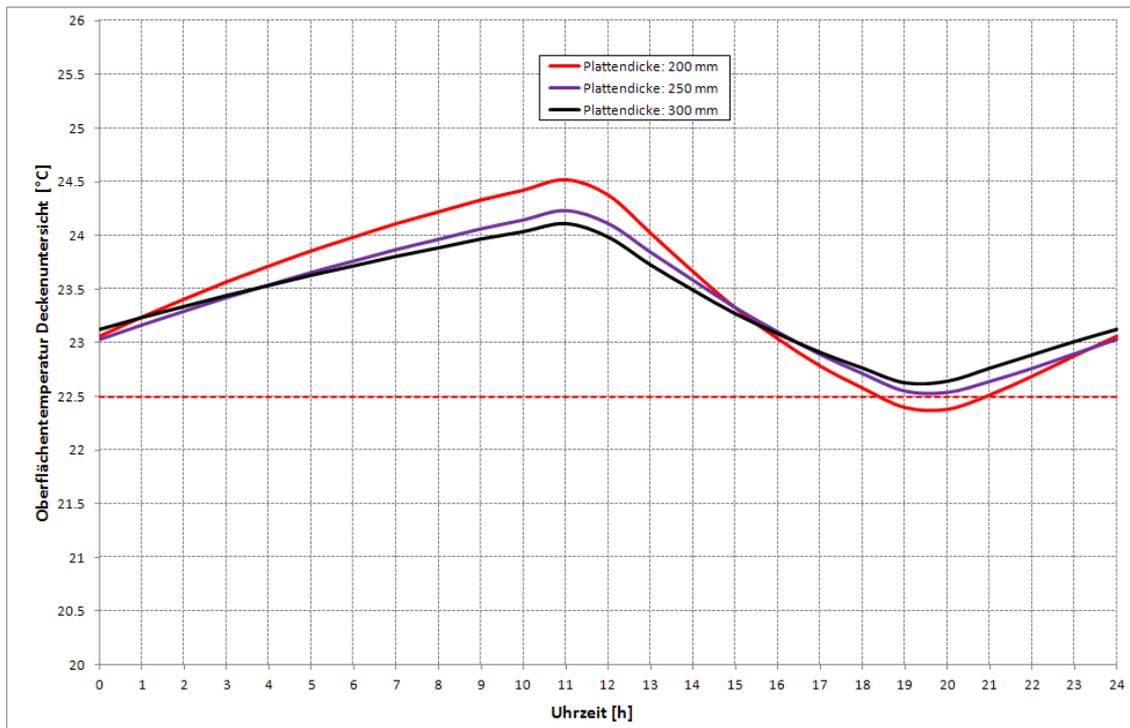


Abb. 4.60. Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: 16 h; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

Auch bei einer Betonüberdeckung von 15 cm zeigt sich, dass die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur bei einer Plattendicke von 20 cm größer ist als bei den größeren Dicken der Stahlbetonplatte.

Die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur hat eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Dauer der Kühlungsunterbrechung. Bei einer Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr von 8 Stunden ist diese Schwankung mit 1,2 K (Plattendicke 20 cm), 1,0 K (Plattendicke 25 cm) bzw. 0,9 K (Plattendicke 30 cm) am kleinsten. Bei einem Unterbrechungsintervall von 16 Stunden Länge sind die entsprechenden Tagesschwankungen mit 2,1 K (Plattendicke 20 cm), 1,7 K (Plattendicke 25 cm) bzw. 1,5 K (Plattendicke 30 cm) deutlich größer.

Ein Vergleich zwischen Abb. 4.52 bis Abb. 4.54 und Abb. 4.58 bis Abb. 4.60 zeigt, dass die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur bei steigender Betonüberdeckung deutlich kleiner wird, obwohl bei der Betonüberdeckung von 15 cm mit niedrigeren Kühlmitteltemperaturen gerechnet wurde als bei der oberflächennahen Lage des Rohrregisters (Überdeckung 5,0 cm).

Conclusio:

Die durchgeführten rechnerischen Untersuchungen zum Einfluss der Dicke der Stahlbetonplatte auf das thermische Verhalten einer thermisch aktivierten Geschoßdecke führen im Fall der Kühlung auf folgende Ergebnisse:

- Unter den im Tagesrhythmus schwankend angesetzten Zeitverläufen der Kühlmittelzufuhr ist der Einfluss unterschiedlicher Plattendicken (20, 25 und 30 cm) sowohl auf die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung als auch auf die Verläufe der mittleren Oberflächentemperatur gering.

- Dünne Stahlbetonplatten (Dicke: 20 cm) führen sowohl bei der flächenbezogenen Wärmehaueaufnahmeleistung als auch bei den Oberflächentemperaturen zu etwas größeren Tagesschwankungen.
- Der Unterschied zwischen einer 25 cm dicken und einer 30 cm dicken Stahlbetonplatte ist im Fall der Kühlung zwar erkennbar, aber nicht ausgeprägt.
- Bei oberflächennaher Position des Rohrregisters, also bei kleinen Betonüberdeckungen, wirkt sich die Dicke der Stahlbetonplatte auf das thermische Verhalten weniger aus als bei größeren Betonüberdeckungen.

IV.1.3.1.3 Oberflächentemperatur – Mittel

Die Kenntnis der Obergrenze für die Heizmitteltemperatur ist nicht nur für den durchlaufenden Betrieb der Umwälzpumpe - siehe hierzu Abschnitt IV.1.2.6 - wertvoll. Insbesondere interessiert die maximal zulässige Heizmitteltemperatur bei kurzzeitiger Beladung der thermisch aktivierten Decke. Beispiele für solch' eine Betriebssituation sind die direkte Einspeisung von durch eine Kollektoranlage erwärmtes Heizmittel oder die Erwärmung und Einspeisung des Heizmittels während der Freigabezeiten bei der Nutzung von Windstrom.

Im Folgenden wird angenommen, dass die Umwälzpumpe nur während eines Teils des Tages – der „Beladungszeit“ – läuft und für den Rest des Tages abgeschaltet bleibt. Um einen Eindruck von der Abhängigkeit des Maximalwerts der Heizmitteltemperatur von der Dauer der Beladungszeit zu erhalten, werden im Folgenden 2 Varianten durchgerechnet:

1. Beladungszeit von 9 bis 21 Uhr (12 Stunden Beladungszeit)
2. Beladungszeit von 9 bis 17 Uhr (8 Stunden Beladungszeit)

Vereinfachend wird angenommen, dass die Heizmitteltemperatur während der Beladungszeit konstant ist und – angelehnt an (1) - der Massendurchsatz ebenfalls konstant angenommen wird. Außerhalb der Beladungszeit erfolgt keine Energiezufuhr in das Rohrregister. Die Temperatur des Heizmittels ergibt sich während dieses Zeitraums aufgrund des Auskühlverhaltens der Decke.

Die Berechnung der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht in Abhängigkeit von der Temperatur des eingespeisten Heizmittels erfolgt unter der Annahme eines periodisch eingeschwungenen Zustands, wobei die Periodenlänge mit einem Tag festgelegt wird. Dies bedeutet, dass sich der angenommene Betriebszustand Tag für Tag wiederholt.

Aus der Annahme der Periodizität folgt unmittelbar, dass die in Abb. 4.15 gezeigten Temperaturdifferenzen auch für die instationäre Berechnung eine Bedeutung haben. Der Tagesmittelwert der Temperatur im Rohr darf die mittels $\Theta_u + \Delta\Theta$ errechnete Obergrenze nicht überschreiten. Bei Überschreitung dieser Obergrenze liegt der Tagesmittelwert der Oberflächentemperatur zu hoch, was natürlich nicht zulässig ist. Zudem ist zu berücksichtigen, dass dem Tagesmittelwert der Oberflächentemperatur auch eine Tagesschwankung überlagert sein wird. Die Aufgabe besteht nun darin, den Tagesmittelwert und die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters zu ermitteln. Der Achsabstand der Rohre im Register wird dabei mit 20 cm konstant gehalten.

Die Heizmitteltemperatur wird nun im Zuge der instationären Berechnung so lange variiert, bis der Maximalwert der mittleren Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht genau 4,0 K über der Solltemperatur des Raums zu liegen kommt. Als Ergebnis der Simulationen liegen die Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht – und die während des Beladungszeitraums konstant angenommene Heizmitteltemperatur vor.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 5 cm.

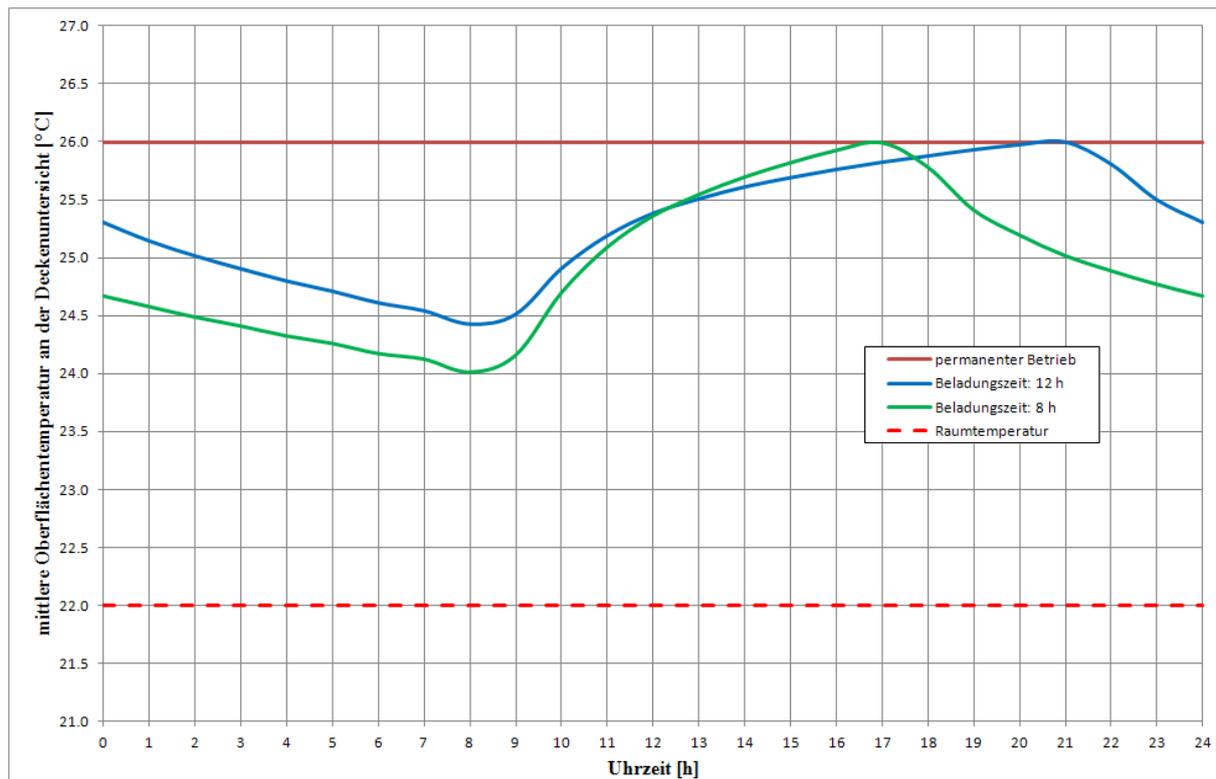


Abb. 4.61: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für eine **Betonüberdeckung von 5 cm**

Bei einer Beladungszeit von 8 Stunden Dauer schwankt die Oberflächentemperatur im Tagesverlauf zwischen 24 und 26 °C. Bei einer 12-stündigen Beladung wird die Tagesschwankung etwas kleiner; der Minimalwerte der Oberflächentemperatur liegt nun bei 24,4 °C, während der Maximalwert natürlich mit 26 °C gleich bleibt.

In folgender Tabelle sind als eigentlich interessierende Ergebnisse die Heizmitteltemperaturen, mit denen die Tagesverläufe der Abb. 4.61 erzielt werden, aufgelistet. Diese Temperaturen können als Obergrenzen für die Heizmitteltemperatur interpretiert werden.

Beladungszeitraum	24 h	12 h	8 h
Heizmitteltemperatur [°C]	29,1	30,0	31,1

Tab. 4.30: maximal zulässige Heizmitteltemperaturen für eine **Betonüberdeckung von 5 cm**

Wie zu erwarten, erhöht sich die zulässige Heizmitteltemperatur mit kürzer werdenden Beladungszeiten. Dieser Effekt ist in der hohen Wärmespeicherfähigkeit der Betondecke begründet.

Anmerkung: In Tab. 4.30 ist die Heizmitteltemperatur angegeben, die sich von der Temperatur im Rohr unterscheidet – siehe Gleichung <4.8>. Der für permanenten Betrieb der Umwälzpumpe (24 h) angegebene Wert (29,1 °C) liegt beim angenommenen Massendurchsatz von 24 kg h⁻¹ um ca. 1,0 K höher als die aus Abb. 4.15 ableitbare Temperatur.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 10 cm.

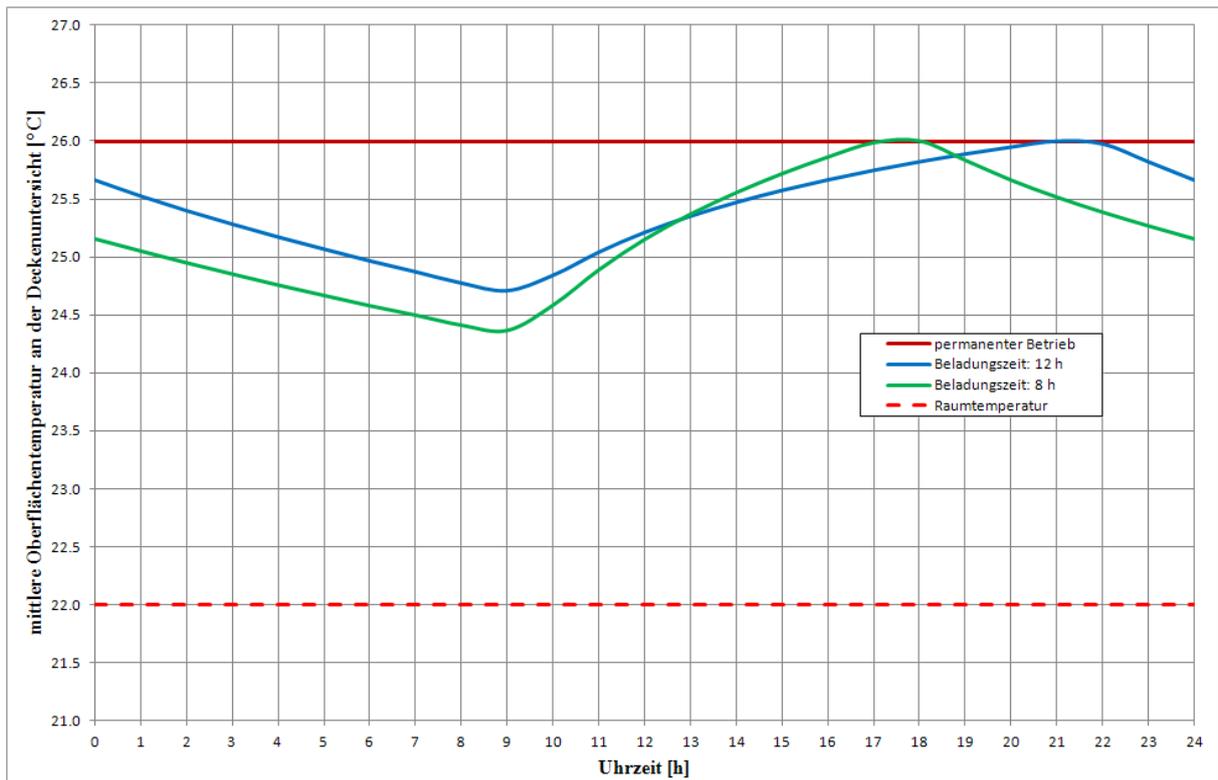


Abb. 4.62: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenunterseite für eine **Betonüberdeckung von 10 cm**

Ersichtlich nehmen mit zunehmender Betonüberdeckung die Tagesschwankungen der Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke ab. Der Minimalwert der mittleren Oberflächentemperatur steigt bei 8-stündiger Beladung auf 24,4 und bei 12-stündiger Beladung auf 24,7 °C an.

Auch die zulässigen Heizmitteltemperaturen werden bei zunehmender Betonüberdeckung etwas größer, wie folgende Tabelle zeigt.

Beladungszeitraum	24 h	12 h	8 h
Heizmitteltemperatur [°C]	29,7	30,7	32,1

Tab. 4.31: maximal zulässige Heizmitteltemperaturen für eine **Betonüberdeckung von 10 cm**

Die folgende Abbildung zeigt als Ergebnis der letzten Berechnungsvariante die errechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenunterseite für eine Betonüberdeckung von 15 cm.

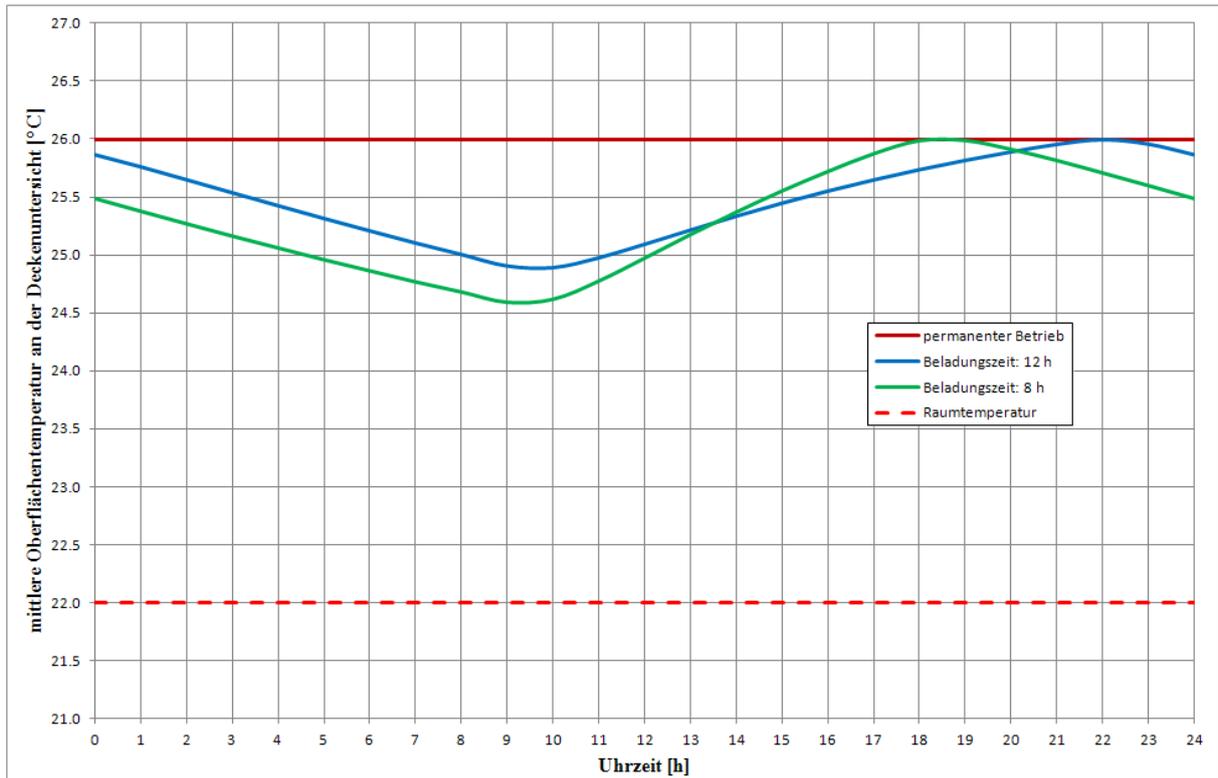


Abb. 4.63: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenunterseite für eine **Betonüberdeckung von 15 cm**

Im Vergleich zur Variante mit 10 cm Betonüberdeckung verringert sich die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur weiter. Mit einer Erhöhung der Minimalwerte um ca. 0,2 K ist dieser Effekt aber nicht mehr stark ausgeprägt.

In folgender Tabelle sind die maximal zulässigen Heizmitteltemperaturen für eine Betonüberdeckung von 15 cm aufgelistet.

Beladungszeitraum	24 h	12 h	8 h
Heizmitteltemperatur [°C]	30,0	31,5	33,1

Tab. 4.32: maximal zulässige Heizmitteltemperaturen für eine **Betonüberdeckung von 15 cm**

Um den Einfluss der Betonüberdeckung auf die sich an der Deckenunterseite einstellenden Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen klar zu machen, sind in den folgenden beiden Abbildungen die errechneten Tagesverläufe für Beladungsdauern von 12 bzw. 8 Stunden einander gegenübergestellt.

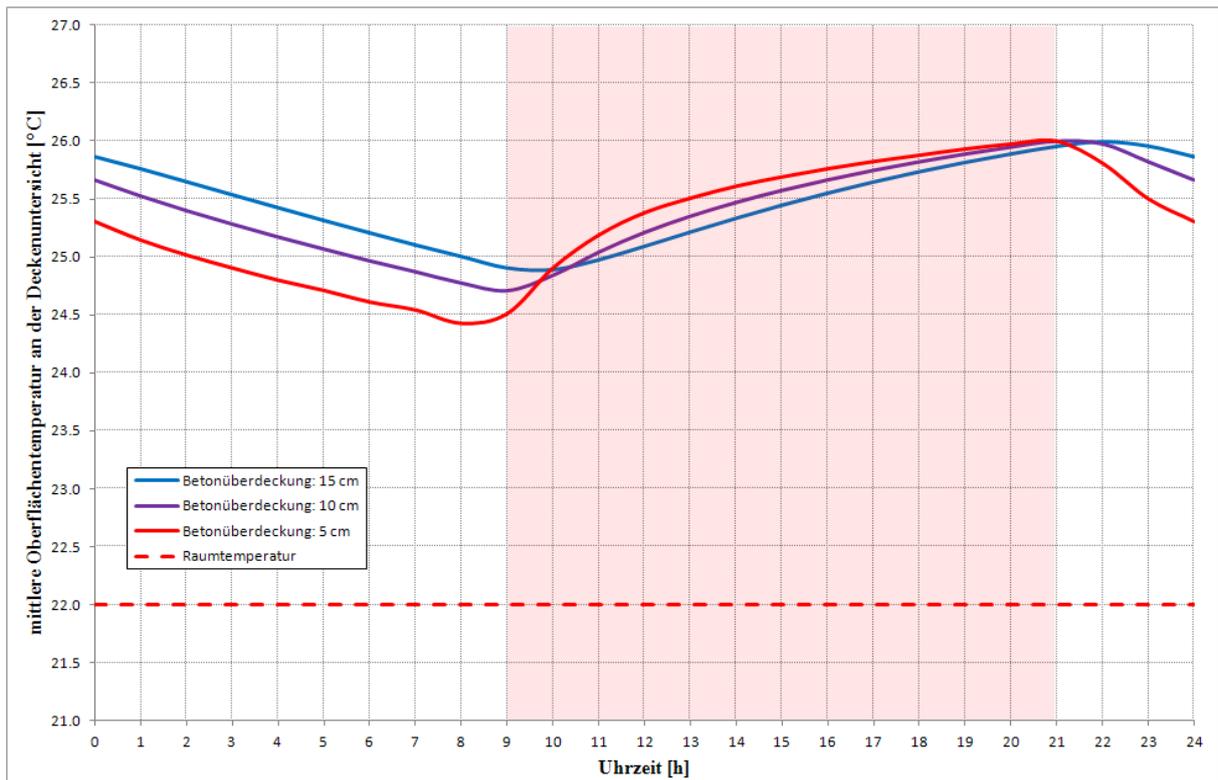


Abb. 4.64: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenunterseite bei einer **Beladungsdauer von 12 Stunden** für verschiedene Betonüberdeckungen

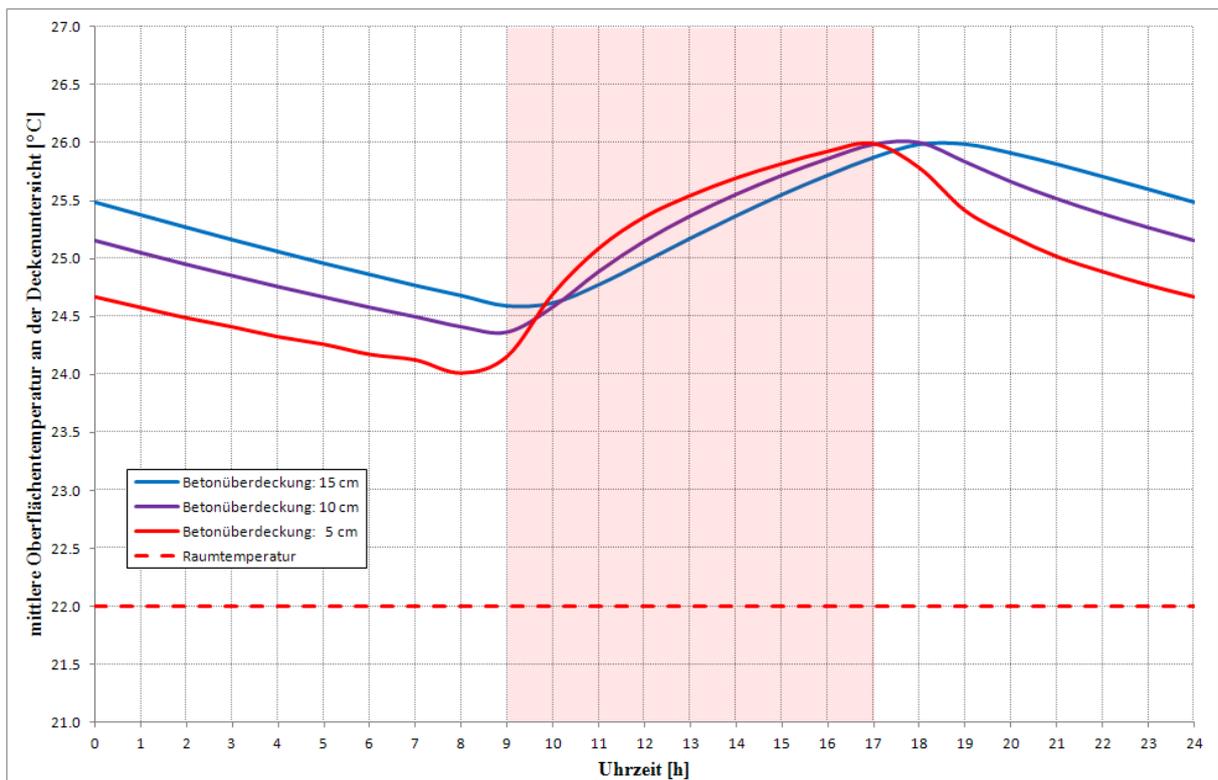


Abb. 4.65: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenunterseite bei einer **Beladungsdauer von 8 Stunden** für verschiedene Betonüberdeckungen

Wie nicht anders zu erwarten, wird mit zunehmender Betonüberdeckung die Tagesamplitude der Oberflächentemperatur an der Deckenunterseite deutlich reduziert. Zugleich verschiebt sich

auch der Tagesmittelwert der Oberflächentemperatur – und damit auch der Tagesmittelwert der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Decke.

In der nachfolgenden Tabelle ist der Tagesmittelwert der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Decke in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung und der Dauer der Beladung aufgelistet.

	Beladungszeitraum		
	24 h	12 h	8 h
Betonüberdeckung 5 cm	26,0	25,3	24,9
Betonüberdeckung 10 cm	26,0	25,4	25,2
Betonüberdeckung 15 cm	26,0	25,5	25,3

Tab. 4.33: Tagesmittelwerte der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Deckenunterseite in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung und des Beladungszeitraums [Wm^{-2}]

Die Tagesmittelwerte der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen liegen auch bei kürzeren Beladungszeiten nur unwesentlich unter der maximal zulässigen Wärmeabgabeleistung von 26 Wm^{-2} . Bei 8 Stunden Beladungszeit und einer Betonüberdeckung von 5 cm liegt die mittlere Wärmeabgabeleistung mit $24,9 \text{ Wm}^{-2}$ bei 96% der maximal zulässigen Wärmeabgabeleistung. Mit zunehmender Betonüberdeckung steigt dieser Wert weiter an. Dieser Effekt ist zwar zu erwarten, jedoch nicht sehr ausgeprägt.

Conclusio

- Bei nicht durchlaufender Umwälzpumpe erhöht sich die maximal zulässige Heizmittelltemperatur. Bei einer 12-stündigen Beladungszeit und einer Betonüberdeckung von 5 cm beträgt diese Erhöhung ca. 1,0 K, bei einer auf 8 h verkürzten Beladungszeit bereits 2,0 K.
- Die Betonüberdeckung beeinflusst die maximal zulässige Heizmittelltemperatur bei kürzeren Beladungszeiten etwas mehr als bei durchlaufender Umwälzpumpe. Bei 12-stündiger Beladungszeit erhöht sich die maximal zulässige Temperatur bei Erhöhung der Betonüberdeckung um jeweils 5 cm um ca. 0,7 K, bei 8-stündiger Beladungszeit um 1,0 K.
- Der Tagesmittelwert der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Deckenunterseite lässt sich bei kürzeren Beladungszeiten sehr nahe an den bei durchlaufender Umwälzpumpe erzielbaren Tagesmittelwert annähern, sofern von der Möglichkeit der Erhöhung der Heizmittelltemperatur bei verkürzten Beladungszeiten Gebrauch gemacht wird.

IV.1.3.1.4 Oberflächentemperatur – Welligkeit

Die bisherigen Berechnungen und Auswertungen hatten die über die gesamte aktivierte Deckenfläche gemittelten Oberflächentemperaturen zum Ergebnis. Natürlich wird sich eine gewisse Welligkeit – also eine von Ort zu Ort unterschiedliche Oberflächentemperatur - ergeben. Es ist davon auszugehen, dass diese Welligkeit zum einen von der Betonüberdeckung und zum anderen von der Beladungsdauer und der Heizmitteltemperatur abhängen wird. Bei den folgenden Untersuchungen wird der Achsabstand der Rohre – wie bisher – mit 20 cm festgehalten.

Die Untersuchung der Welligkeit der Temperaturverteilung an der Deckenuntersicht erfolgt mittels Berechnung und Ausgabe der Tagesgänge der Oberflächentemperatur an vier ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht. Die Lage dieser Punkte ist in folgender Abbildung skizziert.

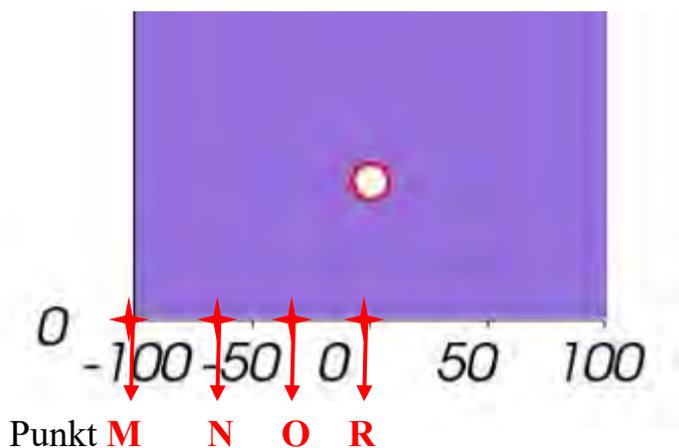


Abb. 4.66: Ausschnitt aus dem Berechnungsmodell: Vertikalschnitt durch die oberste Decke; Betonüberdeckung: 5 cm; Lage der untersuchten Punkte; Maße in mm

Für eine Betonüberdeckung von 5 cm und stationären Verhältnissen (durchlaufende Umwälzpumpe) ergibt sich die Welligkeit als Differenz der (zeitlich unveränderlichen) Temperaturen am Punkt R und am Punkt M. Bei einer Heizmitteltemperatur von 29,1 °C (siehe Tab. 4.30) stellt sich direkt unter dem Rohr (Punkt R) mit einer Temperatur von 26,12 °C eine etwas zu hohe Temperatur ein. Die Oberflächentemperatur in der Mitte zwischen jeweils 2 Rohren (Punkt M) liegt mit 25,88 °C etwas unter der Obergrenze der Oberflächentemperatur. Die Welligkeit – ausgedrückt als Differenz zwischen Maximal- und Minimaltemperatur der Deckenuntersicht - erweist sich mit 0,24 K im stationären Fall als vernachlässigbar klein.

In folgender Abbildung sind die Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen an den vier ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für den Fall einer 12-stündigen Beladungszeit ausgewiesen. Gemäß Tab. 4.30 wurde hierfür die Heizmitteltemperatur mit 30,0 °C konstant über den Zeitraum der Beladung angesetzt.

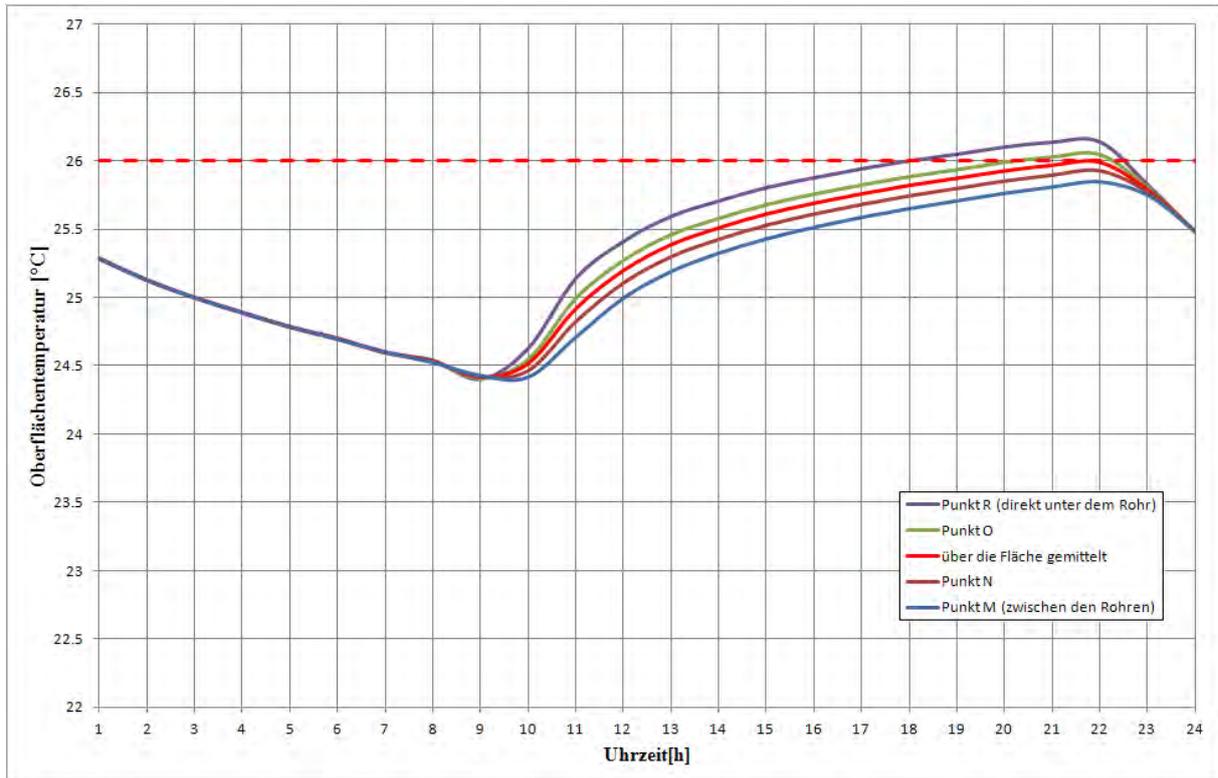


Abb. 4.67: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 5 cm; **Beladungszeit: 12 Stunden;** Heizmitteltemperatur 30,0 °C

Die Welligkeit schwankt im Fall der 12-stündigen Beladung zwischen nahezu 0,0 K in der Zeit der Auskühlung bis zu 0,4 K um die Mittagszeit. Die Obergrenze der Oberflächentemperatur von 26 °C wird an den Punkten O und R am späten Nachmittag leicht überschritten. Die maximale Oberflächentemperatur tritt direkt unter dem Rohr (Punkt R) mit 26,14 °C um 22 Uhr auf.

Die Berechnung und Auswertung der Temperaturverteilung an der Untersicht der thermisch aktivierten Decke wird für den Fall der 8-stündigen Beladung wiederholt. Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen bei einer nach Tab. 4.30 angesetzten Heizmitteltemperatur von 31,1 °C.

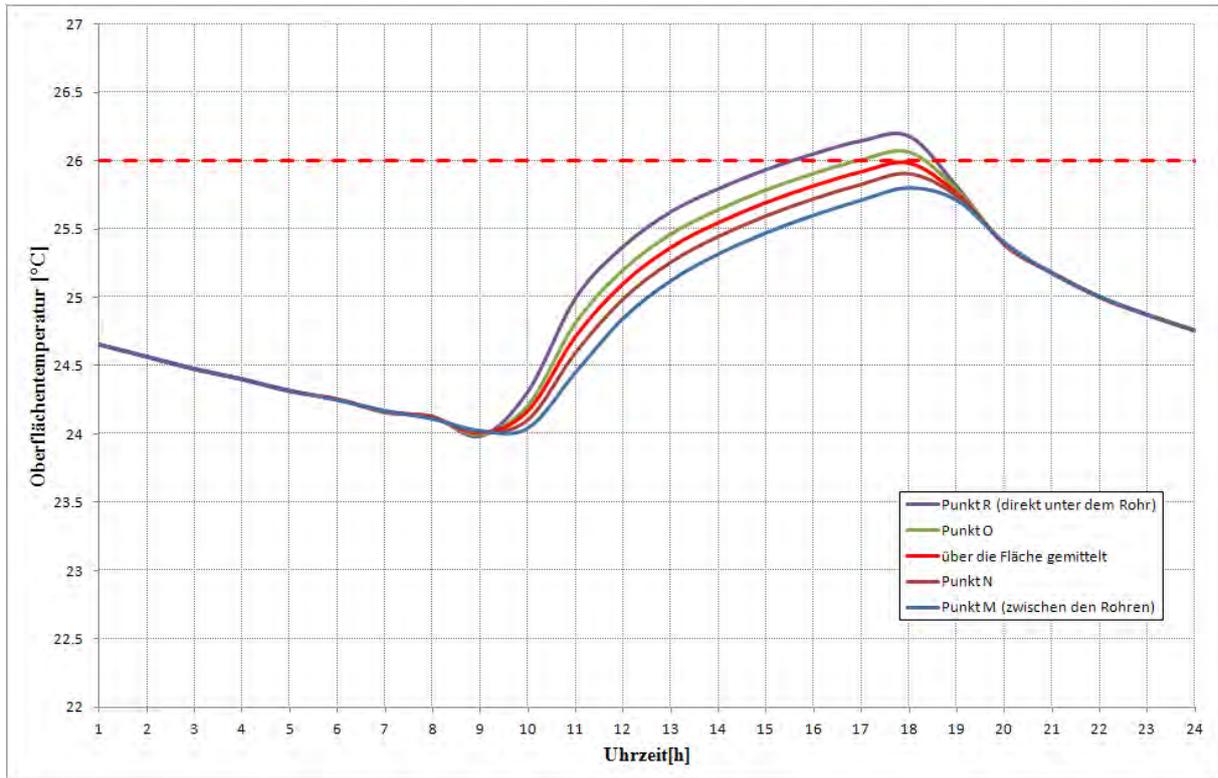


Abb. 4.68: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 5 cm; **Beladungszeit: 8 Stunden;** Heizmitteltemperatur 31,1 °C

Die Welligkeit fällt mit einem Maximalwert von 0,55 K um 11 Uhr etwas größer aus als bei der 12-stündigen Aufladezeit. Die Obergrenze der Oberflächentemperatur von 26 °C wird an den Punkten O und R am mittleren Nachmittag leicht überschritten. Die maximale Oberflächentemperatur tritt direkt unter dem Rohr (Punkt R) mit 26,18 °C um 18 Uhr auf.

Ersichtlich ist der Fall der 8-stündigen Beladungszeit sowohl was die Welligkeit als auch was die maximale Oberflächentemperatur betrifft etwas kritischer als der Fall der 12-stündigen Beladung. Daher wird im Folgenden nur noch die sich bei 8-stündiger Beladungszeit für Betonüberdeckungen von 10 und 15 cm ergebende Situation dargestellt.

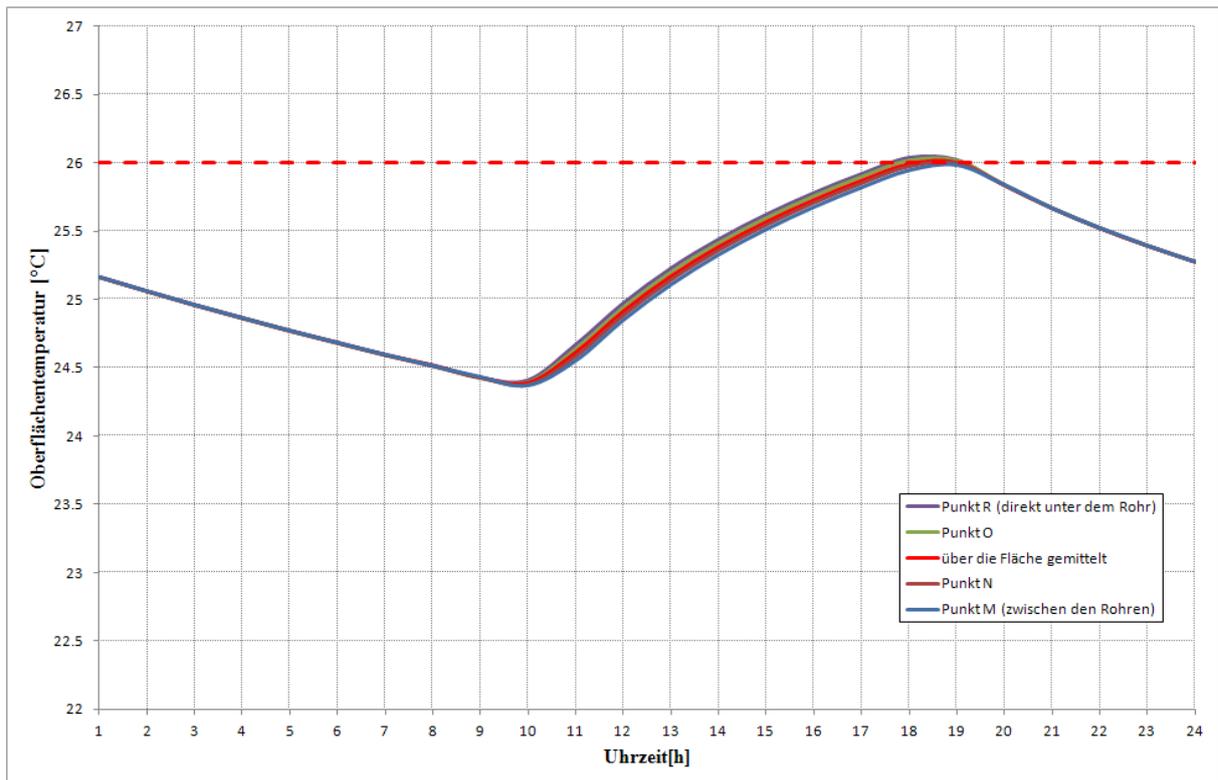


Abb. 4.69: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine **Betonüberdeckung von 10 cm**; Beladungszeit: 8 Stunden; Heizmitteltemperatur 32,1 °C

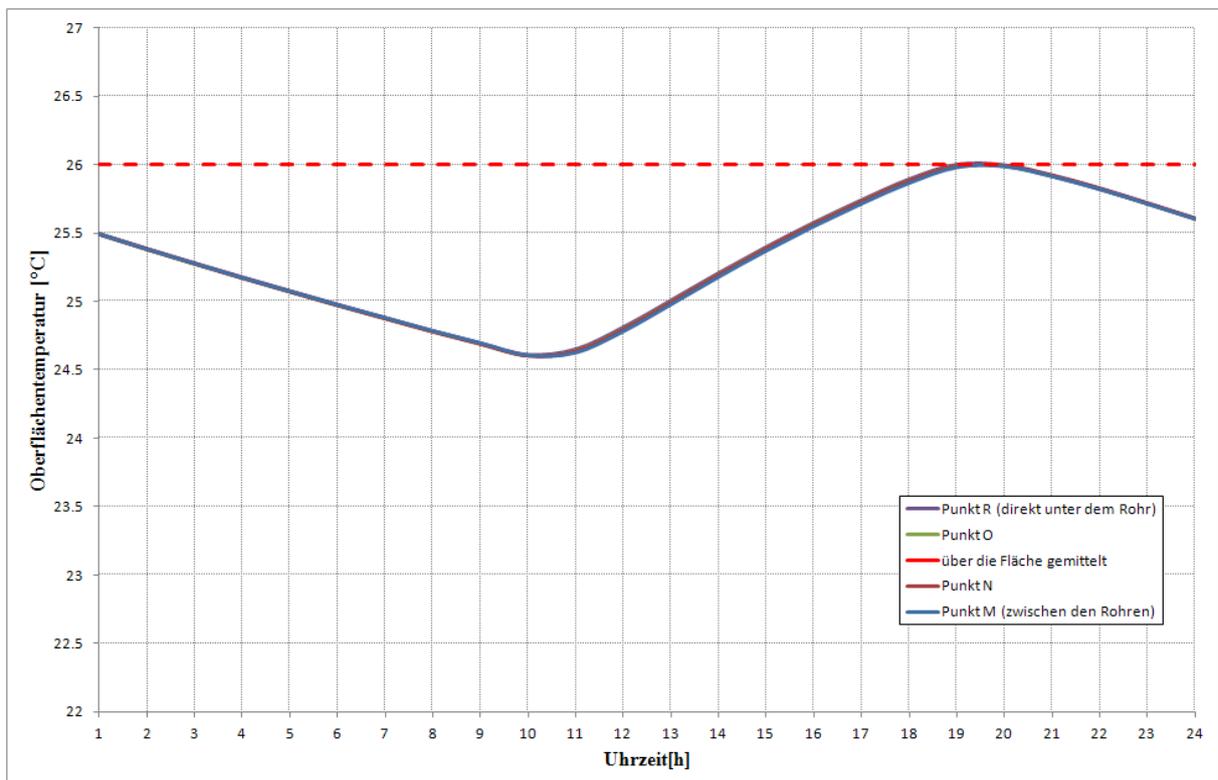


Abb. 4.70: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine **Betonüberdeckung von 15 cm**; Beladungszeit: 8 Stunden; Heizmitteltemperatur 33,1 °C

Die Welligkeit nimmt mit steigender Betonüberdeckung stark ab. Sie erreicht bei 10 cm Betonüberdeckung um 12 Uhr mit 0,12 K ihr Maximum. Bei 15 cm Betonüberdeckung ist das Maximum der Welligkeit mit 0,03 K vernachlässigbar klein. Die Oberflächentemperatur ist in diesem Fall zu jedem Zeitpunkt des Tages in guter Näherung isotherm.

Das Maximum der Oberflächentemperatur überschreitet bei einer Betonüberdeckung von 10 cm um 18 Uhr mit 26,04 °C die Obergrenze von 26,0 °C nur marginal. Bei 15 cm Betonüberdeckung wird 26 °C an keinem Punkt und zu keinem Zeitpunkt am Tag überschritten.

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass die Welligkeit nur bei einer Betonüberdeckung von 5 cm während der Beladungszeit gut sichtbar ist. Da die maximalen an der Deckenuntersicht auftretenden Temperaturdifferenzen auch in diesem Fall mit 0,4 K sehr klein sind, kann der Bezug auf mittlere Oberflächentemperaturen, wie er im vorhergehenden Abschnitt abgehandelt wurde, als bei weitem ausreichend gute Näherung bezeichnet werden.

Conclusio

Die instationär durchgeführten Untersuchungen zur Verteilung der Oberflächentemperaturen und der maximal zulässigen Heizmitteltemperatur führen auf folgende Ergebnisse.

- Die Welligkeit, d. h. die sich an der Deckenuntersicht einstellende Ortsabhängigkeit der Temperatur, ist nur während der Beladungszeit sichtbar. Bei Betonüberdeckungen von 10 cm und größer liegt die maximale Temperaturdifferenz an unterschiedlichen Punkten der Deckenuntersicht im Bereich von 0,1 K und ist damit vernachlässigbar. Selbst bei einer Betonüberdeckung von nur 5 cm bleibt die Welligkeit im Tagesverlauf unter 0,4 K und ist damit sicherlich nicht spürbar. Die nahezu isotherme Oberflächentemperatur im Bereich der thermisch aktivierten Decke ist als Qualitätsmerkmal anzusehen und in der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahlbetons begründet.

IV.1.3.1.5 Temperaturverteilung

Als Ergebnis einer Simulation des thermischen Verhaltens einer aktivierten Betondecke liegen nicht nur die in den vorhergehenden Abschnitten besprochenen Aussagen über die Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht vor, sondern auch die Information über die Temperaturverteilung innerhalb der thermisch aktivierten Decke. Eine Auswertung dieser Berechnungsergebnisse ist insofern von praktischem Interesse als sie für eine sinnvolle Positionierung des sog. „Kerntemperaturfühlers“ von Relevanz ist.

Der Kerntemperaturfühler soll zielgerichtet dann ein Signal senden, wenn eine Überhitzungstendenz der thermisch aktivierten Decke erkannt wird. Dieses Signal führt in der Folge zu einer Abschaltung der Umwälzpumpe und unterbindet damit eine weitere Heizmittelzufuhr. Die Position dieses Fühlers ist natürlich derart zu wählen, dass die Überhitzungstendenz der Betondecke frühzeitig und verlässlich erkannt werden kann. Natürlich ist die Stahlbetondecke nicht isotherm, sodass die Bedeutung des Begriffs „Kerntemperatur“ erst hinterfragt werden muss. Es besteht daher die Aufgabe, die Temperaturverteilung in einer thermisch aktivierten Decke zu berechnen. Da sich die Frage einer Abschaltung der Umwälzpumpe erst bei zeitlich veränderlicher Heizmittelzufuhr stellt, muss die Berechnung der Temperaturverteilung instationär erfolgen. Anschließend an die Erkenntnisse des vorhergehenden Abschnitts werden alle folgenden Berechnungen unter der Annahme einer 8-stündigen Beladungsdauer (von 9⁰⁰ bis 17⁰⁰) durchgeführt.

Das Berechnungsergebnis – die Temperaturverteilung im Deckenquerschnitt für jeden Zeitpunkt des Tages – ist zu komplex, um aussagekräftig dargestellt zu werden. Um brauchbare

Rückschlüsse aus den Berechnungen ziehen zu können, werden daher die Tagesverläufe der Temperaturen an gezielt ausgewählten Punkten innerhalb der aktivierten Decke einander gegenüber gestellt. Bei der Auswahl dieser Punkte ist zu berücksichtigen, dass diese in Bereichen liegen sollen, an denen ein Sensor eine etwaige Überwärmungsneigung anzeigen soll. Es ist nahe liegend, einen solchen Sensor entlang von Symmetrieebenen der thermisch aktivierten Decke zu positionieren. Als Symmetrieebenen bieten sich die vertikal durch die Rohrachse gelegte Schnittebene und die vertikalen Ebenen in der Mitte zwischen jeweils 2 Rohren an – siehe die folgende Abbildung.

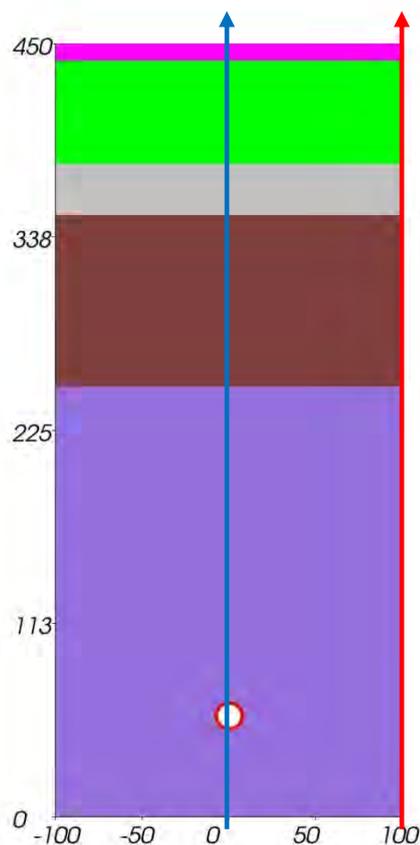


Abb. 4.71: Berechnungsmodell mit Schnitt- bzw. Symmetrieebenen; Maße in mm

Da nur die Temperaturverteilung in der Stahlbetondecke (lila in Abb. 4.71) interessiert, werden in einem ersten Schritt die Temperaturverläufe für Punkte entlang der roten Linie (rechts in Abb. 4.71) beginnend von der Deckenuntersicht ($h=0$ cm) bis zur Oberkante der Stahlbetondecke ($h=25$ cm) ausgewertet.

In folgender Abbildung sind die Tagesgänge der Temperatur an 6 Punkten im Abstand von 5 cm (gekennzeichnet jeweils durch den Abstand h von der Deckenuntersicht) für den Fall einer Betonüberdeckung von 5 cm dargestellt. Zudem ist der Tagesgang der Temperatur am Punkt in der Höhe der Rohrachse grün ausgezeichnet. Gemäß Abschnitt IV.1.3.1.4 wurde als Heizmitteltemperatur $31,1$ °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

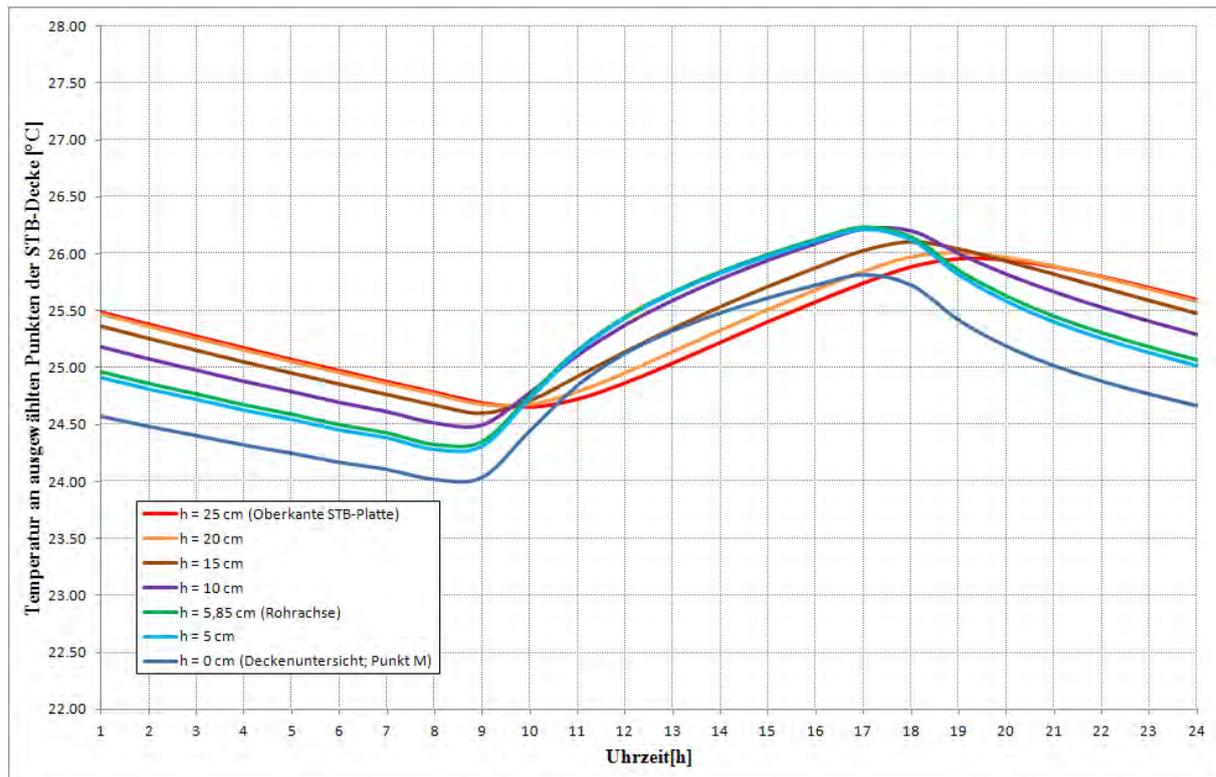


Abb. 4.72: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; Betonüberdeckung 5 cm; Ebene zwischen jeweils zwei Rohren

Es zeigt sich, dass sich in der Betondecke Temperaturverteilungen einstellen, die bei weitem nicht isotherm sind und sich im Tagesverlauf – und hier insbesondere während des Zeitraums der Aufladung – stark ändern. Den Ergebnissen von Abschnitt IV.1.3.1.4 folgend, muss die Umwälzpumpe um 17 Uhr abgeschaltet werden, um eine Übertemperatur an der Deckenunterseite auszuschließen. Die Temperaturverläufe zwischen 15 und 17 Uhr sind für den Punkt in 5 cm Höhe (hellblaue Linie in Abb. 4.72), den Punkt in Höhe der Rohrachse (grüne Linie) und den Punkt in 10 cm Höhe (lila Linie) nahezu deckungsgleich. Ein in diesem Bereich positionierter Sensor müsste bei Messung einer Temperatur von 26,2 °C das Signal zur Abschaltung an die Umwälzpumpe schicken.

Da die Temperaturen entlang der vertikal geführten Linie zwischen 5 cm und 10 cm Abstand von der Deckenunterseite um 15 Uhr mit 26,0 °C 0,2 K unter und um 16 Uhr mit 26,1 °C 0,1 K unter dem Schaltepunkt liegt, ergibt sich als Anforderung an den Temperatursensor eine Messgenauigkeit von mindestens 0,1 K.

Anmerkung: In diesem Zusammenhang muss bedacht werden, dass sich der Messfühler in einem einbetonierten Röhrchen befindet und die Temperatur innerhalb dieses Volumens misst. Der vom Sensor gemessene Wert wird dem für diesen Punkt berechneten Wert nur dann genügend nahekommen, wenn eine gute thermische Verbindung zwischen Messfühler und Stahlbetondecke besteht. Eine Möglichkeit hierzu würde das Ausfüllen des Röhrchens mit einer Wärmeleitpaste vor dem Einschieben des Messfühlers bieten.

Aufschlussreich ist es, die Temperaturverteilung nicht nur eindimensional entlang einer Linie sondern zweidimensional für den Vertikalschnitt durch die Wand darzustellen. Natürlich muss dafür aber ein Zeitpunkt fixiert werden. Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverteilung in der Decke zum Zeitpunkt der erforderlichen Abschaltung der Umwälzpumpe, d. h. um 17 Uhr.

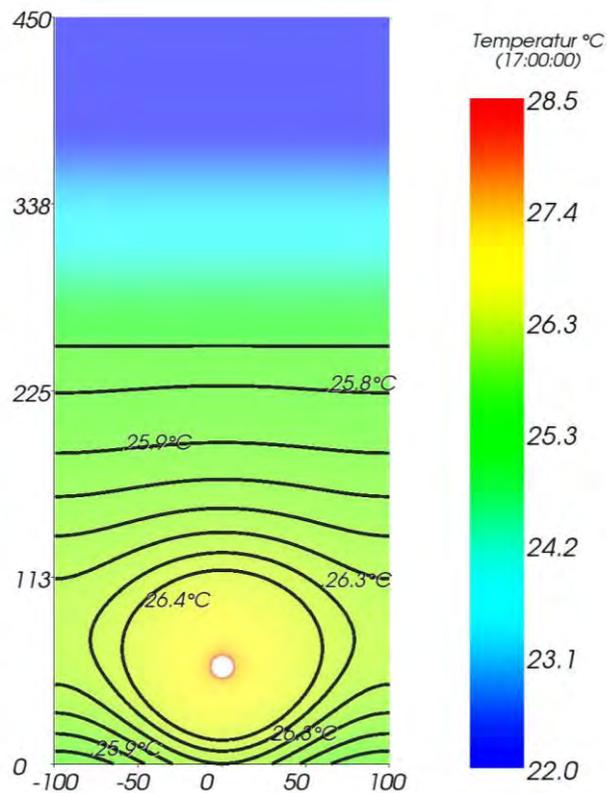


Abb. 4.73: Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke um 17 Uhr; **Betonüberdeckung 5 cm**

In Hinblick auf die Position des Kerntemperaturfühlers zeigt sich, dass eine Veränderung in vertikaler Richtung entlang der Symmetrielinie zwischen jeweils zwei Rohren wenig kritisch ist. In Übereinstimmung zu Abb. 4.72 zeigt auch Abb. 4.73, dass ein Sensor mit einer Position von 5 cm bis 10 cm Höhe über der Deckenunterseite in etwa die gleiche Temperatur anzeigen wird. Eine Verschiebung des Sensors in horizontaler Richtung ist insofern kritischer als die Temperatur nach bereits ca. 3 cm um 0,1 K und bei weiterer Abweichung von der Symmetrieachse die Temperatur noch deutlich rascher ansteigt.

Anmerkung: Zwecks besserer Lesbarkeit von Abb. 4.73 wurden Isothermen nur im Temperaturbereich zwischen 25,7 °C und 26,4 °C im Abstand von jeweils 0,1 K ausgezeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt die Tagesgänge der Temperatur an den ausgewählten Punkten für den Fall einer Betonüberdeckung von 10 cm. Gemäß Tab. 4.31 wurde als Heizmitteltemperatur 32,1 °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

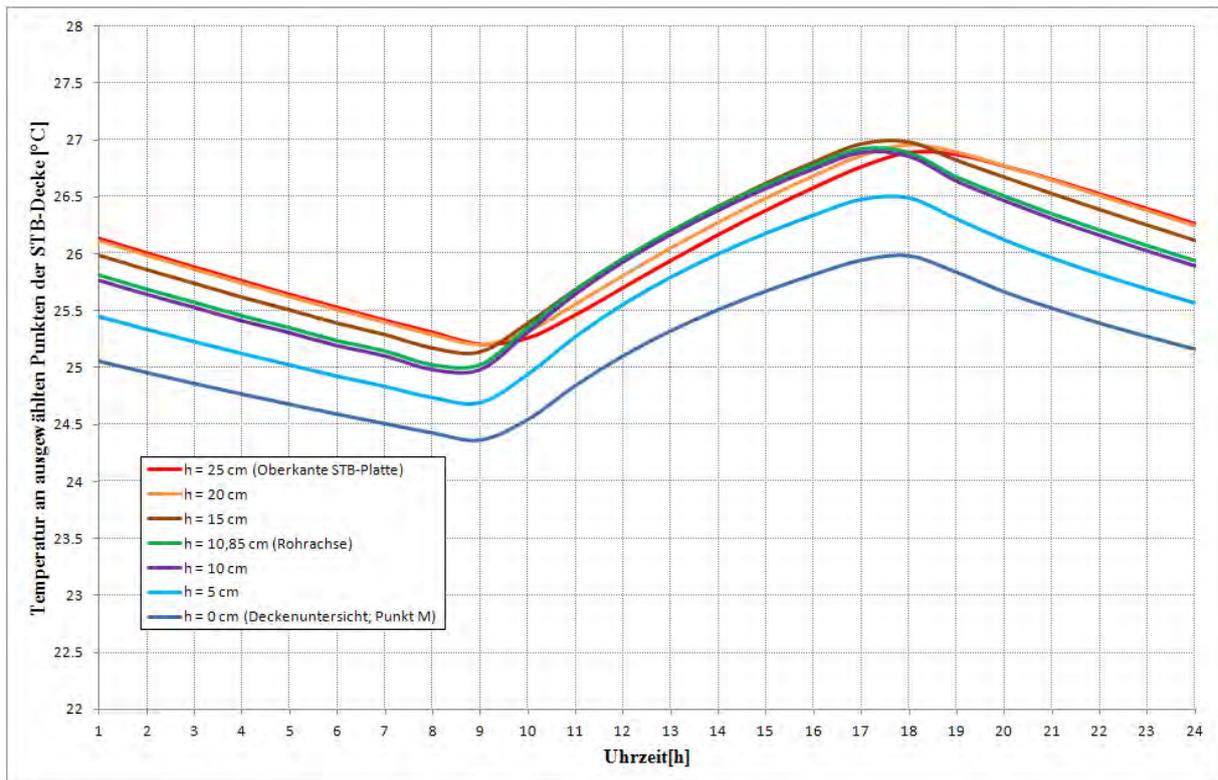


Abb. 4.74: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; Betonüberdeckung 10 cm

Die Temperaturverläufe zwischen 11 und 17 Uhr sind für den Punkt in 10 cm Höhe (lila Linie in Abb. 4.74), den Punkt in Höhe der Rohrachse (grüne Linie) und den Punkt in 15 cm Höhe (dunkelbraune Linie) nahezu deckungsgleich. Ein in diesem Bereich positionierter Sensor müsste bei Messung einer Temperatur von 26,9 °C das Signal zur Abschaltung an die Umwälzpumpe schicken.

Die zweidimensional für den Zeitpunkt 17 Uhr errechnete Temperaturverteilung zeigt die folgende Abbildung.

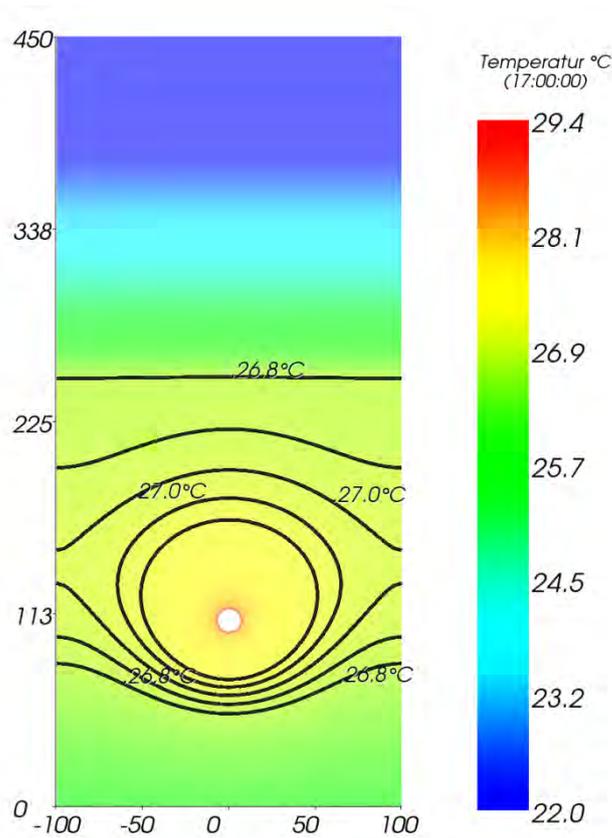


Abb. 4.75: Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke um 17 Uhr; **Betonüberdeckung 10 cm**

Auch hier zeigt sich, dass in der Symmetrieebene zwischen jeweils zwei Rohren im Bereich der Rohrhöhe – genauer: zwischen ca. 10 cm und 15 cm Höhe, gemessen ab Deckenunterseite – ein Bereich nahezu gleicher Temperatur liegt. Eine Positionierung des Temperatursensors ist in diesem Bereich somit sehr gut möglich.

Anmerkung: Zwecks besserer Lesbarkeit von Abb. 4.75 wurden Isothermen nur im Temperaturbereich zwischen 26,8 °C und 27,2 °C im Abstand von jeweils 0,1 K ausgezeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt die Tagesgänge der Temperatur an den ausgewählten Punkten für den Fall einer Betonüberdeckung von 15 cm. Gemäß Tab. 4.32 wurde als Heizmitteltemperatur 33,1 °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

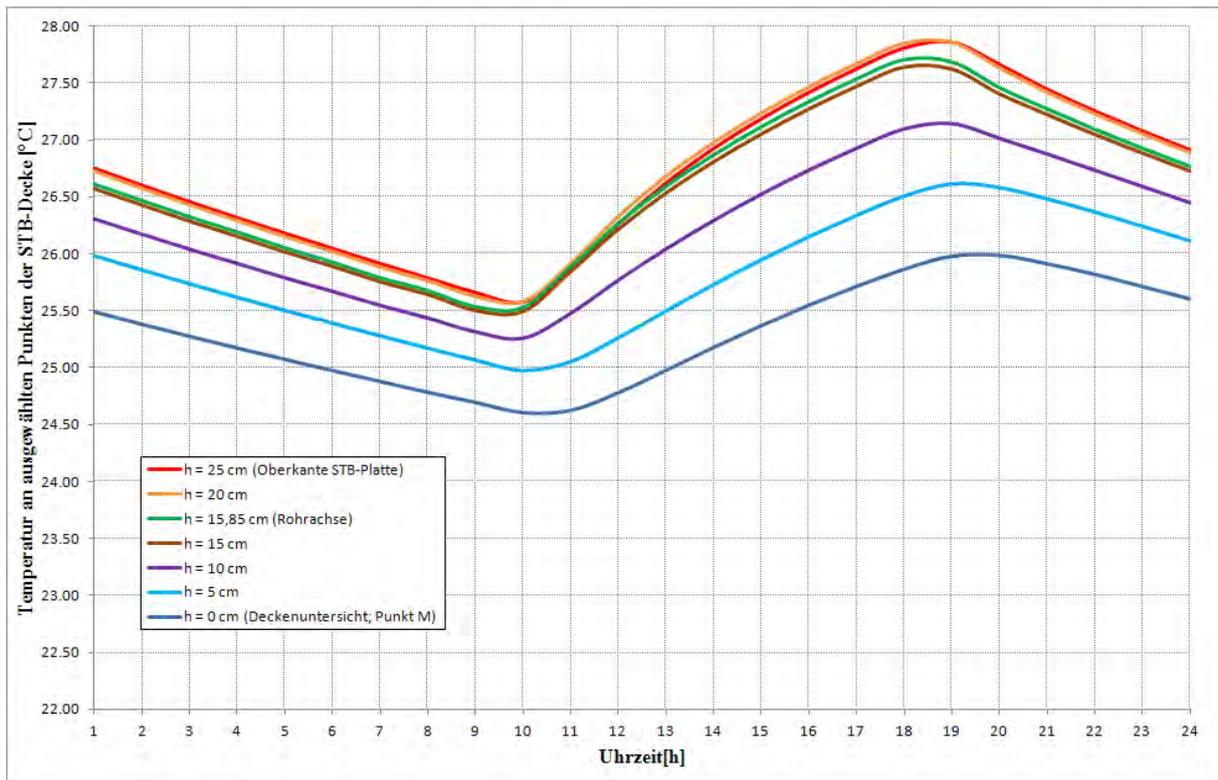


Abb. 4.76: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; **Betonüberdeckung 15 cm**

In diesem Fall liegen die Tagesverläufe der Temperatur für alle Punkte mit einem Abstand von größer als 15 cm von der Deckenuntersicht nahe beieinander. Dies bedeutet, dass die obersten 10 cm der Stahlbetondecke im Bereich der Symmetrieebene in der Mitte zwischen jeweils zwei Rohren während des gesamten Tagesverlaufs nahezu isotherm sind. Ein in diesem Bereich positionierter Sensor müsste bei Messung einer Temperatur von 27,7 °C das Signal zur Abschaltung an die Umwälzpumpe schicken.

Einen genaueren Aufschluss über die Temperaturverteilung um 17 Uhr gibt folgendes Isothermenbild.

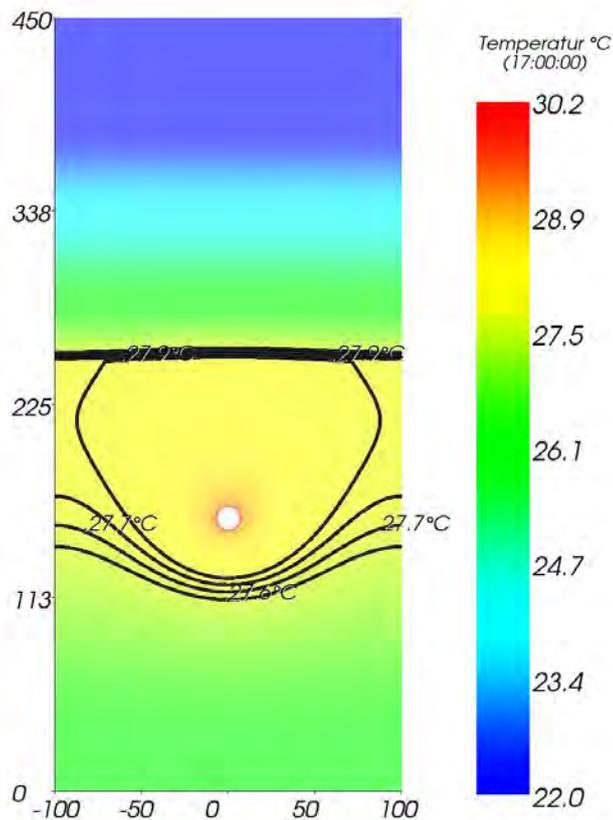


Abb. 4.77: Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke um 17 Uhr; **Betonüberdeckung 15 cm**

Die zweidimensional errechnete Temperaturverteilung bestätigt die aus Abb. 4.76 abgeleitete Aussage, wonach im Bereich der Symmetrieebene die obersten 10 cm der Betondecke nahezu isotherm sind.

Anmerkung: Zwecks besserer Lesbarkeit von Abb. 4.77 wurden Isothermen nur im Temperaturbereich zwischen 27,5 °C und 27,9 °C im Abstand von jeweils 0,1 K ausgezeichnet.

In Ergänzung zu den bisherigen Untersuchungen wird im Folgenden die Symmetrieebene durch die Rohrachse (blaue Linie in Abb. 4.71) auf ihre Eignung für die Positionierung eines Temperatursensors analysiert. In folgender Abbildung sind die Tagesgänge der Temperatur an 6 Punkten im Abstand von 5 cm für den Fall einer Betonüberdeckung von 5 cm dargestellt. Gemäß Tab. 4.30 wurde als Heizmitteltemperatur 31,1 °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

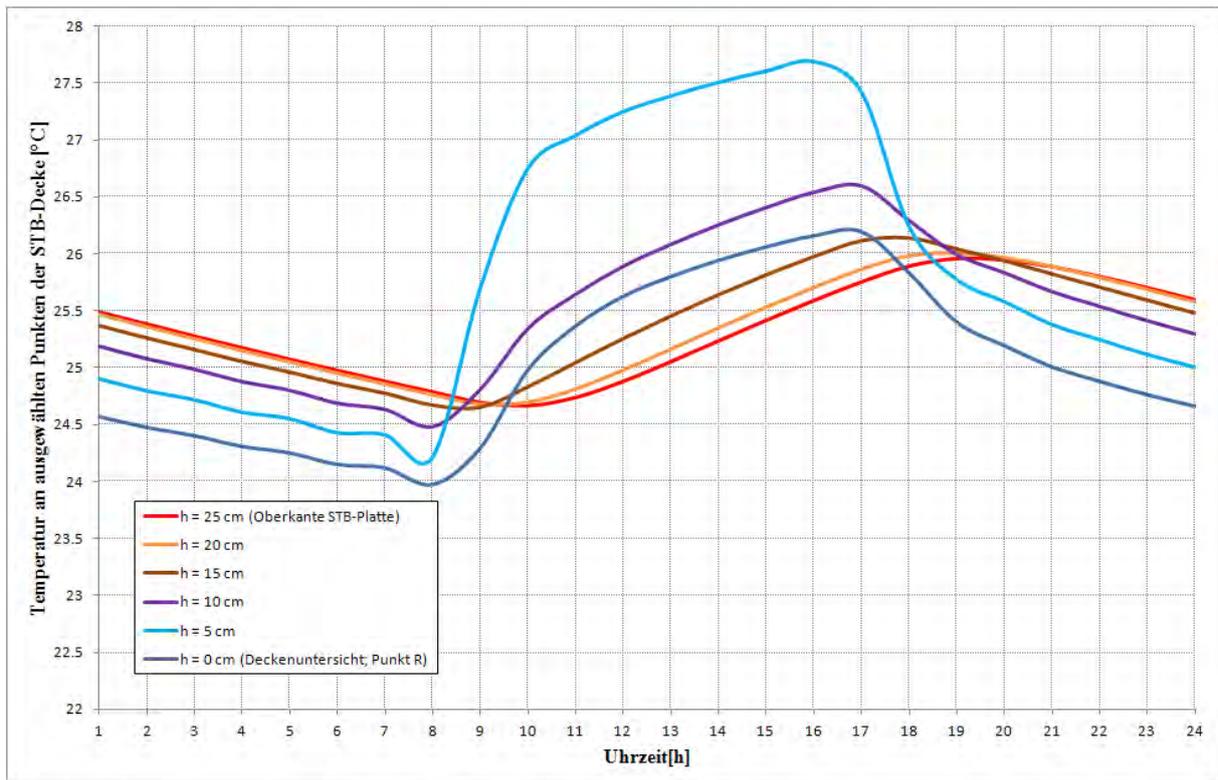


Abb. 4.78: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; Betonüberdeckung 15 cm; Ebene durch die Rohrachse

Im Gegensatz zur Abb. 4.72 sind die Tagesverläufe der Temperatur an den ausgewählten Punkten stark unterschiedlich. Dies bedeutet, dass entlang der Symmetrielinie durch die Rohrachse große Temperaturunterschiede vorherrschen und die von einem Fühler gemessenen Temperaturen eine starke Abhängigkeit von seiner Lage aufweisen werden. Aus diesem Grund ist die Positionierung in dieser Symmetrieebene nicht zu empfehlen.

Anmerkung: Bei den auffallend hohen Temperaturen an dem Punkt mit 5 cm Abstand von der Deckenuntersicht (hellblaue Linie in Abb. 4.78) handelt es sich um die Temperaturen an der äußeren Oberfläche des Heizrohrs.

Auch die Isothermendarstellung in Abb. 4.73 weist auf die großen Temperaturunterschiede entlang der vertikalen Symmetrieebene durch die Rohrachse hin. Der Vergleich mit den Abb. 4.75 und Abb. 4.77 zeigt, dass diese Situation bei jeder Betonüberdeckung unverändert besteht.

Conclusio

Die durchgeführten rechnerischen Untersuchungen über die Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke führen auf folgende Erkenntnisse in Hinblick auf die Positionierung des Kerntemperaturfühlers.

- Der Kerntemperaturfühler sollte in der Mitte zwischen jeweils 2 Rohren des Registers positioniert werden. Um einer Überhitzung der Deckenuntersicht wirksam zu begegnen ist der Fühler im Bereich des Zulaufs des Heizmittels zu installieren, da dort die höchsten Heizmitteltemperaturen auftreten.
- In Bezug auf die Höhenlage – d. h. des Abstands von der Deckenuntersicht - des Fühlers ist eine Positionierung in Höhe des Rohrregisters zu bevorzugen. Da sich in diesem Bereich – unabhängig von der Betonüberdeckung – die Temperatur in vertikaler Richt-

ung nur wenig ändert, ist eine Änderung der vertikalen Position des Temperaturfühlers in der Größenordnung von ± 5 cm unproblematisch möglich.

- Eine horizontale Verschiebung des Fühlers weg von der Mitte zwischen 2 Rohren sollte hingegen vermieden werden, da das Temperaturgefälle in dieser Richtung stark ausgeprägt ist.
- Die Genauigkeit des Messfühlers sollte in der Größenordnung von mindestens 0,1 K liegen.
- Bei 5 cm Betonüberdeckung liegt die Obergrenze für den Messwert der „Kerntemperatur“ mit 26,2 °C nur unwesentlich über der Obergrenze für die Deckenuntersicht (26,0 °C). Bei 10 cm Betonüberdeckung liegt der entsprechende Wert bei 26,9 °C, bei 15 cm Betonüberdeckung bei 27,7 °C.

IV.1.3.2 Aufheiz- und Abkühlvorgänge

Hier soll die Frage nach den benötigten Zeiten für die Aufheiz- bzw. Abkühlphase einer thermisch aktivierten Geschoßdecke beantwortet werden. In Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters ist zu berechnen, wie viel Zeit nach dem Einschalten der Umwälzpumpe verstreicht bis im Heizfall das Maximum der Wärmeabgabeleistung an der Deckenuntersicht erreicht ist. Ebenso interessiert das thermische Verhalten der aktivierten Decke nach einer Abschaltung der Umwälzpumpe. Auch im Fall der Kühlung sind diese Fragen analog zu beantworten. Der Unterschied zum Heizfall besteht lediglich darin, dass die Wärmeaufnahme an die Stelle der Wärmeabgabe tritt.

Die im vorhergehenden Abschnitt diskutierte instationäre Berechnung unter Verwendung der Tagesperiode ist zur Beantwortung der gestellten Frage insofern nicht geeignet, als die Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung im Tagesverlauf aufgrund des sehr hohen Wärmespeichervermögens der Betondecke nie auf null absinkt. Um den Vorteil der großen Genauigkeit der periodisch eingeschwungenen Rechnung nicht zu verlieren, wird hier an diesem Berechnungsansatz festgehalten, jedoch die Periodenlänge auf 14 Tage – d. h. zwei Wochen – verlängert.

IV.1.3.2.1 Heizfall

Im Fall der Beheizung wird die Lufttemperatur der beiden Räume auch hier zeitlich konstant mit 22 °C angesetzt. Zur Beantwortung der Frage nach den Aufheizzeiten wird angenommen, dass die Umwälzpumpe erst nach Ablauf von einem Tag eingeschaltet wird. Daraufhin läuft die Umwälzpumpe 7 Tage lang mit konstantem Durchfluss, wobei die Temperatur des Heizmediums derart eingeregelt wird, dass die Wärmeabgabeleistung nie den zulässigen Maximalwert von $26,0 \text{ Wm}^{-2}$ überschreitet.

Unter Bezugnahme auf Tab. 4.30 bis Tab. 4.32 wird somit bei einer Betonüberdeckung von 5 cm eine Heizmitteltemperatur von 29,1 °C, für eine Überdeckung von 10 cm 29,7 °C und für eine Überdeckung von 15 cm 30,0 °C angesetzt.

Die folgende Abbildung zeigt den unter diesen Annahmen errechneten Zeitverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht.

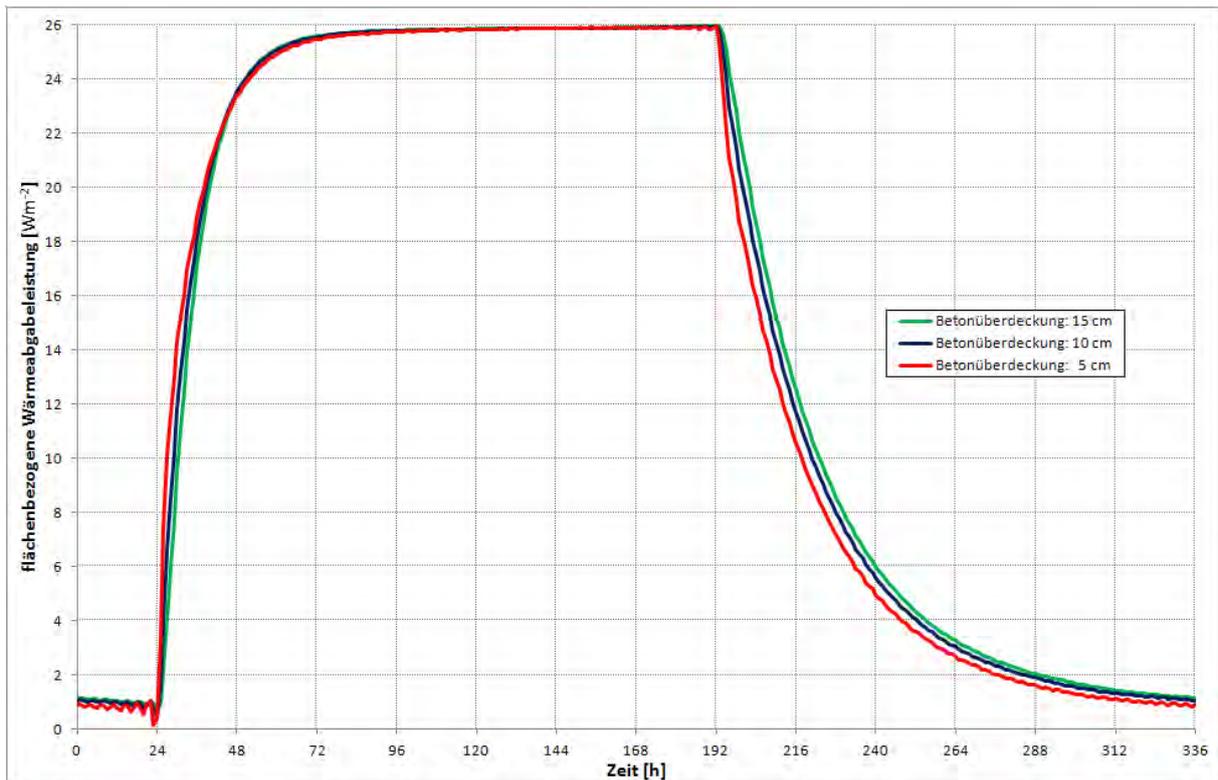


Abb. 4.79: Heizfall: Berechnete Zeitverläufe (Periode: 14 Tage) der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand 20 cm

Es zeigt sich, dass die angenommenen 7 Tage ohne Wärmezufuhr nicht ausreichen, um die Decke gänzlich auskühlen zu lassen. Da die Wärmeabgabeleistung aber bis auf ca. $0,5 \text{ Wm}^{-2}$, d. h. auf ca. 2% des Maximalwerts abfällt ist die Beantwortung der Frage nach dem Aufheiz- und Abkühlverhalten der Decke in sehr guter Näherung möglich ist⁸.

Ein Blick auf Abb. 4.79 zeigt, dass die Wärmeabgabe der Decke nach Anspringen der Umwälzpumpe relativ rasch ansteigt. Im Gegensatz dazu nimmt die Wärmeabgabe der thermisch aktivierten Decke nach der Abschaltung der Umwälzpumpe deutlich langsamer ab. In der in Abb. 4.79 vorliegenden Zeitauflösung sind die Unterschiede in Hinblick auf die Positionierung des Rohrregisters zwar sichtbar aber schwer quantifizierbar.

Aus diesem Grund werden in folgender Abbildung die berechneten Verläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung in den ersten beiden Tagen nach dem Einschalten der Umwälzpumpe zur Stunde 24 dargestellt. Diese Abbildung stellt damit lediglich einen Ausschnitt aus Abb. 4.79 für das interessierende Zeitintervall dar und dient der besseren Interpretierbarkeit der Berechnungsergebnisse.

⁸ Die Schwankungen der berechneten Zeitverläufe sind verfahrensbedingt (Fourier-Zerlegung) und haben keine physikalische Bedeutung.

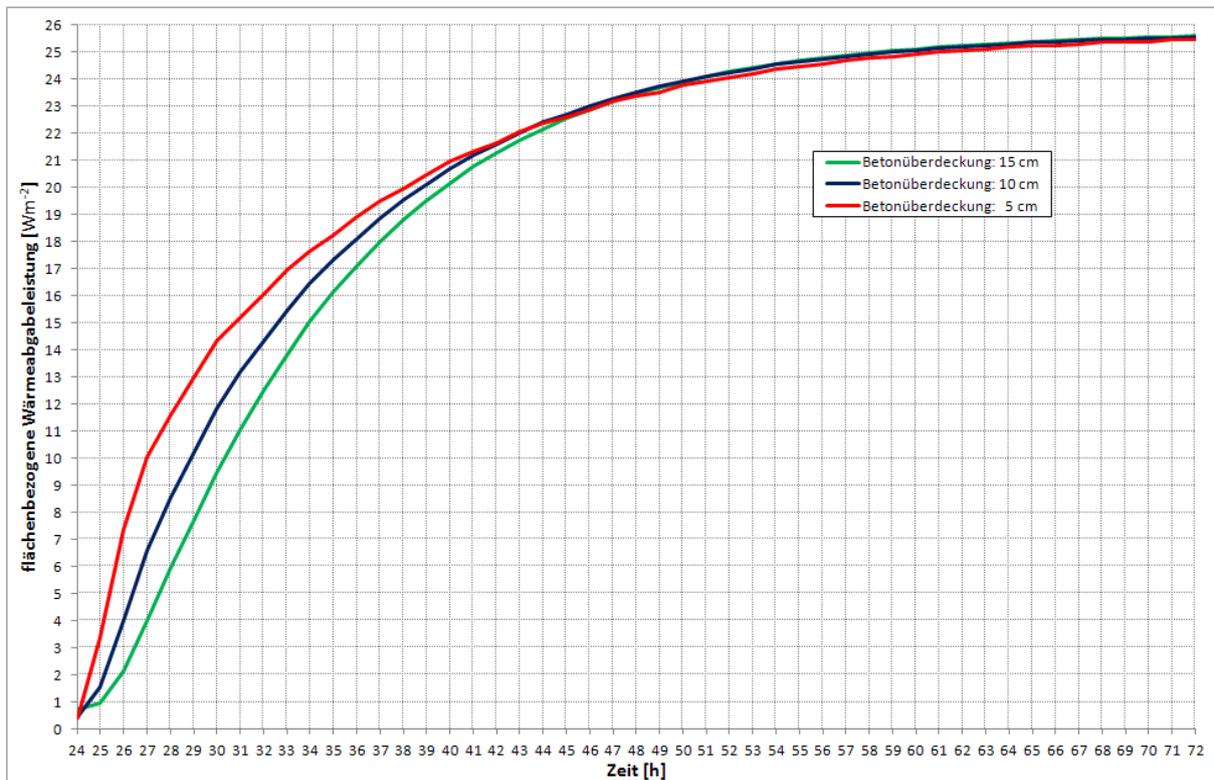


Abb. 4.80: Heizfall: Aufheizverhalten der thermisch aktivierten Decke; Ausschnitt aus Abb. 4.79

Es zeigt sich, dass die Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht bei 5 cm Betonüberdeckung (rote Linie in Abb. 4.80) in den Stunden nach Einschaltung der Umwälzpumpe schneller ansteigt als bei größeren Betonüberdeckungen. 21 Stunden nach dem Einschaltzeitpunkt (Stunde 45 in Abb. 4.80) liegt die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung mit etwa $22,6 \text{ Wm}^{-2}$ bei ca. 87% der maximalen Wärmeabgabeleistung von 26 Wm^{-2} und ist ab diesem Zeitpunkt nahezu unabhängig von der Lage des Rohrregisters.

Der Einfluss der Betonüberdeckung - d. h. der Lage des Rohrregisters - auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht wird in folgender Tabelle quantifiziert.

Zeitpunkt (nach Abb. 4.80)	Laufzeit Umwälzpumpe [h]	flächenbezogene Wärmeabgabeleistung [Wm^{-2}] bei einer Betonüberdeckung von		
		5 cm	10 cm	15 cm
30	6	14,3	11,8	9,5
36	12	18,9	18,1	17,1
42	18	21,7	21,6	21,3
45	21	22,6	22,7	22,5
48	24	23,4	23,5	23,5
72	48	25,5	25,6	25,6
96	72	25,8	25,8	25,8

Tab. 4.34: flächenbezogene Wärmeabgabeleistungen in Wm^{-2} zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einschalten der Umwälzpumpe in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung des Rohrregisters

Ersichtlich liegt die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung nach einer Laufzeit der Umwälzpumpe von 24 h, also einem Tag, mit ca. $23,5 \text{ Wm}^{-2}$ bei 90% der maximalen Wärmeabgabeleistung von 26 Wm^{-2} und steigt in den nächsten Tagen nur noch langsam an. Nach drei Tagen ist mit $25,8 \text{ Wm}^{-2}$ die maximale Wärmeabgabeleistung nahezu erreicht. Wie bereits betont, schlägt sich die Lage des Rohrregisters nur während des ersten Tages nach dem Einschalten der Umwälzpumpe auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht nieder.

In folgender Abbildung sind die berechneten Verläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung nach dem Abschalten der Umwälzpumpe zur Stunde 192 (siehe Abb. 4.79) dargestellt. Diese Abbildung ist ein Ausschnitt aus Abb. 4.79 und zeigt das Auskühlverhalten der Decke in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung.

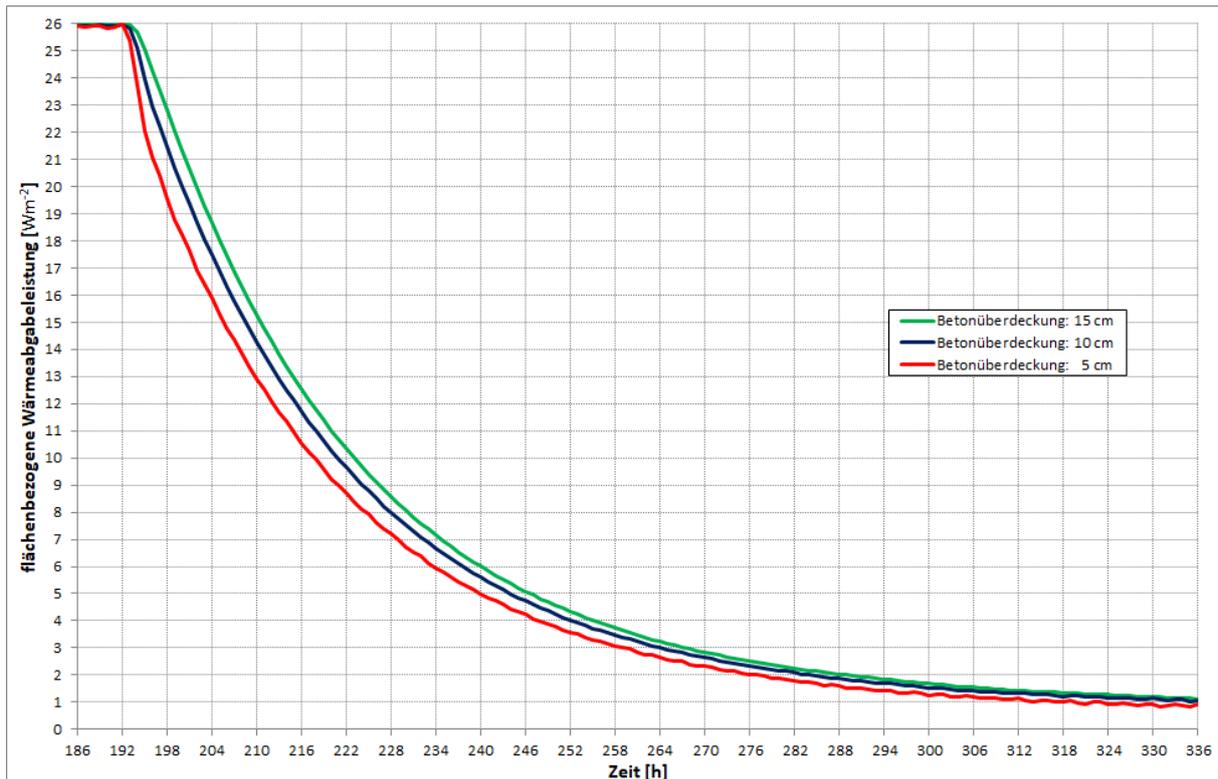


Abb. 4.81: Heizfall: Abnahme der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke nach Abschaltung der Umwälzpumpe; Ausschnitt aus Abb. 4.79

6 Tage nach dem Abschalten der Umwälzpumpe liegt die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung noch immer bei ca. 1 Wm^{-2} . Ersichtlich geht die Wärmeabgabeleistung asymptotisch gegen null. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist allerdings zu beachten, dass hier das Auskühlverhalten der thermisch aktivierten Decke bei vorgegebenen und auf $22,0 \text{ °C}$ konstant gehaltenen Lufttemperaturen simuliert wurde. Die Berücksichtigung des Absinkens der Lufttemperaturen nach Abschaltung der Wärmezufuhr verlangt neben der Modellierung der Decke auch die Festlegung aller thermisch relevanten Details des beheizten Raums und wird im folgenden Kapitel abgehandelt.

Der Einfluss der Betonüberdeckung auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht ist sichtbar, jedoch nicht ausgeprägt und wird in der folgenden Tabelle quantifiziert.

Zeitpunkt (nach Abb. 4.81)	Stillstand der Umwälzpumpe [h]	flächenbezogene Wärmeabgabeleistung [Wm^{-2}] bei einer Betonüberdeckung von		
		5 cm	10 cm	15 cm
192	0	26,0	26,0	26,0
204	12	16,9	18,7	20,0
216	24	11,3	12,5	13,4
240	48	5,0	5,6	6,0
264	72	2,8	3,1	3,4
288	96	1,6	1,9	2,1
312	120	1,1	1,3	1,4
336	144	0,9	1,1	1,1

Tab. 4.35: flächenbezogene Wärmeabgabeleistungen in Wm^{-2} zu verschiedenen Zeitpunkten nach Abschaltung der Umwälzpumpe in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung des Rohrregisters

Es zeigt sich, dass die Abnahme der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht bei kleiner werdenden Betonüberdeckungen etwas rascher verläuft. Dieser durchaus erwartbare Effekt ist in den ersten Tagen nach der Abschaltung der Umwälzpumpe ausgeprägt, wird jedoch mit fortschreitender Dauer der Heizungsunterbrechung immer kleiner.

Die in Abbildung Abb. 4.81 gezeigten Zeitverläufe sind geeignet, um Rückschlüsse auf die in der Decke gespeicherte Wärmemenge zu treffen. Diese Wärmemenge zeigt sich in Abb. 4.81 als Fläche unter der jeweiligen Kurve und wird in Whm^{-2} gemessen. Ein direkter Vergleich zwischen den errechneten Wärmemengen in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung ist insofern nicht sinnvoll als den Berechnungsergebnissen verschiedene Rohrtemperaturen zugrunde gelegt wurden. Vergleichbar erscheinen hingegen die auf die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ zwischen Rohrtemperatur und Lufttemperatur unterhalb der Decke bezogenen Berechnungsergebnisse. Diese Größen haben mit $\text{Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$ die Dimension einer flächenbezogenen Wärmekapazität und sind in folgender Tabelle ausgewiesen.

Betonüberdeckung [cm]	Wärmemenge [Whm^{-2}]	$\Delta\Theta$ [K]	Wärmekapazität [$\text{Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
5	773,1	7,1	109
10	859,2	7,7	112
15	916,0	8,3	110

Tab. 4.36: Mittels Integration der in Abb. 4.81 gezeigten Zeitverläufe errechnete flächenbezogene Wärmemengen sowie die daraus abgeleiteten flächenbezogenen Wärmekapazitäten

Bei der Interpretation der in Tab. 4.36 als „Wärmekapazität“ ausgewiesenen Werte ist zu beachten, dass zum einen die zur Ermittlung der flächenbezogenen Wärmemengen verwendeten Integrationsmethoden mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet sind. Zum anderen müssen auch aufgrund des Umstands, dass die Auskühlvorgänge durch die Simulation nicht vollständig abgebildet werden konnten, die errechneten „Wärmekapazitäten“ als Näherungswerte eingestuft werden. Als Ergebnis dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass die auf die Differenz $\Delta\Theta$ zwischen der Rohrtemperatur und der Solltemperatur im Raum sowie die Re-

gisterfläche bezogene Wärmemenge im Fall der 25 cm dicken Stahlbetondecke bei ca. 110 [Whm⁻²K⁻¹] liegt und von der Betonüberdeckung nahezu unabhängig ist. Hierbei ist insbesondere die geringe Abhängigkeit der pro Grad Temperaturdifferenz gespeicherten Wärmemenge von der Lage des Rohrregisters in der Stahlbetondecke zu betonen. Aufgrund der sehr guten Wärmeleitfähigkeit von Stahlbeton wird somit – faktisch unabhängig von der Lage des Rohrregisters – der gesamte Querschnitt der Stahlbetondecke für die Wärmespeicherung genutzt.

Wird nun angenommen, dass die Temperatur im Rohr konstant gehalten wird, aber die Raumlufttemperatur variiert, so entspricht die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ ersichtlich der Schwankungsbreite der Raumlufttemperatur. Die in der Betondecke gespeicherte, flächenbezogene Wärmemenge ergibt sich im Fall der 25 cm dicken Stahlbetondecke und dem für das Heizregister angenommenen Rohrabstand von 20 cm durch die Multiplikation von 110 [Whm⁻²K⁻¹] mit dem Wert von $\Delta\Theta$. Ersichtlich wird die einspeicherbare Wärmemenge null, wenn im Raum keine Temperaturschwankung zugelassen, also auf eine fixe Solltemperatur hin geregelt wird. Tritt anstelle der Solltemperatur ein Temperaturband, innerhalb dessen sich die Raumlufttemperatur bewegen darf, so bestimmt die Breite dieses Bands die in der Betondecke eingespeicherte Wärmemenge. Bei einer Breite des Temperaturbands von $\Delta\Theta = 1,0$ K werden somit 110 [Whm⁻²] gespeichert, bei z. B. 2,0 K verdoppelt sich mit 220 [Whm⁻²] die flächenbezogene, einspeicherbare Wärmemenge. Die eingespeicherte Wärmemenge wird schließlich durch Multiplikation mit der Registerfläche erhalten.

Natürlich kommt den skizzierten Überlegungen nur der Charakter einer Grobabschätzung zu. So kann z. B. nicht davon ausgegangen werden, dass die Temperatur im Rohr konstant ist, da die Umwälzpumpe aufgrund der Regelungserfordernisse nicht permanent in Betrieb sein wird.

Dennoch erscheint die Aussage, wonach sich bei konstant angenommener Rohrtemperatur die große Wärmespeicherfähigkeit der Stahlbetondecke nur dann ausnutzen lässt, wenn anstelle einer Solltemperatur ein Temperaturband vorgegeben wird, von wesentlicher Bedeutung. Mit ansteigender Breite dieses Temperaturbands nimmt auch die in der Decke einspeicherbare Wärmemenge zu.

Conclusio:

Die instationär durchgeführten Detailuntersuchungen zum Aufheiz- und Abkühlverhalten einer thermisch aktivierten Stahlbetondecke im Fall der winterlichen Beheizung führen auf folgende Ergebnisse:

- Die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht steigt im Zuge des Aufheizvorgangs nach dem Einschalten der Umwälzpumpe steil an und erreicht nach einem Tag ca. 90% des Maximalbetrags. Innerhalb dieser Zeit erfolgt der Anstieg der Wärmeabgabeleistung bei geringerer Betonüberdeckung des Rohrregisters etwas rascher als bei größeren Betonüberdeckungen. Nach ca. 21 h ab dem Einschaltzeitpunkt der Umwälzpumpe zeigt der zeitliche Verlauf der Wärmeabgabeleistung keine nennenswerte Abhängigkeit von der Betonüberdeckung mehr.
- Nach dem Abschalten der Umwälzpumpe fällt im Zuge des Abkühlvorgangs die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht vergleichsweise langsam ab. Nach 7 Tagen ist die Wärmeabgabeleistung auf ca. 2% des Ausgangswerts abgefallen. Zu dieser Zeit ist eine Abhängigkeit der Wärmeabgabe von der Betonüberdeckung nicht mehr zu erkennen. In den Tagen davor fällt die Wärmeabgabeleistung bei kleiner Betonüberdeckung etwas schneller ab als bei größeren Betonüberdeckungen.

- Aus dem Abkühlvorgang kann auf die gespeicherte flächenbezogene Wärmemenge zurückgeschlossen werden. Im Fall der hier untersuchten 25 cm dicken Stahlbetondecke liegt die auf die Differenz zwischen der Rohrtemperatur und der Solltemperatur im Raum sowie die Registerfläche bezogene Wärmemenge bei ca. $110 \text{ [Whm}^{-2}\text{K}^{-1}]$. Dieser Wert erweist sich als von der Betonüberdeckung, also der Lage des Rohrregisters in der Decke, nahezu unabhängig.

IV.1.3.2.2 Kühlfall

Im Fall der Kühlung wird die Lufttemperatur der beiden Räume zeitlich konstant mit $26 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt. Zur Beantwortung der Frage nach den Abkühlzeiten wird angenommen, dass die Umwälzpumpe erst nach Ablauf von einem Tag eingeschaltet wird. Daraufhin läuft die Umwälzpumpe 7 Tage lang mit konstantem Durchfluss, wobei die Temperatur des Kühlmediums derart eingeregelt wird, dass die Wärmeaufnahmeleistung der Decke nie den zulässigen Maximalwert von $43,2 \text{ Wm}^{-2}$ überschreitet. Für eine Betonüberdeckung von 5 cm ergibt sich daraus eine Kühlmitteltemperatur von $17,0 \text{ }^\circ\text{C}$, für eine Überdeckung von 10 cm eine von $15,9 \text{ }^\circ\text{C}$ und für eine Überdeckung von 15 cm $14,9 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt.

Die folgende Abbildung zeigt die unter diesen Annahmen errechneten Zeitverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung der Deckenuntersicht.

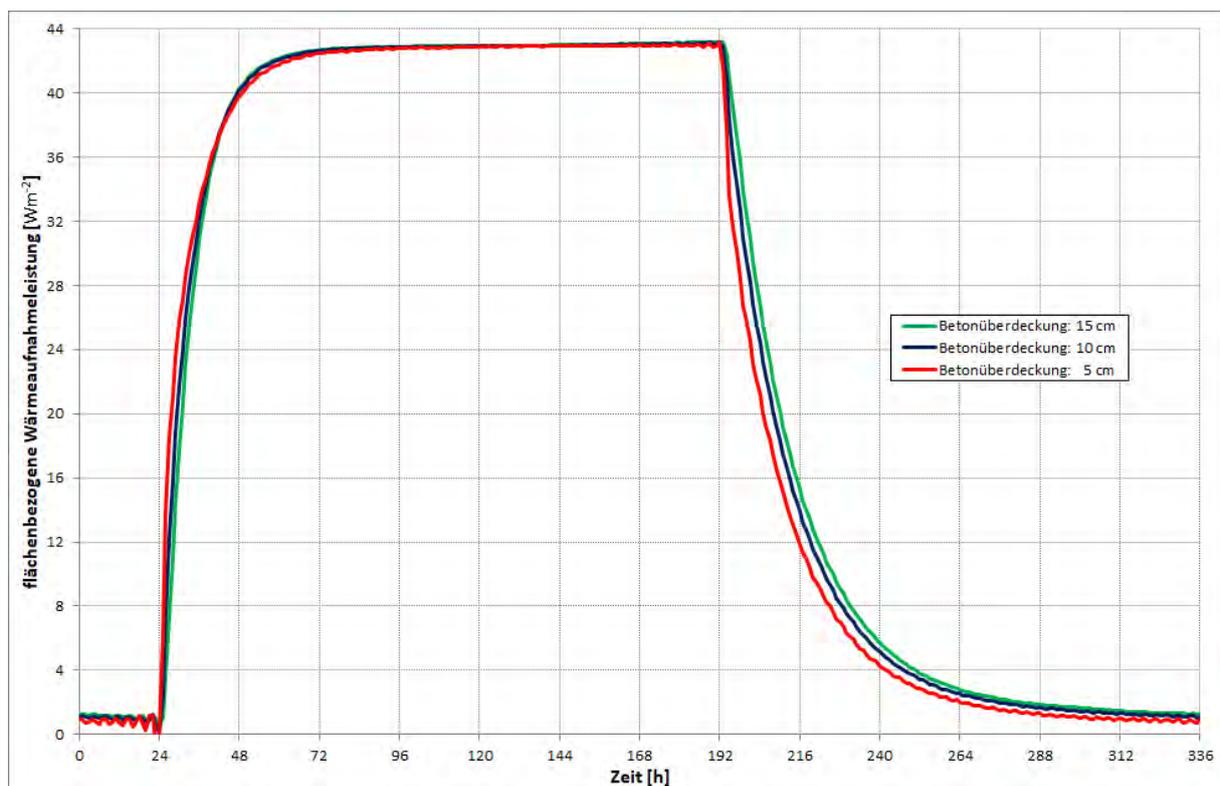


Abb. 4.82: Kühlfall: Berechnete Zeitverläufe (Periode: 14 Tage) der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr $17 \times 2,0$; Achsabstand 20 cm

Qualitativ sind die errechneten Zeitverläufe den in Abb. 4.79 gezeigten Verläufen für die Wärmeaufnahmeleistung im Heizfall sehr ähnlich. Aufgrund der im Kühlfall größeren Wärmeübergangskoeffizienten an der Deckenuntersicht liegt die maximale Wärmeaufnahmeleistung jedoch wesentlich höher.

Wie im Falle der Beheizung werden in folgender Abbildung die berechneten Verläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung in den ersten beiden Tagen nach dem Einschalten der Umwälzpumpe zur Stunde 24 dargestellt. Diese Abbildung stellt damit lediglich einen Ausschnitt aus Abb. 4.82 für das interessierende Zeitintervall dar und dient der besseren Interpretierbarkeit der Berechnungsergebnisse.

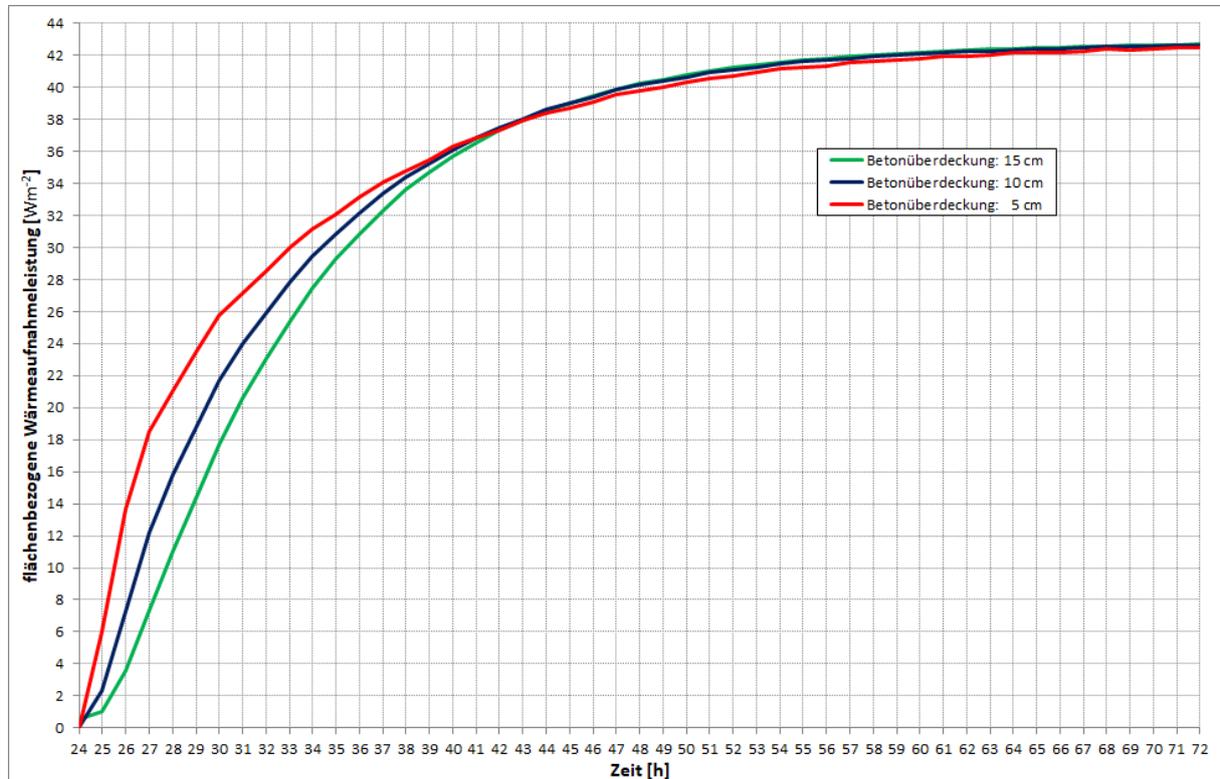


Abb. 4.83. Kühlfall: Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke; Ausschnitt aus Abb. 4.82

Analog zum Fall der Beheizung zeigt sich, dass die Wärmeaufnahmeleistung der Deckenuntersicht bei 5 cm Betonüberdeckung (rote Linie in Abb. 4.83) in den Stunden nach Einschaltung der Umwälzpumpe schneller ansteigt als bei größeren Betonüberdeckungen. 21 Stunden nach dem Einschaltzeitpunkt (Stunde 45 in Abb. 4.83) liegt die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung mit etwa $38,9 \text{ Wm}^{-2}$ bei ca. 90% der maximalen Wärmeaufnahmeleistung von $43,2 \text{ Wm}^{-2}$ und ist ab diesem Zeitpunkt nahezu unabhängig von der Lage des Rohrregisters.

Der Einfluss der Betonüberdeckung - d. h. der Lage des Rohrregisters - auf die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung der Deckenuntersicht wird in folgender Tabelle quantifiziert.

Zeitpunkt (nach Abb. 4.83)	Laufzeit Umwälzpumpe [h]	flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung [Wm^{-2}] bei einer Betonüberdeckung von		
		5 cm	10 cm	15 cm
30	6	25,7	21,7	17,6
36	12	33,1	32,1	30,9
42	18	37,3	37,5	37,3
45	21	38,7	39,0	39,0
48	24	39,8	40,2	40,2
72	48	42,5	42,6	42,7
96	72	42,8	42,9	42,9

Tab. 4.37: flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistungen in Wm^{-2} zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einschalten der Umwälzpumpe in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung des Rohrregisters

Ersichtlich liegt die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung nach einer Laufzeit der Umwälzpumpe von 24 h, also einem Tag, mit ca. $40,0 \text{ Wm}^{-2}$ bei 93% der maximalen Wärmeaufnahmeleistung von $43,2 \text{ Wm}^{-2}$ und steigt in den nächsten Tagen nur noch langsam an. Nach drei Tagen ist mit $42,9 \text{ Wm}^{-2}$ die maximale Wärmeabgabeleistung nahezu erreicht. Wie bereits betont, schlägt sich die Lage des Rohrregisters nur während des ersten Tages nach dem Einschalten der Umwälzpumpe auf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht nieder.

In folgender Abbildung sind die berechneten Verläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung nach dem Abschalten der Umwälzpumpe zur Stunde 192 (siehe Abb. 4.82) dargestellt. Diese Abbildung ist ein Ausschnitt aus Abb. 4.82 und zeigt die Abnahme der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung der Decke in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung.

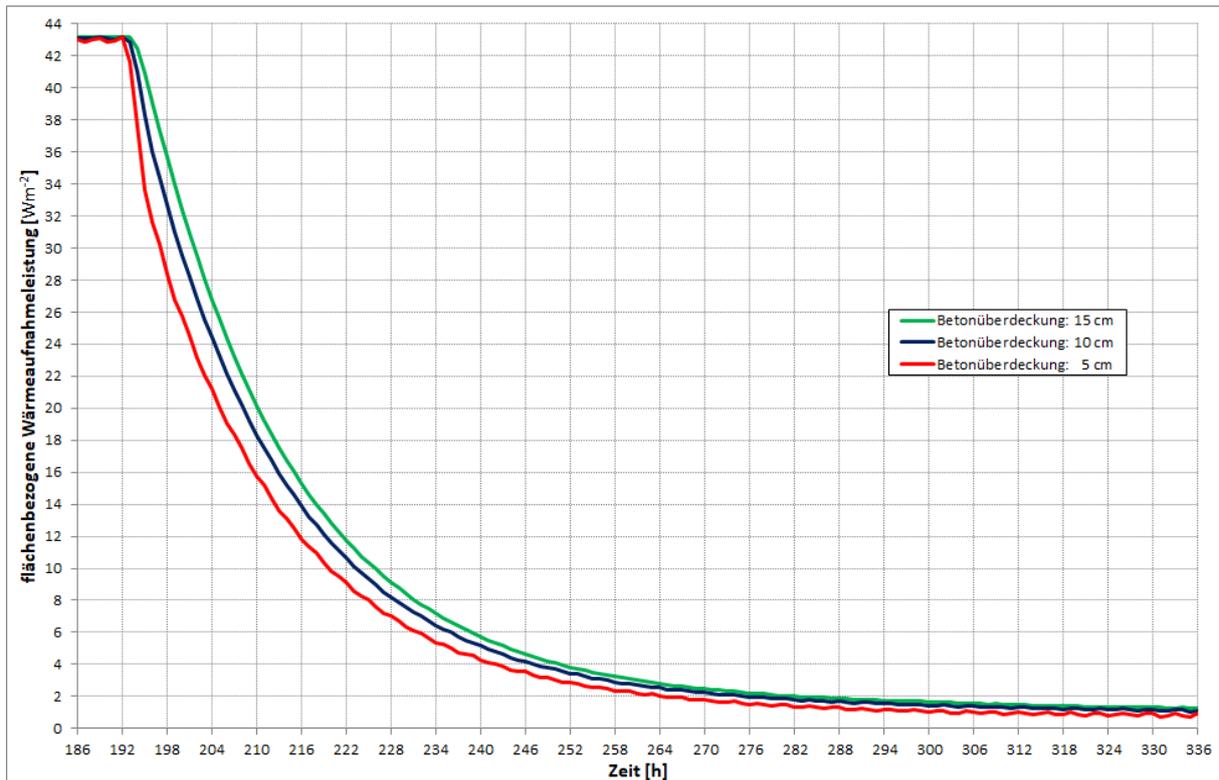


Abb. 4.84: Kühlfall: Abnahme der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke nach Abschaltung der Umwälzpumpe; Ausschnitt aus Abb. 4.82

6 Tage nach dem Abschalten der Umwälzpumpe liegt die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung noch immer bei ca. $1,1 \text{ Wm}^{-2}$. Ersichtlich geht die Wärmeaufnahmeleistung asymptotisch gegen null. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist allerdings zu beachten, dass hier das Aufheizverhalten der thermisch aktivierten Decke bei vorgegebenen und auf $26,0 \text{ °C}$ konstant gehaltenen Lufttemperaturen simuliert wurde. Die Berücksichtigung des Anstiegs der Lufttemperaturen nach Abschaltung der Umwälzpumpe verlangt neben der Modellierung der Decke auch die Festlegung aller thermisch relevanten Details des zu kühlenden Raums und wird im folgenden Kapitel abgehandelt.

Der Einfluss der Betonüberdeckung auf die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung der Deckenuntersicht ist deutlich sichtbar und wird in der folgenden Tabelle quantifiziert.

Zeitpunkt (nach Abb. 4.84)	Stillstand der Umwälzpumpe [h]	flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung [Wm^{-2}] bei einer Betonüberdeckung von		
		5 cm	10 cm	15 cm
192	0	43,2	43,2	43,2
204	12	21,2	24,4	26,8
216	24	11,8	13,9	15,3
240	48	4,3	5,2	5,7
264	72	2,1	2,5	2,8
288	96	1,3	1,7	1,9
312	120	1,0	1,3	1,5
336	144	0,9	1,1	1,2

Tab. 4.38: flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistungen in Wm^{-2} zu verschiedenen Zeitpunkten nach Abschaltung der Umwälzpumpe in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung des Rohrregisters

Es zeigt sich, dass die Abnahme der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung der Deckenuntersicht bei kleiner werdenden Betonüberdeckungen rascher verläuft. Dieser durchaus erwartbare Effekt ist in den ersten Tagen nach der Abschaltung der Umwälzpumpe ausgeprägt, wird jedoch mit fortschreitender Dauer der Heizungsunterbrechung immer kleiner.

Conclusio:

Die instationär durchgeführten Detailuntersuchungen zum Aufheiz- und Abkühlverhalten einer thermisch aktivierten Stahlbetondecke im Fall des Kühlbetriebs führen auf folgende Ergebnisse:

- Die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung der Deckenuntersicht steigt im Zuge des Abkühlvorgangs nach dem Einschalten der Umwälzpumpe steil an und erreicht nach einem Tag ca. 93% des Maximalbetrags. Innerhalb dieser Zeit erfolgt der Anstieg der Wärmeabgabeleistung bei geringerer Betonüberdeckung des Rohrregisters etwas rascher als bei größeren Betonüberdeckungen. Nach ca. 21 h ab dem Einschaltzeitpunkt der Umwälzpumpe zeigt der zeitliche Verlauf der Wärmeaufnahmeleistung nur noch eine kaum ausgeprägte Abhängigkeit von der Betonüberdeckung.
- Nach dem Abschalten der Umwälzpumpe fällt im Zuge des Aufheizvorgangs die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung der Deckenuntersicht vergleichsweise langsam ab. Nach 7 Tagen ist die Wärmeabgabeleistung auf ca. 2% des Ausgangswerts abgefallen. Zu dieser Zeit ist eine Abhängigkeit der Wärmeabgabe von der Betonüberdeckung kaum mehr zu erkennen. In den Tagen davor fällt die Wärmeabgabeleistung bei kleiner Betonüberdeckung etwas schneller ab als bei größeren Betonüberdeckungen.

IV.2 Thermisch aktivierte oberste Decke

Im Heizfall gibt das in der Decke befindliche Rohrregister Wärme nicht nur an den unterhalb der Geschoßdecke liegenden Raum, sondern grundsätzlich auch an den über der Decke liegenden Raum ab. Im Fall der bisher untersuchten Geschoßdecke ist dieser Effekt insofern nicht von großer Bedeutung, als im Regelgeschoss die an den über der Decke liegenden Raum abfließende Wärmemenge durch den Zufluss von Wärme durch die Deckenaktivierung des darunter liegenden Raums genau kompensiert wird.

Anders sieht die Situation in den Räumen des obersten Geschoßes aus. Die vom Rohrregister nach oben abfließende Wärme kommt entweder dem unbeheizten Dachraum zu oder geht direkt nach außen verloren. Da dieser Effekt bei der Auslegung der Bauteilaktivierung berücksichtigt werden muss, soll im Folgenden die Abhängigkeit der nach oben verloren gehenden Wärme vom Aufbau der obersten Geschoßdecke, die als Flachdach ausgebildet sein soll, untersucht werden.

In den folgenden Tabellen sind die Schichtenfolgen der drei untersuchten Flachdachaufbauten aufgelistet. Der Flachdachaufbau von Tab. 4.39 erreicht einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,19 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und entspricht damit den aktuellen Vorgaben ($U \leq 0,20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) der OIB-Richtlinie 6 (10). Dächer mit deutlich weniger Wärmedämmung sind im Neubau somit nicht mehr zulässig.

	d [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	c [$\text{kJkg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
oben				
Rundkies	0,0600			
Filterflies	0,0020			
Dachabdichtung	0,0100	0,170	1200	1,26
EPS Dämmplatte	0,1800	0,036	25	1,40
Dampfspernbahn	0,0040			
Stahlbetondecke	0,2500	2,200	2400	1,00
unten				

Tab. 4.39: Schichtaufbau der obersten Geschoßdecke; Aufbau entspricht OIB-Richtlinie 6 (Stand: 2015); $U = 0,19 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Für die hier interessierenden wärmetechnischen Berechnungen wird der Schichtaufbau nur bis einschließlich der Dachabdichtung berücksichtigt. Auch die Dampfsperre wird aufgrund von deren geringer Dicke bei der Dateneingabe vernachlässigt.

In folgender Tab. 4.40 ist der Dachaufbau eines besser gedämmten Flachdachs angeführt. Dieser Schichtaufbau ist aus einer aktuell vorliegenden Planung für eine Wohnanlage übernommen und mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ der Niedrigenergiebauweise zuzuordnen.

	d [m]	λ [Wm⁻¹K⁻¹]	ρ [kgm⁻³]	c [kJkg⁻¹ K⁻¹]
oben				
Rundkies	0,0600			
Rohglasflies	0,0010			
Gummigranulatplatte	0,0100			
Dachabdichtung	0,0100	0,170	1200	1,26
PUR Dämmplatte	0,1400	0,023	40	1,26
Dampfsperrbahn	0,0040			
Stahlbetondecke	0,2500	2,200	2400	1,00
unten				

Tab. 4.40: Schichtaufbau der obersten Geschoßdecke; Niedrigenergiestandard; $U = 0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

In der folgenden Tab. 4.41 ist ein hoch gedämmter Flachdachaufbau skizziert, der mit $U = 0,11 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ den Passivhausstandard erfüllt.

	d [m]	λ [Wm⁻¹K⁻¹]	ρ [kgm⁻³]	c [kJkg⁻¹ K⁻¹]
oben				
Rundkies	0,0600			
Filterflies	0,0020			
Dachabdichtung	0,0100	0,170	1200	1,26
EPS Dämmplatte	0,3200	0,036	25	1,40
Dampfsperrbahn	0,0040			
Stahlbetondecke	0,2500	2,200	2400	1,00
unten				

Tab. 4.41: Schichtaufbau der obersten Geschoßdecke; Passivhausstandard; $U = 0,11 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Den folgenden Parameterstudien werden die in Tab. 4.39, Tab. 4.40 und Tab. 4.41 gezeigten Flachdachaufbauten zugrunde gelegt, wobei angenommen wird, dass sie thermisch aktiviert sind. Die Lage des Rohrregisters wird mit 5,0 cm Betonüberdeckung (Definition siehe Abb. 4.10) fixiert. Der Außendurchmesser des Rohres wird mit 17 mm angesetzt und der Rohrabstand wiederum als Parameter variiert.

In den folgenden beiden Abbildungen sind die errechneten flächenbezogenen Leitwerte der in den Tab. 4.39 bis Tab. 4.41 gezeigten, thermisch aktivierten Deckenaufbauten jenen der bisher untersuchten Geschoßdecke gegenübergestellt.

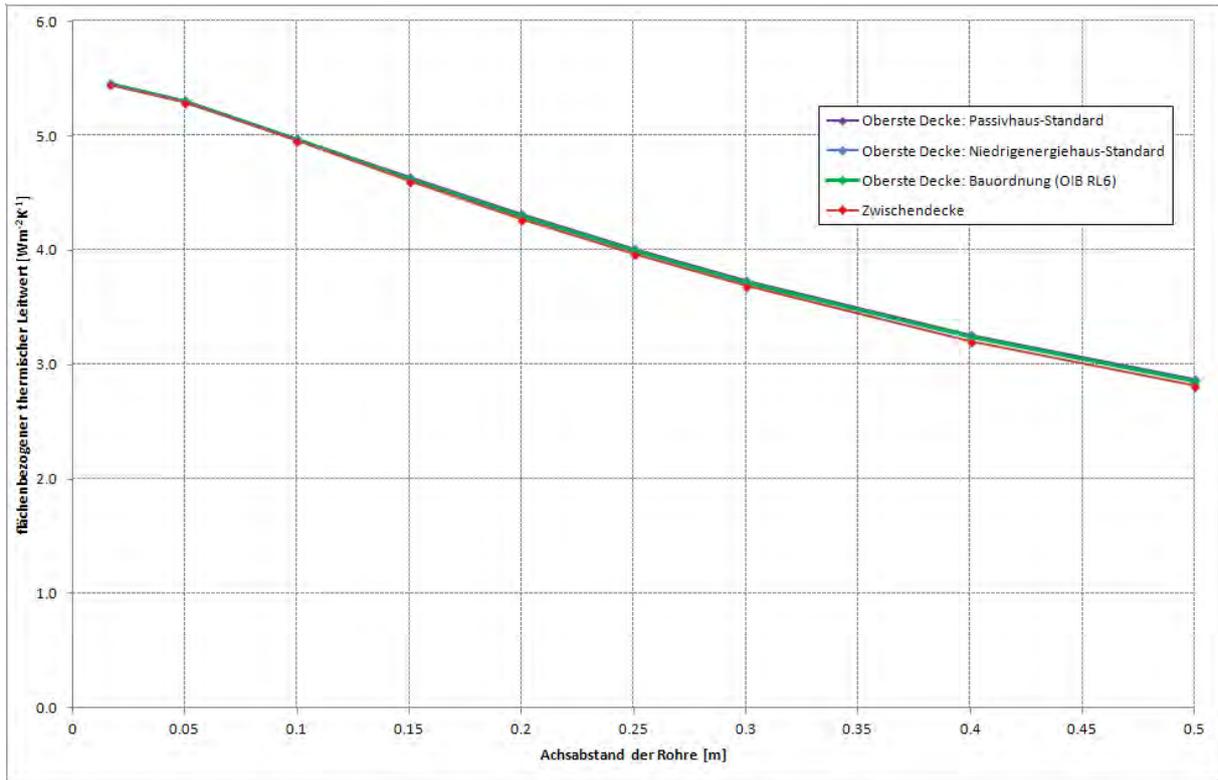


Abb. 4.85: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tab. 4.42 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.85 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
Geschoßdecke	4,5267	-8,0363	5,7018
Oberste Geschoßdecke: Bauordnung (OIB RL6)	4,3468	-7,8778	5,6997
Oberste Geschoßdecke: Niedrigenergiehaus-Standard	4,3026	-7,8387	5,6992
Oberste Geschoßdecke: Passivhaus-Standard	4,2386	-7,7815	5,6985

Tab. 4.42: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>.

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Parameterstudie für den Kühlfall.

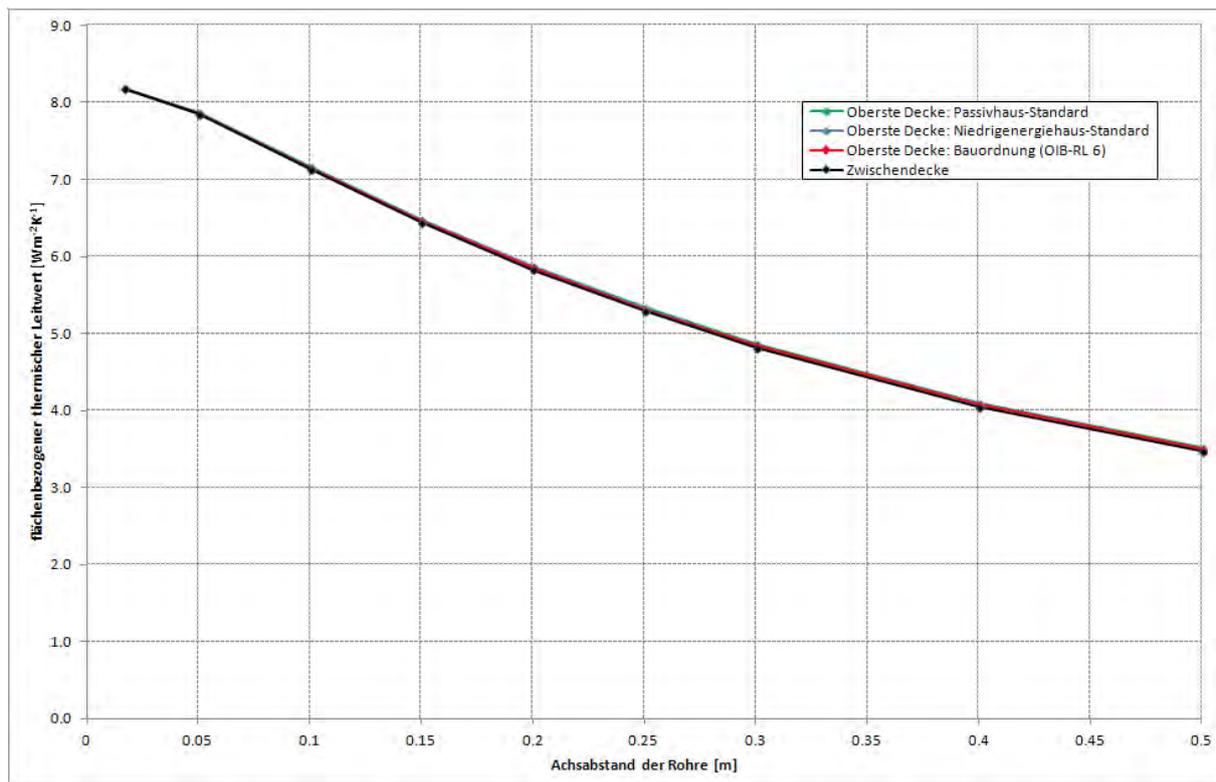


Abb. 4.86: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwert $\Lambda_{r,u}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tab. 4.43 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.86 dargestellten Verläufe.

	a [Wm^4K^{-1}]	b [Wm^3K^{-1}]	c [Wm^2K^{-1}]
Geschoßdecke	12,2030	-16,4280	8,6439
Oberste Geschoßdecke: Bauordnung (OIB RL6)	11,9720	-16,2530	8,6439
Oberste Geschoßdecke: Niedrigenergiehaus-Standard	11,9120	-16,2080	8,6439
Oberste Geschoßdecke: Passivhaus-Standard	11,8240	-16,1410	8,6439

Tab. 4.43: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwert $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung <4.2>.

Es wird deutlich, dass sich sowohl im Fall der Beheizung als auch im Fall der Kühlung der flächenbezogene thermische Leitwert zwischen Rohrregister und dem unterhalb der Geschoßdecke liegenden Raum mit dem konstruktiven Aufbau der Decke kaum ändert. Die hier untersuchten Flachdachaufbauten führen im Vergleich zu der bisher betrachteten Geschoßdecke zu geringfügig höheren flächenbezogenen Leitwerten, wobei der Unterschied eher bei größerem Rohrabstand sichtbar wird.

Die zur Konstant-Haltung der Temperatur des Fluids im Rohr erforderliche Wärmeleistung hängt natürlich nicht nur von der flächenbezogenen Wärmeabgabe zum unter der Geschoßdecke liegenden, beheizten bzw. gekühlten Raum, sondern auch von der flächenbezogenen Wärmeabgabe nach bzw. Wärmeaufnahme von oben ab.

Die gesamte, auf den Quadratmeter Deckenfläche bezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung des Rohrregisters errechnet sich in Anlehnung an Gleichung <4.1> gemäß

$$q_{\text{tot}} = q_u + q_o = \Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) + \Lambda_{r,o} \cdot (\Theta_r - \Theta_o) \quad . \quad <4.10>$$

Zur Auswertung dieser Gleichung muss neben der oberhalb der Deckenkonstruktion anzutreffenden Temperatur Θ_o auch der flächenbezogene Leitwert $\Lambda_{r,o}$ bekannt sein. Dieser liegt nach der zweidimensionalen Berechnung als weiteres Ergebnis vor. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Abhängigkeit von $\Lambda_{r,o}$ vom Aufbau der vier untersuchten Decken.

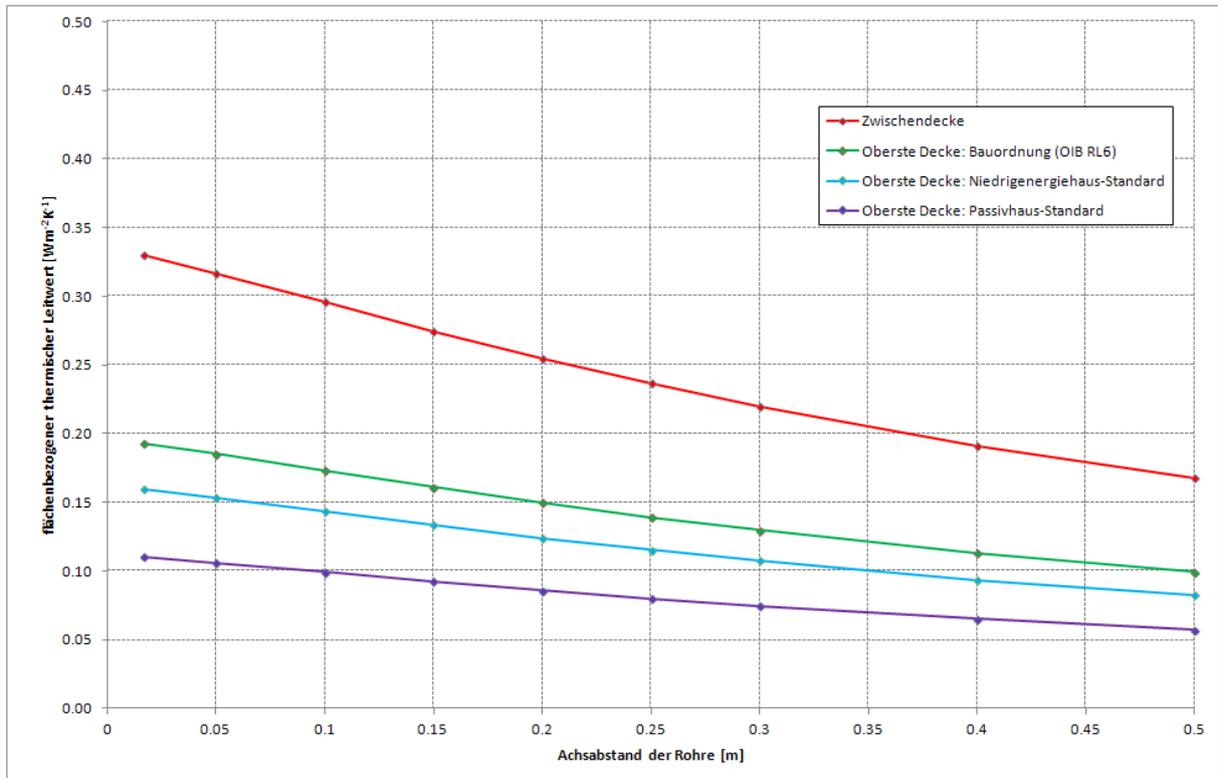


Abb. 4.87: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,o}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tab. 4.44 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.87 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
Geschoßdecke	0,2795	-0,4861	0,3410
Oberste Geschoßdecke: Bauordnung (OIB RL6)	0,1571	-0,2785	0,1991
Oberste Geschoßdecke: Niedrigenergiehaus-Standard	0,1287	-0,2292	0,1664
Oberste Geschoßdecke: Passivhaus-Standard	0,0877	-0,1573	0,1138

Tab. 4.44: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,o}$ gemäß Gleichung <4.2>.

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Parameterstudie für den Kühlfall.

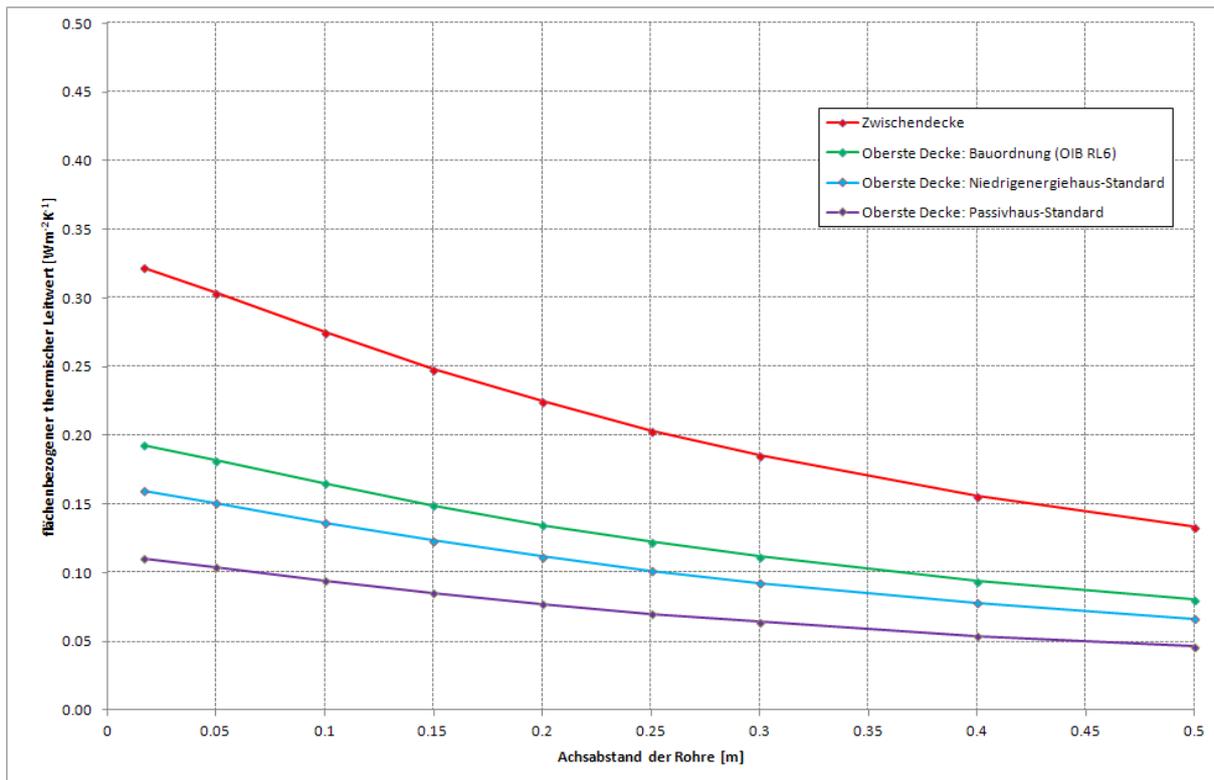


Abb. 4.88: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,o}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tab. 4.45 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 4.88 dargestellten Verläufe.

	a [Wm ⁻⁴ K ⁻¹]	b [Wm ⁻³ K ⁻¹]	c [Wm ⁻² K ⁻¹]
Geschoßdecke	0,4843	-0,6429	0,3344
Oberste Geschoßdecke: Bauordnung (OIB RL6)	0,2843	-0,3804	0,1999
Oberste Geschoßdecke: Niedrigenergiehaus-Standard	0,2339	-0,3136	0,1653
Oberste Geschoßdecke: Passivhaus-Standard	0,1604	-0,2158	0,1142

Tab. 4.45: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,o}$ gemäß Gleichung <4.2>.

Sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall sind die flächenbezogenen thermischen Leitwerte vom Rohrregister nach oben um Größenordnungen kleiner als jene vom Rohrregister nach unten. Definiert man nun das Verhältnis der beiden flächenbezogenen Leitwerte gemäß

$$v = \frac{\Lambda_{r,o}}{\Lambda_{r,u}}, \quad <4.11>$$

so zeigt eine genauere Analyse der in Abb. 4.86 bis Abb. 4.88 dargestellten Ergebnisse, dass dieses Verhältnis v sich in sehr guter Näherung als vom Rohrabstand unabhängig erweist. Die folgende Tabelle zeigt die Werte des Verhältnisses v für die vier untersuchten Decken- bzw. Dachaufbauten.

	v [-] - Heizfall	v [-] - Kühlfall
Geschoßdecke	0,060	0,039
Oberste Geschoßdecke: Bauordnung (OIB RL6)	0,035	0,023
Oberste Geschoßdecke: Niedrigenergiehaus-Standard	0,029	0,019
Oberste Geschoßdecke: Passivhaus-Standard	0,020	0,013

Tab. 4.46: Verhältnis v für verschiedene Decken- bzw. Dachaufbauten

Mit Kenntnis der Werte von v kann der flächenbezogene Leitwert $\Lambda_{r,o}$ unter Anwendung von Definitionsgleichung <4.11> leicht aus dem mittels Regression errechneten Leitwert $\Lambda_{r,u}$ errechnet werden (siehe Gleichung <4.2> und die zugehörigen Tabellen). Damit ist es unmittelbar möglich, die gesamte, flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung des Rohrregisters unter Verwendung von Gleichung <4.10> zu berechnen.

Im Fall der Geschoßdecke ergibt sich der Anteil a der nach oben – d. h. in die „falsche“ Richtung“ – abfließenden Wärmemenge an der gesamten, vom Rohrregister abgegebenen Wärmemenge dann unmittelbar aus dem Verhältnis v, wenn die Temperatur im Raum über der Geschoßdecke und jene im Raum unterhalb der Decke gleich sind. Wie aus den Gleichungen <4.10> und <4.11> unschwer ableitbar, gilt für diesen Spezialfall

$$a = \frac{v}{1+v} \quad . \quad <4.12>$$

Anders ist die Situation, wenn die Temperatur oberhalb der Decke nicht mit der Lufttemperatur im unterhalb der Decke situierten Raum übereinstimmt. Für die oberste Geschoßdecke wird dies immer zutreffen. Für die Geschoßdecke wird dies dann der Fall sein, wenn der Raum über der Decke eine andere Soll-Temperatur hat oder unbeheizt ist. Der Anteil a ergibt sich für diese Fälle gemäß

$$a = \frac{q_o}{q_{tot}} = \frac{v \cdot (\Theta_r - \Theta_o)}{\Theta_r - \Theta_u + v \cdot (\Theta_r - \Theta_o)} \quad . \quad <4.13>$$

Im Fall des Flachdachs ist zu berücksichtigen, dass sowohl der Einfluss der Sonneneinstrahlung als auch jener der langwelligen Zu- und Abstrahlung an der Außenseite des Flachdachs nicht vernachlässigt werden darf. Im Kühlfall - also im Sommer - ist der Wärmeeintrag durch das Flachdach aufgrund der absorbierten Sonnenstrahlung in der Regel deutlich größer als der Wärmefluss, der auf die Differenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur zurückgeht. Im Winter bewirkt die langwellige Wärmeabstrahlung in den (klaren) Nachthimmel Wärmeverluste, die gegenüber den Transmissionswärmeverlusten meist nicht vernachlässigt werden können.

Die Berücksichtigung dieser Effekte ist in einfacher Weise möglich, wenn in den Gleichungen <4.10> und <4.13> die Temperatur über dem betrachteten Flachdach Θ_o nicht als Lufttemperatur sondern als sog. „Strahlungslufttemperatur“ interpretiert wird. Die Strahlungslufttemperatur (3) ist eine Fiktivtemperatur, bei deren Verwendung nicht nur die Einflüsse der Außenlufttemperatur, sondern auch jene der Sonneneinstrahlung und der langwelligen Zu- und Abstrahlung an der äußeren Bauteiloberfläche exakt berücksichtigt werden können. Als Beispiel für Strahlungslufttemperaturen sind in folgender Tabelle die Maximalwerte der Strahlungslufttemperatur für den Norm-Sommertag am Standort Wien in Abhängigkeit vom Absorptionsgrad für Sonneneinstrahlung – d. h. der Farbe der äußeren Oberfläche – für ein Flachdach aufgelistet.

Absorptionszahl für Sonneneinstrahlung	Strahlungslufttemperatur Θ_o [°C]
0,3 (hell)	37,3
0,6 (mittel)	53,7
0,9 (dunkel)	69,1

Tab. 4.47: Maximale Strahlungslufttemperaturen am Norm-Sommertag für ein Flachdach in Wien

Die in Tab. 4.47 angeführten Strahlungslufttemperaturen treten um 13 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit auf; die Lufttemperatur beträgt zu diesem Zeitpunkt 28,6 °C. Für die Differenz zwischen Kühlmitteltemperatur im Register und anzunehmender Außentemperatur ergeben sich bei einer angenommenen Kühlmitteltemperatur von 18 °C damit in Abhängigkeit von der Farbe der äußeren Oberfläche des Flachdachs Werte zwischen 19,3 K und 51,1 K. Diese sind in Gleichung <4.13> einzusetzen.

Der Anteil a des Wärmezuflusses eines thermisch aktivierten Flachdachs von oben an der gesamten Wärmeaufnahmeleistung des Rohrregisters kann für den Kühlfall in Abhängigkeit von der oberhalb der Decke anzusetzenden Temperatur angegeben werden, wenn die mittlere Temperatur der Kühlflüssigkeit und die Temperatur im Raum unterhalb der Decke vorgegeben werden. Für eine Raumtemperatur Θ_u von 26 °C und einer mittleren Kühlmitteltemperatur von $\Theta_r = 18$ °C ergeben sich die in folgender Abbildung gezeigten Anteile.

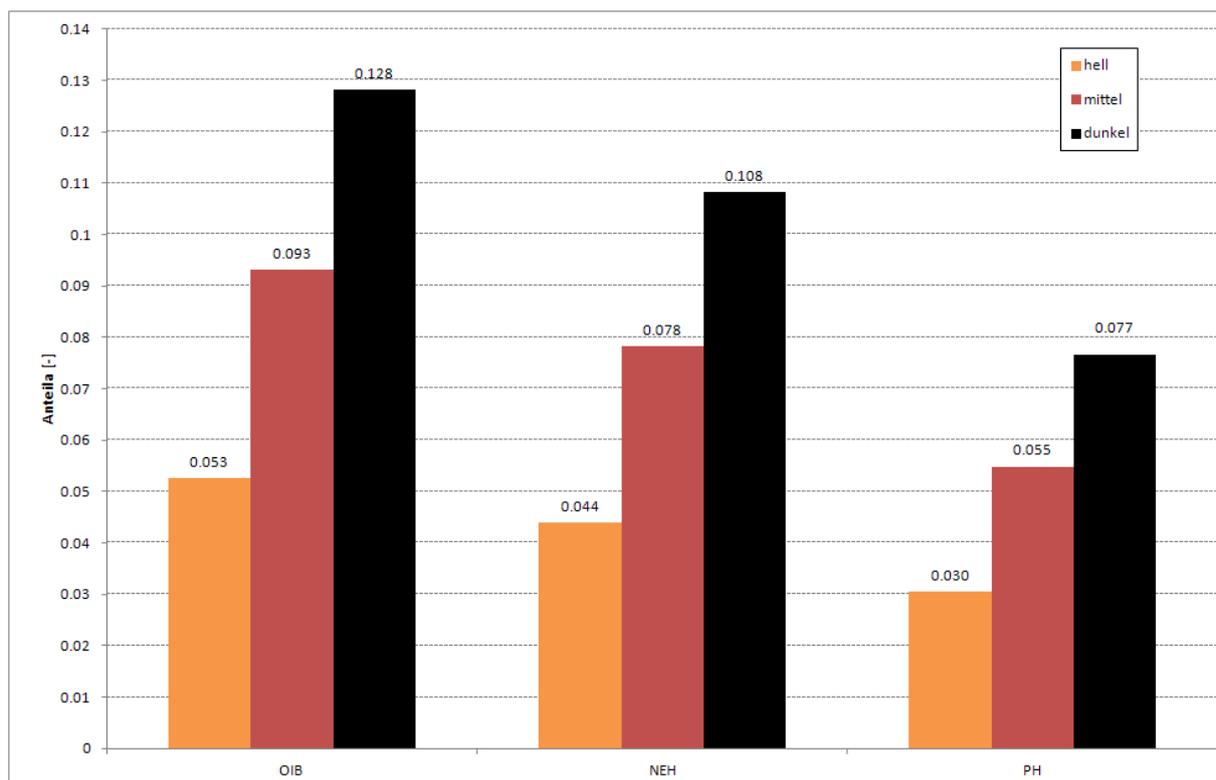


Abb. 4.89: Kühlfall: Anteil a der von oben in das Register kommenden Wärmeleistung an der gesamten Wärmeaufnahmeleistung des Registers in Abhängigkeit von der Farbe der Dachhaut (siehe Tab. 4.47)

Es zeigt sich, dass die Farbe der Dachhaut einen größeren Einfluss auf die aufzubringende Kühlleistung haben kann als die Verbesserung der Wärmedämmung des Flachdachs. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist allerdings zu beachten, dass obige Rechnung stationär für die maximale Sonneneinstrahlung am Norm-Sommertag durchgeführt wurde.

Im Winter treten die tiefsten Außentemperaturen üblicherweise in der Nacht auf. Auch hier sollte nicht mit der Außenlufttemperatur, sondern mit der Strahlungslufttemperatur gerechnet werden, um den Effekt der nächtlichen langwelligen Abstrahlung zu erfassen. Der Effekt der nächtlichen Abstrahlung hängt wesentlich vom Trübungszustand der Atmosphäre – also vom „Wetter“ – ab. Die folgende Tabelle zeigt die Strahlungslufttemperaturen für eine nächtliche Lufttemperatur von $-10,0\text{ °C}$ für verschiedene Bewölkungszustände.

Bewölkungszustand	Strahlungslufttemperatur Θ_o [°C]
unbewölkt	-13,4
leicht bewölkt	-12,3
stark bewölkt	-11,1

Tab. 4.48: Strahlungslufttemperaturen bei -10 °C Lufttemperatur für ein Flachdach in Wien

Die folgende Abbildung zeigt den nach Gleichung <4.13> berechneten Anteil a für verschiedene Wettersituationen. Die Solltemperatur im Raum wurde hierbei mit $20,0\text{ °C}$, jene des Heizmittels mit $28,0\text{ °C}$ angenommen.

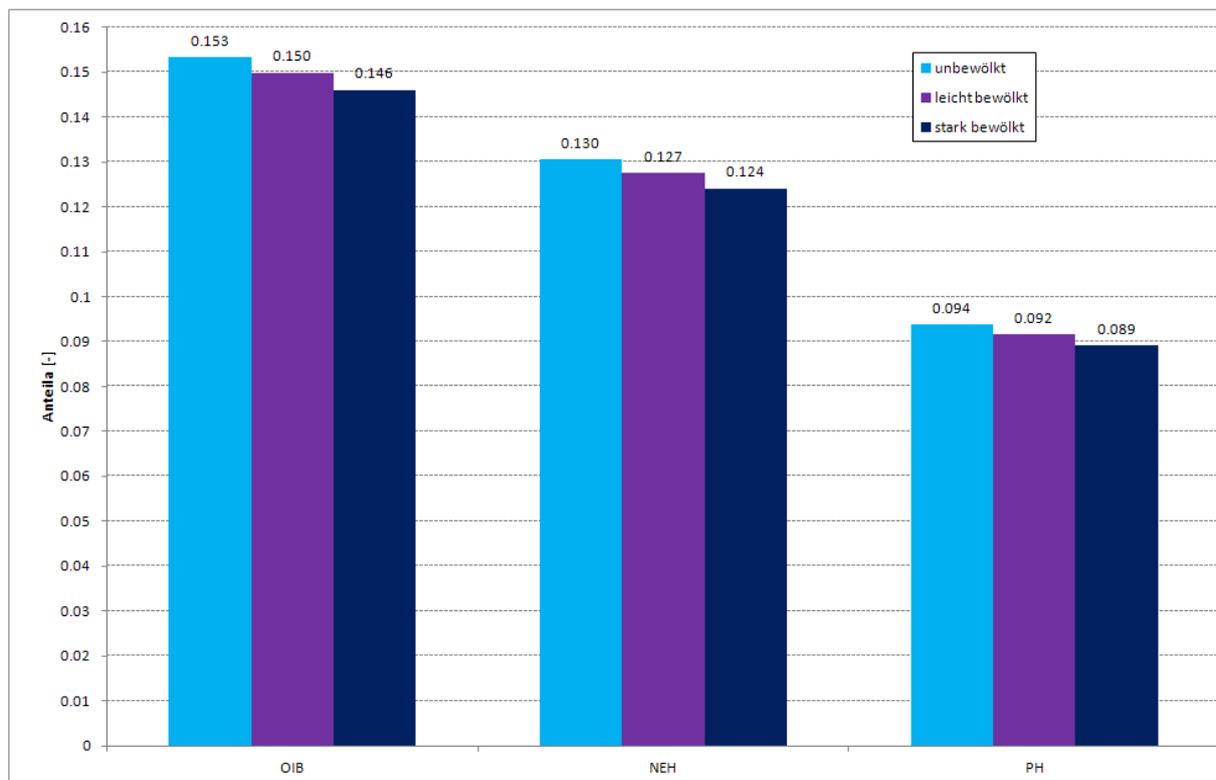


Abb. 4.90: Heizfall: Anteil a der nach oben entweichenden Wärmeleistung an der gesamten Wärmeabgabeleistung des Registers in Abhängigkeit vom Bewölkungszustand

Der Anteil der nach oben durch das Flachdach entweichenden Wärmeleistung an der gesamten Wärmeabgabe des Rohrregisters zeigt nur eine schwache Abhängigkeit vom Bewölkungszustand und eine stärkere Abhängigkeit von der thermischen Qualität des Flachdachs. Bemerkenswert ist, dass selbst bei höchstem Dämm-Standard (PH ... Passivhaus) der Anteil der nach oben, d. h. in die „falsche Richtung“ abfließenden Wärmeströmung bei ca. 9% liegt. Bei einem nach OIB-Richtlinie gedämmtem Dach liegt a bereits bei ca. 15%.

Conclusio:

Die mittels stationärer Berechnungen durchgeführten Untersuchungen von thermisch aktivierten obersten Decken erfolgte für drei verschiedene Flachdachaufbauten und führt auf folgende Erkenntnisse.

- Der flächenbezogene thermische Leitwert vom Rohrregister nach unten, d. h. in den zu beheizenden Raum, ist für die hier untersuchten Deckenaufbauten und eine Betonüberdeckung des Rohrregisters von 5 cm nahezu unabhängig von der Dicke der auf der Stahlbetondecke liegenden Dämmschicht. Damit ist auch die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke für vorgegebene Heiz- und Kühlmitteltemperaturen kaum von Güte und Dicke der Dämmschicht über der Stahlbetonplatte abhängig.
- Die vom Rohrregister nach oben abgegebene bzw. von oben aufgenommene Wärmeleistung zeigt hingegen eine deutliche Abhängigkeit von der Dicke der Dämmschicht und ist in keinem der untersuchten Fälle vernachlässigbar. Die zur Gewährleistung der gewünschten Temperatur des Heiz- oder Kühlmittels erforderliche Leistung ist damit vom Aufbau der Decke abhängig. Im Fall einer Geschoßdecke spielt dieser Effekt keine Rolle. Im Fall der obersten Decke ist der Wärmeabfluss nach außen oder in den unbeheizten Dachraum nicht vernachlässigbar und muss damit bei Auslegungsüberlegungen berücksichtigt werden.

V. Der mittels thermischer Aktivierung konditionierte Raum

In Kapitel IV wurden Kenngrößen für thermisch aktivierte Decken präsentiert, die sich u. a. nutzbringend im Zuge von Auslegungsberechnungen anwenden lassen. Die Klarheit der Aussagen wurde dabei durch eine sog. „bauteilbezogene“ Betrachtungsweise erkaufte. Dies zog nach sich, dass die Lufttemperaturen im Raum unter der Decke und jene im Raum über der Decke sowie die Temperatur der Flüssigkeit im Rohr als Randbedingungen eingehen und somit vorgegeben werden.

Wird die Fragestellung insofern erweitert als auch die Auswirkung einer thermisch aktivierten Decke auf den unter der Decke liegenden, zu konditionierenden Raum interessiert, so müssen natürlich auch Angaben über alle, auf das thermische Verhalten dieses Raums einwirkende Einflüsse gemacht werden. Neben der Fläche des in die Decke eingelassenen Rohrregisters spielen u. a. die Raumgeometrie, die Zusammensetzung und der Aufbau der raumbegrenzenden Hülle, die Art und Orientierung aller transparenten und opaken Bauteile, deren wärmetechnischen Eigenschaften, die Raumnutzung sowie die angewandte Lüftungsstrategie eine wesentliche Rolle. Der Wechsel von der „bauteilbezogenen“ zur „raumbezogenen“ Betrachtungsweise zwingt somit einerseits dazu, sehr genaue und umfangreiche Angaben über den zu konditionierenden Raum zu treffen. Andererseits trifft das Berechnungsergebnis natürlich auch nur auf diesen Raum – er soll in der Folge als „Modellraum“ bezeichnet werden – zu. Nachdem auch das Außenklima einen wesentlichen Einfluss auf das thermische Raumverhalten hat, ist das Berechnungsergebnis zudem vom angenommenen Gebäudestandort abhängig. Anders als in Kapitel IV kann hier also nicht erwartet werden, dass Fragestellungen allgemein gültig beantwortet werden können. Über Parameterstudien soll aber versucht werden, wichtige Fragen derart zu beantworten, dass daraus Planungsempfehlungen entwickelbar sind. Insbesondere soll hinterfragt werden, welche Voraussetzungen in Hinblick auf die bau- und wärmetechnische Ausführung eines Raums bzw. Gebäudes vorliegen müssen, um diesen über die thermische Aktivierung allein konditionieren zu können. In diesem Zusammenhang ist auch die Frage zur thermischen Behaglichkeit in solch‘ einem Raum zu beantworten.

Nach der Festlegung auf einen Modellraum wird unter Zugriff auf die in Kapitel IV beschriebenen Erkenntnisse eine Methode zur Berechnung der erforderlichen Registerflächen entwickelt. Grundlage für solch‘ eine Berechnung ist die Kenntnis der Heizlast des Raums. Darauf aufbauend wird auf die Berechnung der notwendigen Heiz- bzw. Kühlflächen in Abhängigkeit von den Eigenschaften des eingesetzten Rohrregisters (Rohrdurchmesser, Rohrabstand, Lage des Rohrregisters) eingegangen.

Neben dem Aufzeigen der Anwendbarkeit der in Kapitel IV abgeleiteten Kenngrößen steht hier die Frage nach der Größenordnung des Anteils der beheizten Flächen an der Gesamtfläche einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für den Fall der alleinigen Beheizung eines Raums durch Bauteilaktivierung im Vordergrund. Diese Frage ist für bautechnische Überlegungen insofern von hoher Relevanz, als ein gewisser Anteil der Deckenfläche für die Gewährleistung einer guten Raumakustik zur Verfügung stehen und - nach den Ergebnissen des Abschnitts IV.1.2.5 - tunlichst nicht mit dem Rohrregister belegt sein sollte.

Um die Frage nach der Größenordnung der mit dem Rohrregister zu belegenden Fläche befriedigend beantworten zu können, ist es notwendig, Parameterstudien durchzuführen. Als wichtigste Parameter gehen hierbei die thermische Qualität der Gebäudehülle, aber auch die außenklimatischen Bedingungen am jeweils ausgewählten Gebäudestandort ein. Zudem erfordern die durchzuführenden Auslegungsberechnungen natürlich auch die Festlegung auf eine bestimmte Gebäudegeometrie und -orientierung. Für den ins Auge gefassten Zweck genügt es, sich auf die Modellierung eines Wohnraums zu beschränken, der in der Folge als Modellraum für die auszuführenden Parameterstudien herangezogen werden kann.

V.1 Eckdaten des Modellraums

Der als Modellraum zu entwerfende Wohnraum soll in der Folge für Auslegungsberechnungen, Energiebedarfsberechnungen und detaillierte Berechnungen in Hinblick auf die Temperaturverteilung im Raum herangezogen werden. Hierbei wird jeweils sowohl der Fall der Beheizung im Winter als auch jener der Kühlung im Sommer untersucht. Um Ergebnisse zu erhalten, die „auf der sicheren Seite“ liegen, wird beim Entwurf des Modellraums darauf geachtet, dass dieser sowohl was sein Verhalten im Hochsommer als auch seinen Heizwärmebedarf im Tiefwinter betrifft als kritisch eingestuft werden kann.

V.1.1 Raumgeometrie

Die Raumgeometrie wird einem derzeit in Planung befindlichen Mehrfamilienwohnhaus nachempfunden. Die folgende Abbildung zeigt den Grundriss des Modellraums.

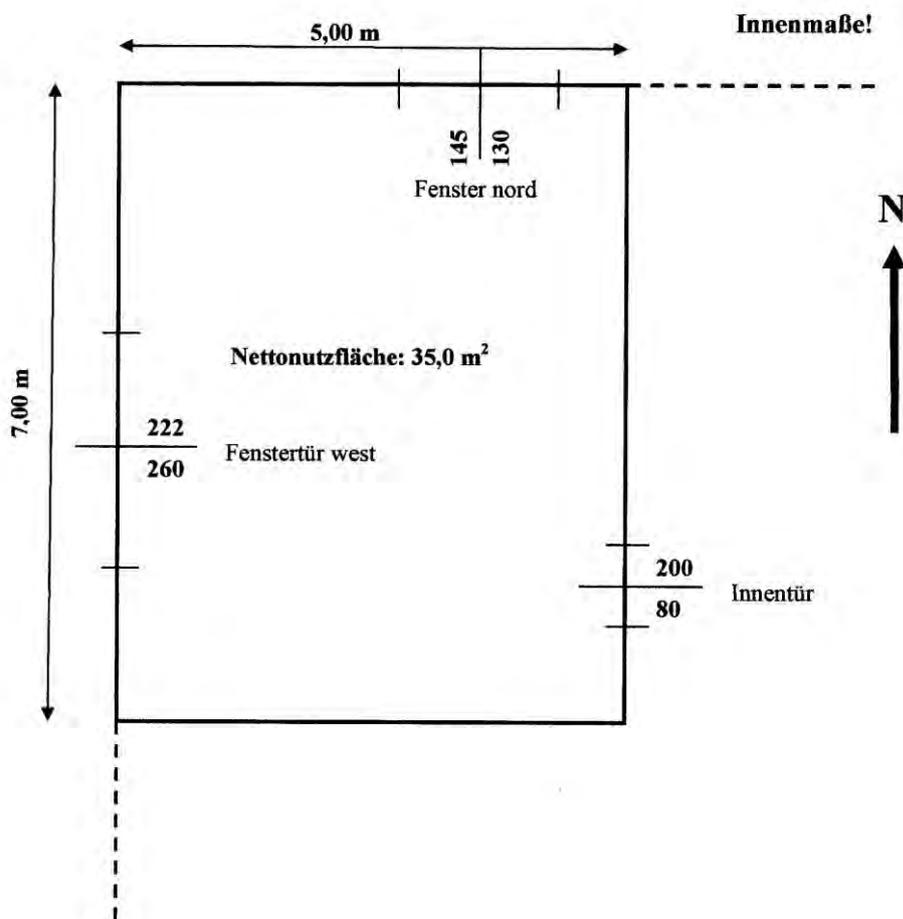


Abb. 5. 1: Grundriss des Modellraums

Beim Modellraum handelt es sich um einen quaderförmigen Raum in der Gebäudekante mit west- und nordorientierten Außenwänden. Die lichte Raumhöhe wird für diesen Raum mit 2,90 m angesetzt.

Die relativ große Fenstertür nach Westen wurde angenommen, um den Raum in Hinblick auf sein sommerliches Verhalten als kritisch ansehen zu können. Damit ist zu erwarten, dass die Frage nach der Wirkung der thermisch aktivierten Geschoßdecke im Kühlfall sinnvoll beantwortet werden kann.

Sowohl die Situierung des Wohnraums in der Gebäudekante als auch das Ansetzen eines Fensters in der Nordwand soll dazu dienen, dass der Wärmebedarf des Raums vergleichsweise hoch ausfällt und damit die Dimensionierung der Fläche des Rohrregisters eher die Obergrenze darstellt.

Bezüglich der Bauteilaktivierung wird angenommen, dass sich der Raum im Regelgeschoß befindet. Damit sind Fußboden und Decke Innenbauteile, die gleich aufgebaut und beide thermisch aktiviert sind.

Die folgende Abbildung zeigt die Skizze einer dreidimensionalen Ansicht des Modellraums.

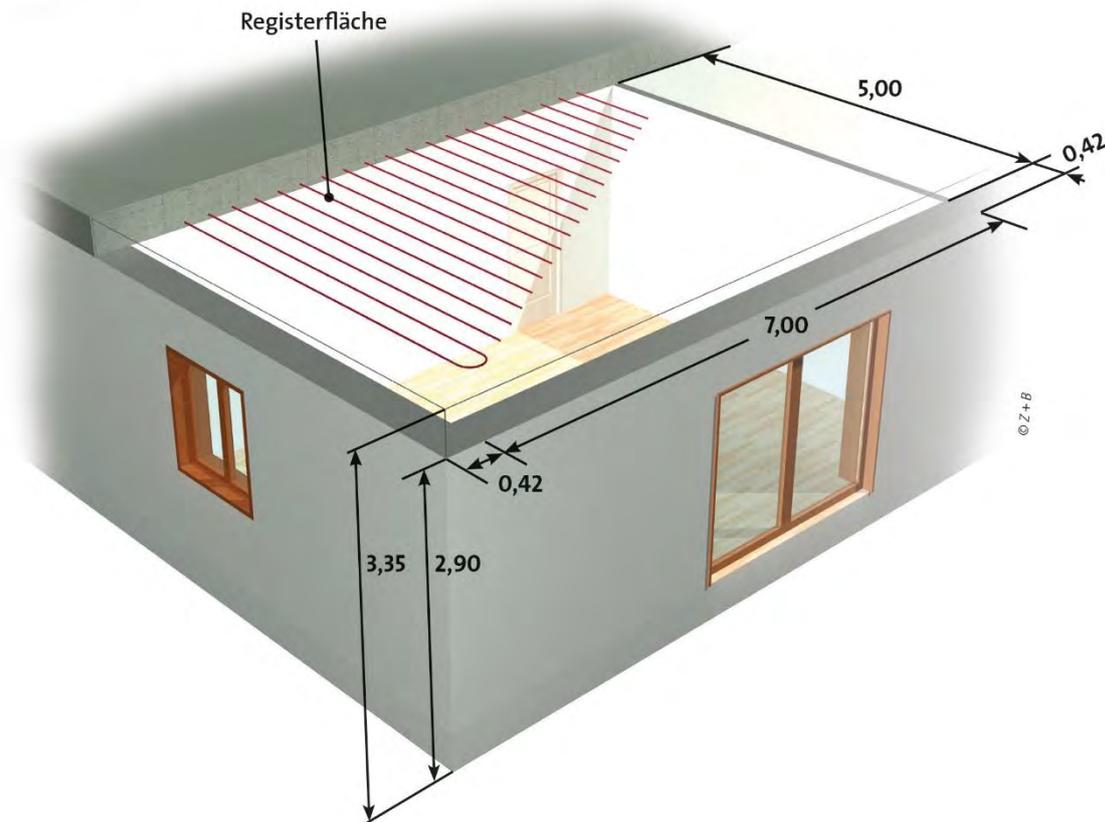


Abb. 5.2: Dreidimensionale Ansicht des Musterraums, Maße in [m]; © Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H

In den Parameterstudien in Hinblick auf die thermische Qualität der Gebäudehülle werden die Innenabmessungen des quaderförmigen Raums (7,0 m x 5,0 m x 2,9 m) unverändert beibehalten und lediglich die Außenabmessungen geändert. Die in Abb. 5.2 gezeigte Dicke der Außenwand trifft für ein Gebäude in Niedrigenergiehausqualität zu – siehe Tab. 5.4.

V.1.2 Bauteil-Listen

Die Innenbauteile werden für alle Berechnungen gleich angenommen. Die Schichtenfolgen dieser Bauteile wurden einem in Planung befindlichen Mehrfamilienwohnhaus nachempfunden und sind in den folgenden beiden Tabellen aufgelistet.

	d [m]	λ [Wm⁻¹K⁻¹]	ρ [kgm⁻³]	c [kJkg⁻¹ K⁻¹]
oben				
Bodenbelag (Fliesen)	0,0100	1,000	2000	0,92
Zementestrich	0,0600	1,400	2000	1,13
PE-Folie	0,0002			
Trittschalldämmung	0,0300	0,038	32	1,45
Dampfbremse	0,0004			
Dämmschüttung gebunden	0,1000	0,050	200	1,56
Stahlbetondecke	0,2500	2,000	2400	1,00
unten				

Tab. 5.1: Decken- und Fußbodenaufbau des Modellraums

	d [m]	λ [Wm⁻¹K⁻¹]	ρ [kgm⁻³]	c [kJkg⁻¹ K⁻¹]
außen				
Gipskartonplatte (doppelt)	0,0250	0,210	900	1,05
Mineralwolle	0,0750	0,040	150	1,03
Gipskartonplatte (doppelt)	0,0250	0,210	900	1,05
innen				

Tab. 5.2: Aufbau der Innenwände des Modellraums

Decke und Fußboden sind thermisch aktiviert. Art und Lage der Rohrregister sowie die Gesamtfläche der Register sind Parameter der Berechnung.

Die Innentür wird vereinfachend aus 4 cm Vollholz angenommen.

Bezüglich des Aufbaus der Außenbauteile werden im Rahmen der Parameterstudien die folgenden drei Annahmen durchgespielt:

1. Gebäudehülle entsprechend der OIB-Richtlinie 6 (10),
2. Gebäudehülle in Niedrigenergie-Standard,
3. Gebäudehülle in Passivhausstandard.

V.1.2.1 Gebäudehülle entsprechend der OIB-Richtlinie 6

Für die erste Variante, in der die Gebäudehülle den derzeit gültigen Bauvorschriften gemäß OIB-Richtlinie 6 (10) entspricht, wird für die Außenwand folgender Aufbau angenommen.

	d [m]	λ [Wm⁻¹K⁻¹]	ρ [kgm⁻³]	c [kJkg⁻¹ K⁻¹]
außen				
Deckputz	0,0030	0,800	1450	0,94
Armierung	0,0030	0,800	1500	1,13
Fassadenplatte EPS-F 031	0,0800	0,031	15	1,40
Klebemörtel	0,0050	1,400	2000	1,08
Stahlbeton	0,2000	2,300	2400	1,12
Innenputz	0,0100	0,700	1200	1,12
innen				

Tab. 5.3: Var. 1: Aufbau der Außenwand, thermische Gebäudequalität gemäß OIB-Richtlinie 6

Der Wärmedurchgangskoeffizient des in Tab. 5.3 gezeigten Wandaufbaus entspricht mit $U_{AW} = 0,35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ genau der in der OIB-Richtlinie 6 (10) für Außenwände gesetzten Obergrenze.

Fenster und Fenstertür werden in Var. 1 als Holzkonstruktion mit einer 2-fach Wärmeschutzverglasung angenommen. Der U-Wert des Holzrahmens wird mit $U_F = 1,80 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ angesetzt, jener des Glases mit $U_G = 1,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Der ψ -Wert des Aluminium-Abstandhalters wird auf $\psi_G = 0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gesetzt. Damit liegt der U-Wert des Fensters für das Prüfnormmaß bei $U_w = 1,35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, womit die Anforderungen ($U_w \leq 1,40 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) der OIB-Richtlinie 6 (10) in Hinblick auf die thermische Qualität der Fenster erfüllt sind. Der Gesamtenergiedurchlassgrad für das 2-fach-Wärmeschutzglas wird mit $g = 0,60$ angesetzt.

V.1.2.2 Gebäudehülle in Niedrigenergiehaus-Standard

In der zweiten Variante wird von der Annahme ausgegangen, dass die thermische Qualität der Gebäudehülle in Niedrigenergiehaus-Standard ausgeführt ist. Die folgende Tabelle zeigt den angenommenen Schichtaufbau der Außenwand.

	d [m]	λ [Wm⁻¹K⁻¹]	ρ [kgm⁻³]	c [kJkg⁻¹ K⁻¹]
außen				
Deckputz	0,0030	0,800	1450	0,94
Armierung	0,0030	0,800	1500	1,13
Fassadenplatte EPS-F 031	0,2000	0,031	15	1,40
Klebemörtel	0,0050	1,400	2000	1,08
Stahlbeton	0,2000	2,300	2400	1,12
Innenputz	0,0100	0,700	1200	1,12
innen				

Tab. 5.4: Var. 2: Aufbau der Außenwand, Niedrigenergiehaus-Standard

Im Vergleich zur Außenwand nach OIB-Richtlinie (siehe Tab. 5.3) wurde die Dicke der Fassadendämmplatte von 8 cm auf 20 cm erhöht. Dies bewirkt eine Verkleinerung des U-Werts auf $U_{AW} = 0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Fenster und Fenstertür werden in Var. 2 als Holzkonstruktion mit einer 3-fach Wärmeschutzverglasung angenommen. Der U-Wert des Holzrahmens wird mit $U_F = 1,30 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ angesetzt, jener des Glases mit $U_G = 0,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Der ψ -Wert des Kunststoff-Abstandhalters mit Edelstahl-Einlage wird auf $\psi_G = 0,02 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gesetzt. Unter diesen Annahmen liegt der U-Wert des Fensters für das Prüfnormmaß bei $U_W = 0,87 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Der Gesamtenergiedurchlassgrad für das 3-fach-Wärmeschutzglas wird mit $g = 0,45$ angesetzt.

V.1.2.3 Gebäudehülle in Passivhaus-Standard

Die dritte Variante geht von der Annahme aus, dass die thermische Qualität der Gebäudehülle im Passivhaus-Standard ausgeführt ist. Die folgende Tabelle zeigt den Schichtaufbau der Außenwand.

	d [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	c [$\text{kJkg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
außen				
Deckputz	0,0030	0,800	1450	0,94
Armierung	0,0030	0,800	1500	1,13
Fassadenplatte EPS-F 031	0,3000	0,031	15	1,40
Klebemörtel	0,0050	1,400	2000	1,08
Stahlbeton	0,2000	2,300	2400	1,12
Innenputz	0,0100	0,700	1200	1,12
innen				

Tab. 5. 5: Var. 3: Aufbau der Außenwand, Passivhaus-Standard

Durch weitere Erhöhung der Dicke der Fassadendämmplatte auf 30 cm erreicht die Außenwand mit einem U-Wert von $U_{AW} = 0,10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ Passivhausqualität.

Fenster und Fenstertür werden auch in Var. 3 als Holzkonstruktion mit einer 3-fach Wärmeschutzverglasung angenommen. Als Rahmen wird ein passivhaustauglicher Rahmen mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_F = 0,80 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ angesetzt. Bezüglich des Glases besteht der Unterschied zu Variante 2 lediglich darin, dass die 3-fach-Verglasung mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von $g = 0,60$ deutlich mehr Sonnenstrahlung durchlässt („Solar-glas“). Der Wärmedurchgangskoeffizient des Glases bleibt mit $U_G = 0,70 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ mit jenem der Variante 2 identisch.

V.2 Heiz- und Kühllastberechnungen

Die Heiz- und Kühllastberechnungen erfolgen für den in Abschnitt V.1 definierten Modellraum mittels periodisch eingeschwungener Simulation unter Zugriff auf das Gebäudesimulationsprogramm GEBA (11). Die Berechnung der Heiz- und Kühllast dient als Grundlage für die Dimensionierung der Fläche des Rohrregisters. Diese Fläche muss groß genug sein, um auch unter extremen außenklimatischen Bedingungen sowohl im Winter als auch im Sommer die für die Einhaltung der gewünschten Solltemperatur benötigte Wärmeleistung verlässlich bereitstellen zu können.

Den Heiz- und Kühllastberechnungen sind somit außenklimatische Verhältnisse zugrunde zu legen, die für den Gebäudestandort als extrem zu bezeichnen sind, also nur selten vorkommen. Im Gegensatz zu Norm-Rechenverfahren ist für eine periodisch eingeschwungene Simulation die für außen anzunehmende Lufttemperatur nicht nur ein Wert – die Norm-Außentemperatur – sondern ein ganzer Tagesgang festzulegen. Dennoch wird an die Norm-Vorgaben angeknüpft und der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur sowohl für die Heiz- als auch für die Kühllastberechnung den österreichischen Normen entnommen – siehe der nächste Abschnitt.

V.2.1 Außenklimatische Bedingungen – extreme Verhältnisse

Um die Abhängigkeit der benötigten thermisch aktivierten Flächen von den außenklimatischen Bedingungen erfassen zu können, werden die Auslegungsberechnungen für drei verschiedene Standorte durchgeführt. Für den Fall der Kühlung wird hierbei in Anlehnung an die ÖNorm B8110-3 (12) als Methode für die Kühllast-Berechnung die periodisch eingeschwungene Simulation mit einem Tag (24 Stunden) als Periodenlänge verwendet. Die außenklimatischen Bedingungen für solch eine Simulation sind in der ÖNorm B8110-3 (12) als „Norm-Sommertag“ definiert.

Der Gebäudestandort geht bei der Konstruktion des Norm-Sommertags allein über den Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur ein. Dieser Tagesmittelwert ist gemäß ÖNorm B8110-3 (12) aus dem EXCEL-Sheet NAT_T13.XLS (13) als Teil der OIB-Richtlinien zu entnehmen.

In Analogie zum Sommer-Fall soll auch die Heizlastberechnung periodisch eingeschwungen, d. h. dynamisch erfolgen. Als Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur wird die Auslegungstemperatur gemäß dem EXCEL-Sheet NAT.XLS (14) gesetzt.

Die Wahl der Standorte hängt einerseits von den außenklimatischen Bedingungen ab. Zum anderen sind nur Standorte mit nennenswerter Bautätigkeit von Interesse. Um eine sinnvolle Wahl zu treffen, werden vorerst die Tagesmittelwerte für die Heiz- und Kühllastberechnung für alle Landeshauptstädte unter Anwendung der EXCEL-Dateien (13) und (14) erhoben. Das Resultat dieser Erhebung zeigt die folgende Tabelle.

	Temperatur [°C] für	
	Heizlast	Kühllast
Wien-Innere Stadt	-11.3	24.9
Eisenstadt	-12.5	23.3
St. Pölten	-14.6	22.5
Linz	-12.2	22.5
Graz	-11.1	22.3
Klagenfurt	-13.5	21.8
Salzburg	-12.7	21.7
Innsbruck	-10.8	21.2
Bregenz	-10.0	21.9

Tab. 5.6: Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur für die Heiz- und Kühllastberechnung nach (13) und (14)

Um sowohl für die Heizlast- als auch für die Kühllastberechnung einen möglichst weiten Bereich an außenklimatischen Bedingungen abzustecken, werden für die folgenden Untersuch-

ungen die Landeshauptstädte Wien, Eisenstadt und Klagenfurt ausgewählt. Die Eckdaten dieser Gebäudestandorte sind in folgender Liste angeführt.

	Breite	Länge	Seehöhe [m]	Temperatur [°C] für	
				Heizlast	Kühllast
Wien-Innere Stadt	48° 13'	16° 23'	170	-11,3	24,9
Eisenstadt	47° 51'	16° 31'	182	-12,5	23,3
Klagenfurt	46° 37'	14° 18'	446	-13,5	21,8

Tab. 5.7: Daten für die ausgewählten Landeshauptstädte

V.2.2 Dynamische Heizlastberechnung

Dem in Tab. 5.7 aufgelisteten Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur für den jeweiligen Standort wird eine mittlere monatliche Tagesschwankung überlagert, die dem Klimadatenkatalog (15) entnommen ist. Die derart errechneten Tagesverläufe der Außenlufttemperatur sind in folgender Abbildung dargestellt.

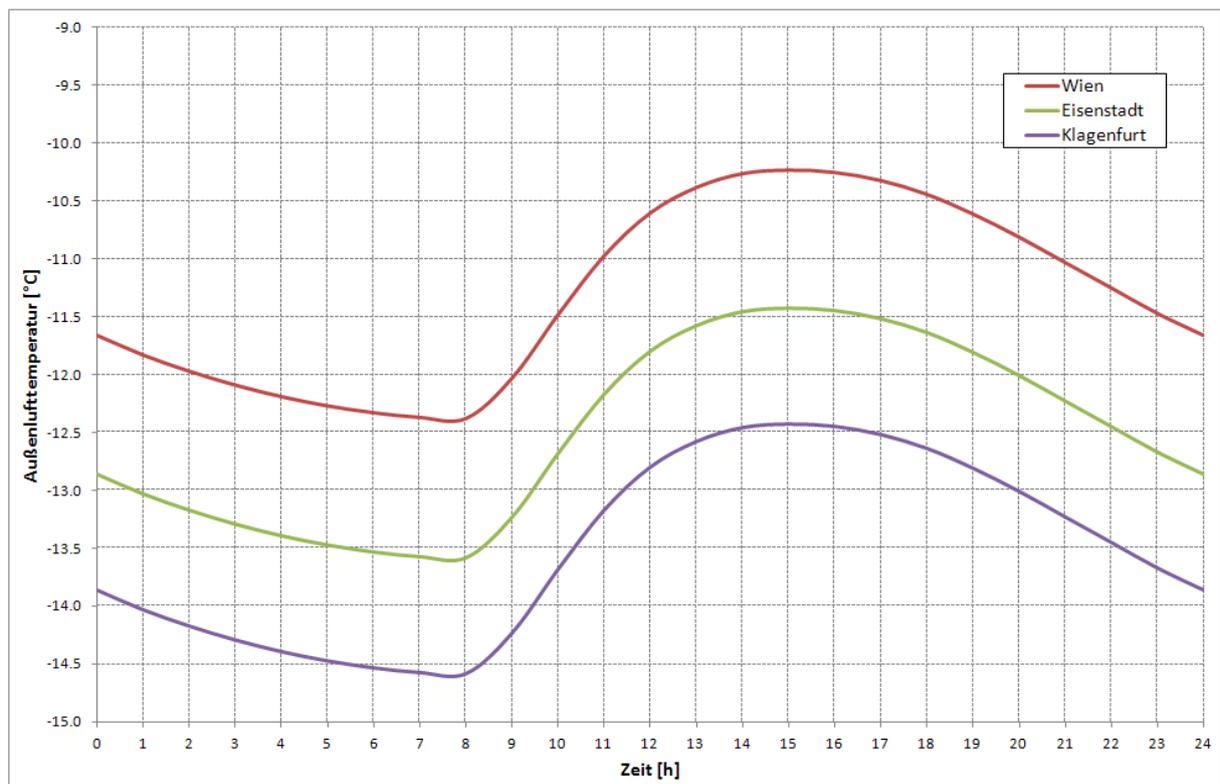


Abb. 5.3: Den dynamischen Heizlastberechnungen zugrunde gelegte Tagesverläufe der Außenlufttemperatur

Ersichtlich handelt es sich bei den entworfenen Tagesgängen der Außenlufttemperatur um parallel verschobene Kurven, deren Tagesmittelwerte den in Tab. 5.7 für die Heizlastberechnung aufgelisteten Werten entsprechen. Die Tagesschwankung entspricht jeweils einem mittleren Januar-Tag (15).

Der vergleichsweise kleinen Tagesschwankung der Außenlufttemperatur entsprechend wird in Hinblick auf die Sonneneinstrahlung angenommen, dass es sich um einen trüben Tag ohne Direktstrahlung und mit verhältnismäßig wenig Diffusstrahlung handelt. Die Trübungsparame-

ter wurden dementsprechend auf $T = 20,0$ (T Trübungsfaktor nach Linke) und $\kappa = 0,20$ (κ Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz) gesetzt. Für die Reflexionszahl der Umgebung (Albedo) wird der Standard-Wert von $\rho = 0,20$ angesetzt.

Im Gegensatz zur normgemäßen Heizlastberechnung geht damit der Einfluss der Sonneneinstrahlung in die dynamische Heizlastberechnung ein. Dies entspricht auch der vom Passivhausinstitut für Passivhäuser vorgeschlagenen Vorgangsweise (16). Der Norm entsprechend werden hingegen nutzungsbedingte Innenwärmen vernachlässigt. Als kritischer Fall wird somit der ungenutzte Raum angesehen.

Die Frischluftzufuhr erfolgt nach der ÖNorm H7500 (17) tageszeitlich konstant mit einer Luftwechselzahl von $n_L = 0,5 \text{ h}^{-1}$. (Nur) im Fall der Passivhausqualität wird angenommen, dass die Lüftung über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erfolgt. Der Wirkungsgrad dieser Anlage wird mit $\eta = 0,85$ angesetzt.

Per Simulation berechnet wird der Tagesverlauf der zur Einhaltung einer operativen Soll-Temperatur von 20 °C erforderlichen Heizleistung. Das Maximum des errechneten Tagesverlaufs wird mit der gesuchten Heizlast identifiziert.

Die folgenden Abbildungen zeigen die errechneten Tagesverläufe der benötigten Heizleistung für die drei ausgewählten Standorte.

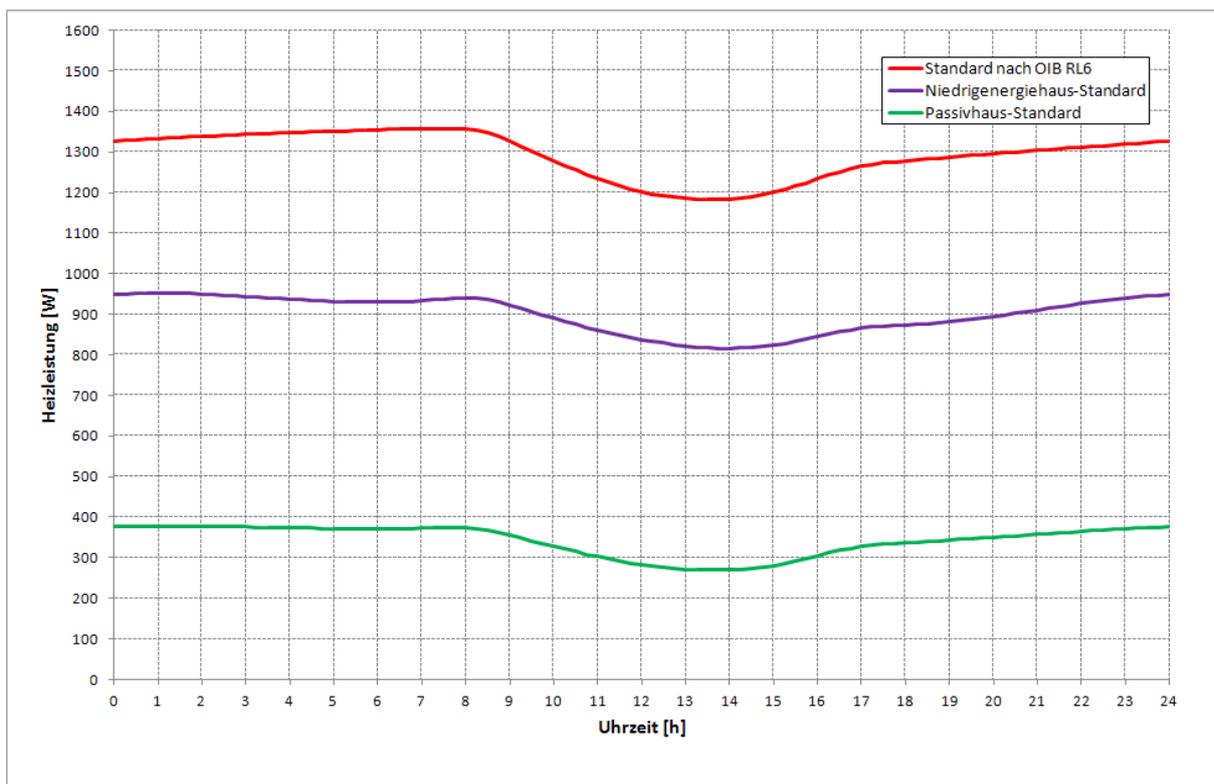


Abb. 5.4: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Wien – Innere Stadt

Beim thermischen Standard der Gebäudehülle nach OIB Richtlinie 6 (10) („Bauordnung“) zeigt sich, dass das Maximum der erforderlichen Heizleistung knapp vor Sonnenaufgang auftritt. Bei den beiden höher gedämmten Varianten ist die erforderliche Heizleistung von Mitternacht bis Sonnenaufgang hingegen nahezu konstant. Bei allen drei Varianten stellt sich das Minimum des errechneten Tagesgangs der erforderlichen Heizleistung am frühen Nachmittag ein.

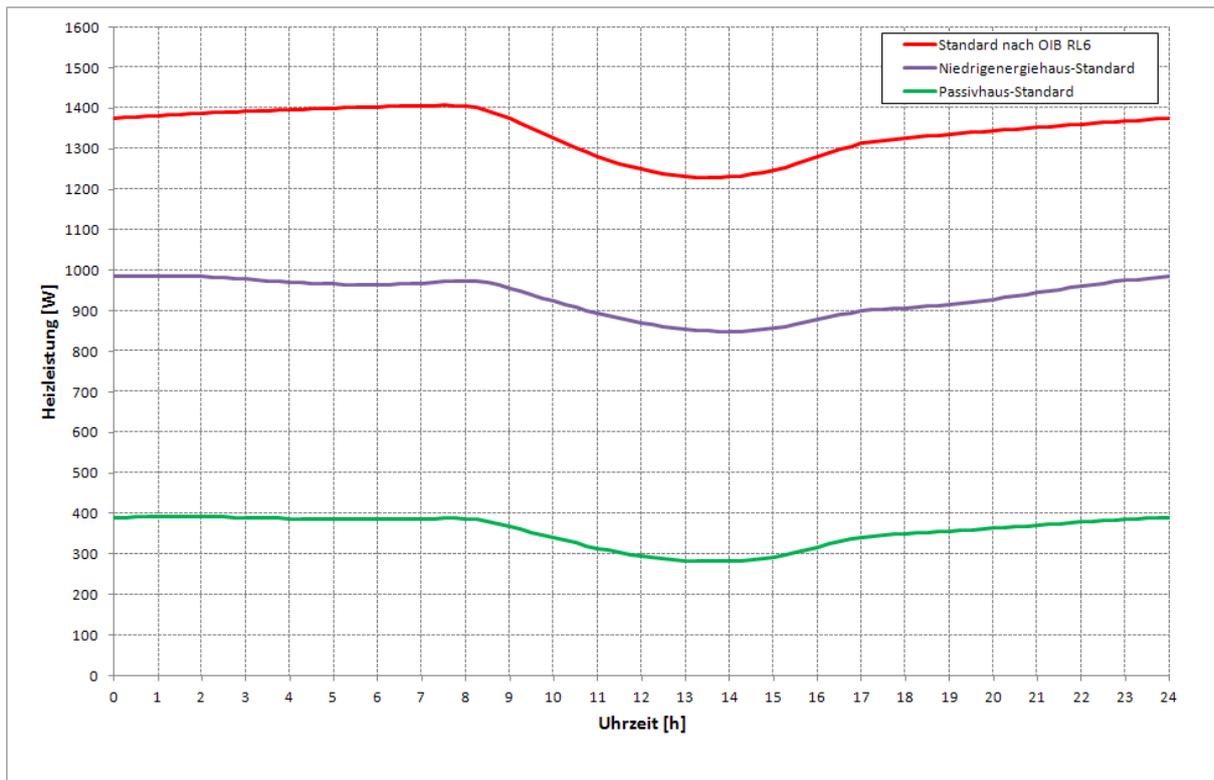


Abb. 5.5: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Eisenstadt

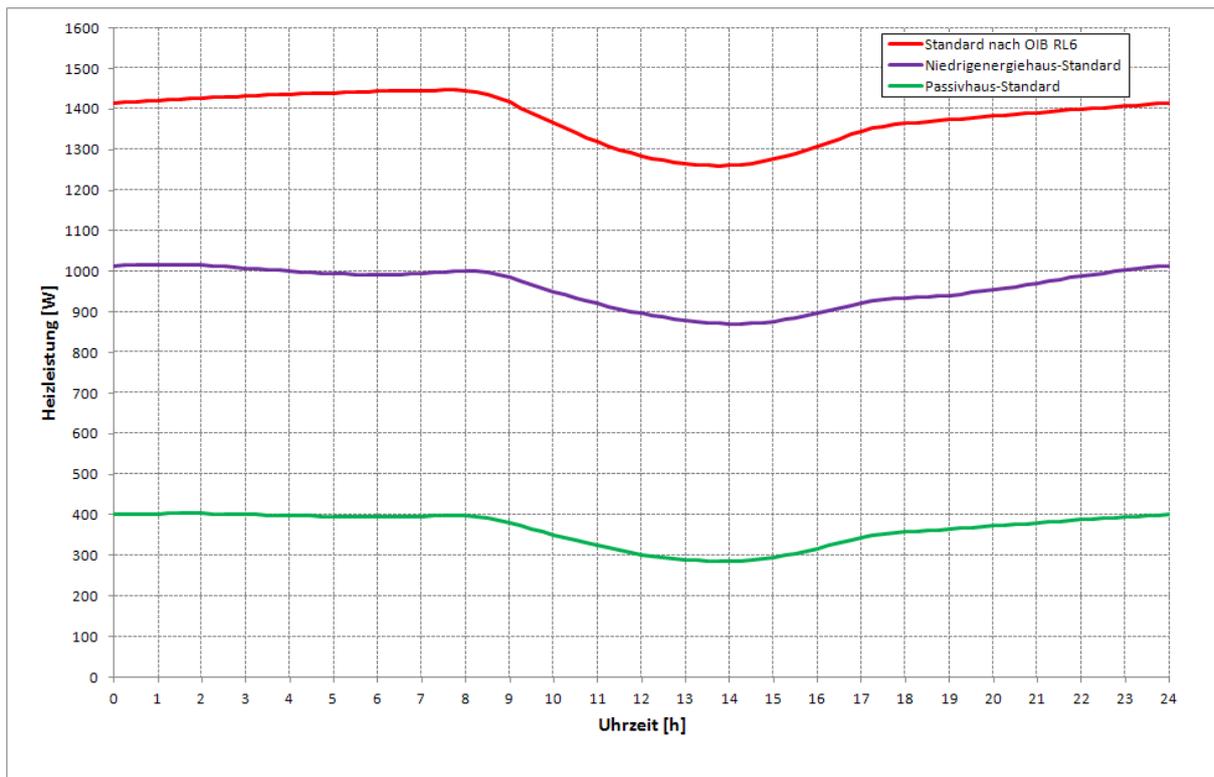


Abb. 5.6: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt

Für Eisenstadt und Klagenfurt ergeben sich qualitativ faktisch gleiche Tagesverläufe wie für Wien, Innere Stadt. Natürlich zeichnen sich die klimatisch rauerer Verhältnisse durch ein

leichtes Ansteigen der erforderlichen Heizleistungen ab. Die folgende Abbildung zeigt die Auswirkung des Außenklimas auf die berechneten Tagesgänge der erforderlichen Heizleistung.

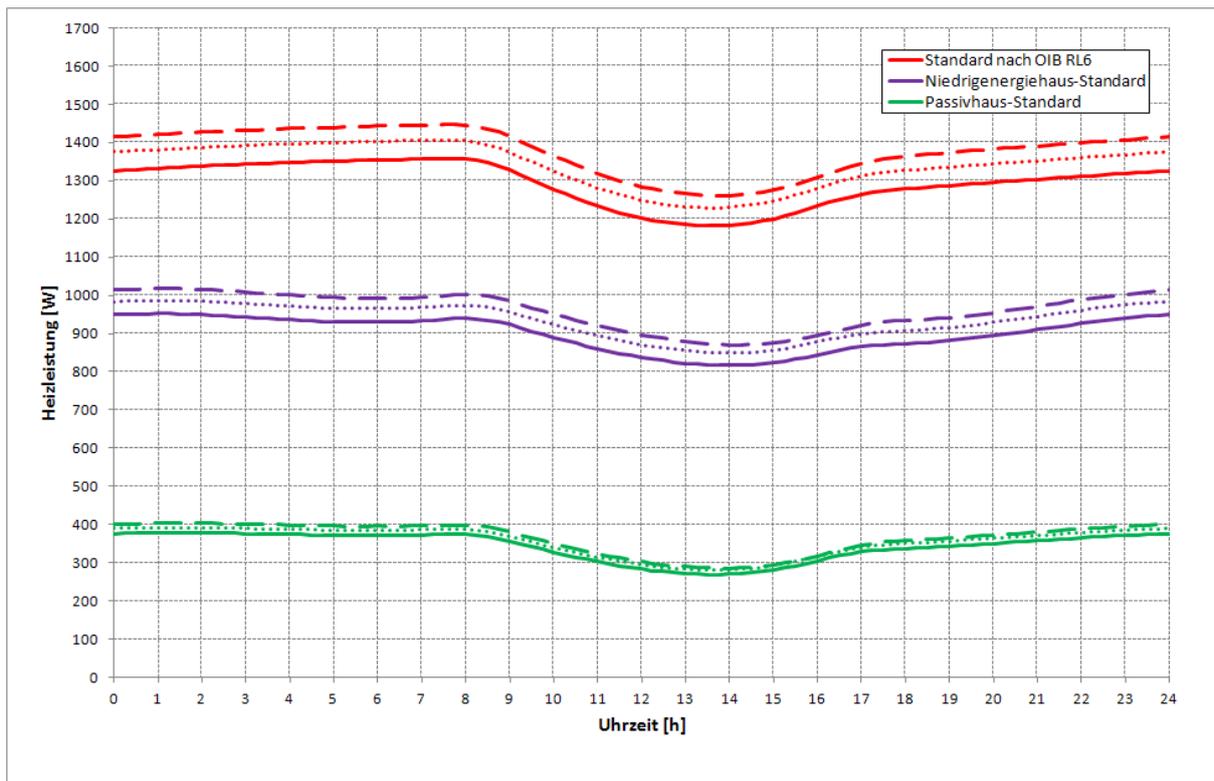


Abb. 5.7: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für die Standorte Wien – Innere Stadt (durchgezogene Linie), Eisenstadt (punktierte Linie) und Klagenfurt (strichlierte Linie)

Diese Zusammenschau der berechneten Ergebnisse zeigt deutlich, dass die thermische Qualität der Gebäudehülle die erforderliche Heizleistung wesentlich stärker beeinflusst als das Außenklima. Die Erhöhung der Heizleistung mit rauer werdendem Außenklima ist bei nach OIB Richtlinie 6 (10) errichteten Gebäuden am deutlichsten ausgeprägt. Bei Gebäudehüllen in Passivhausniveau ist die Standortabhängigkeit der erforderlichen Heizleistung hingegen kaum mehr auszumachen.

Die gesuchte Heizlast ist mit dem Maximum des berechneten Tagesverlaufs der am Auslegungstag benötigten Heizleistung gegeben. Die folgende Tabelle zeigt die berechneten Heizlasten in Abhängigkeit von der thermischen Qualität der Gebäudehülle und dem Gebäudestandort.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	378,4	951,9	1358,1
Eisenstadt	392,1	986,8	1407,0
Klagenfurt	403,3	1016,9	1447,4

Tab. 5.8: Für den Modellraum berechnete Heizlasten in Watt

Die nächste Tabelle zeigt die auf die Nutzfläche des Modellraums von 35 m² bezogenen Heizlasten.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	10,8	27,2	38,8
Eisenstadt	11,2	28,2	40,2
Klagenfurt	11,5	29,1	41,4

Tab. 5.9: Für den Modellraum berechnete nutzflächenbezogene Heizlasten in Wm^{-2}

Es zeigt sich, dass die vom Passivhausinstitut gesetzte Obergrenze für die nutzflächenbezogene Heizlast von $10,0 \text{ Wm}^{-2}$ unter den getroffenen Annahmen für das Passivhaus knapp überschritten wird. Die Heizlast für ein nach derzeitigen Mindestanforderungen (lt. OIB Richtlinie 6) Gebäude liegt ca. um den Faktor 3,6 höher als jene für ein Passivhaus.

Anmerkungen: Für das Überschreiten der Obergrenze der nutzflächenbezogenen Heizlast für das Passivhaus-Modell sind folgende beiden Gründe verantwortlich:

1. Einerseits handelt es sich bei dem Modellraum um einen (auch) in Hinblick auf die Heizlast kritischen Raum. Es kann damit davon ausgegangen werden, dass die Heizlast für das gesamte Gebäude niedriger ausfällt.
2. Andererseits sind die Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur dem EXCEL-Sheet NAT.XLS (14) entnommen und sind für Passivhäuser zu tief angesetzt. Gemäß Passivhaus-Projektierungspaket (16) ist für die Heizlastberechnung an dem angenommenen trüben Tag z. B. für Wien - Innere Stadt mit $-5,3 \text{ °C}$ ein deutlich höherer Wert anzusetzen als nach österreichischer Norm (NAT.XLS: $-11,3 \text{ °C}$).

Conclusio:

Die dynamische Berechnung der Raumheizlast für den in Abschnitt V.1 definierten Modellraum führt auf folgende Ergebnisse.

- Die thermische Qualität der Gebäudehülle beeinflusst die errechnete Raumheizlast erheblich. Die Heizlast für ein Gebäude, das nach den Vorgaben der derzeitigen OIB-Richtlinie 6 (10) errichtet wurde, liegt mehr als dreimal so hoch, wie für ein Gebäude in Passivhausqualität.
- Der Einfluss des Außenklimas, der über den Gebäudestandort einfließt, beeinflusst die errechnete Raumheizlast vergleichsweise wenig. Der Einfluss des Außenklimas auf die Heizlast sinkt mit besser werdender thermischer Gebäudequalität.
- Bei Vorliegen der Passivhausqualität liegen die errechneten nutzflächenbezogenen Raumheizlasten geringfügig über der vom Passivhausinstitut festgelegten Obergrenze von 10 Wm^{-2} . Da mit dem Modellraum ein kritischer Raum des Gebäudes untersucht wird, kann davon ausgegangen werden, dass das Gebäude in seiner Gesamtheit auch das Passivhauskriterium in Sachen Heizlast erfüllt⁹.

⁹ In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass das Heizlast-Kriterium für ein Passivhaus nur für den Fall einer Beheizung mit Luft eine Rolle spielt. Für diese Untersuchung ist damit das Überschreiten von 10 Wm^{-2} ohne Bedeutung.

V.2.2.1 Ermittlung der erforderlichen Heizfläche

Die im vorher gehenden Abschnitt errechneten Raumheizlasten bilden die Grundlage für die Dimensionierung der thermisch aktivierten Flächen in der Decke des Raums. Die unter Auslegungsbedingungen erforderlichen Wärmeabgabeleistungen sind in Tab. 5.8 für die drei untersuchten Standorte und die betrachteten drei Stufen in Hinblick auf die thermische Qualität der Gebäudehülle zusammengestellt.

Die Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke Φ_h ergibt sich aus Gleichung <4.1> mittels Multiplikation der Wärmestromdichte q mit der Registerfläche A gemäß

$$\Phi_h = q \cdot A = \Lambda_{r,u} \cdot A \cdot (\Theta_r - \Theta_u) \quad <5.1>$$

Wird nun Φ_h mit der Heizlast Φ_{HL} des Raums gleichgesetzt, so ergibt sich die zur Deckung der Heizlast erforderliche Registerfläche unmittelbar zu

$$A = \frac{\Phi_{HL}}{\Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} \quad <5.2>$$

wobei Φ_{HL} der Tab. 5.8 entnommen wird. Die Temperatur Θ_u in den Gleichungen <5.1> und <5.2> ist die Solltemperatur des zu beheizenden Raums und muss natürlich der Innenlufttemperatur, die der Heizlastberechnung zugrunde gelegt wurde, entsprechen; für das hier besprochene Beispiel gilt damit $\Theta_u = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Als Temperatur Θ_r ist die vom Heizmittel im Auslegungsfall maximal erreichbare Fluidtemperatur einzusetzen. Sie wird im Normalfall ein Parameter der rechnerischen Untersuchung sein, soll hier aber mit $30 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt und vorerst nicht variiert werden.

Der flächenbezogene thermische Leitwert zwischen Rohrregister und zu beheizendem Raum $\Lambda_{r,u}$ hängt u. a. vom Achsabstand der Rohre, vom Rohrdurchmesser und von der Lage des Rohrregisters in der Geschoßdecke ab und kann durch Anwendung von Gleichung <4.2> in Abhängigkeit vom Achsabstand der Rohre d leicht errechnet werden.

Wird z. B. angenommen, dass der Achsabstand der Rohre 15 cm , der Außendurchmesser des Rohrs 17 mm (Rohr $17 \times 2,0$) und die Betonüberdeckung 50 mm beträgt, so sind die Regressionskoeffizienten in Tab. 4.7 zu finden und der gesuchte flächenbezogene Leitwert ergibt sich zu $\Lambda_{r,u} = 4,5267 \cdot 0,15^2 - 8,0363 \cdot 0,15 + 5,7018 = 4,5982 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Bei einer thermischen Qualität der Gebäudehülle nach OIB-Richtlinie 6 (10) ergibt sich z. B. für den Standort Klagenfurt der gesuchte Flächeninhalt A gemäß Gleichung <5.2>:

$$A = \frac{\Phi_{HL}}{\Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} = \frac{1447,4}{4,5982 \cdot (30 - 20)} = 31,48 \text{ m}^2.$$

Es werden also ca. $31,5 \text{ m}^2$ Registerfläche benötigt, um unter Auslegungsbedingungen dem Raum die zur Einhaltung der Solltemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ erforderliche Wärmeleistung zur Verfügung stellen zu können, sofern die Heizmitteltemperatur mit $30 \text{ }^\circ\text{C}$ nach oben begrenzt ist. Da die notwendige Registerfläche in diesem Fall ca. 90% der gesamten Deckenfläche von 35 m^2 ausmacht, stehen Restflächen zum Einbau schallabsorbierender Materialien im untersuchten Fall nur unzureichend zur Verfügung.

Die folgende Tab. 5.10 zeigt die nach dem soeben beispielhaft gezeigten Berechnungsgang ermittelten Registerflächen für die 9 untersuchten Fälle.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	8,23	20,70	29,54
Eisenstadt	8,53	21,46	30,60
Klagenfurt	8,77	22,12	31,48

Tab. 5.10: Für den Modellraum aus der Heizlast errechnete Registerflächen in m²

Wird angenommen, dass maximal 70% der Deckenfläche – also 24,5 m² - mit dem Rohrregister belegt sein sollten, um die restlichen 30% der Deckenfläche für raumakustische Maßnahmen zur Verfügung zu haben, so zeigt sich sofort, dass diese Anforderung für Gebäudehüllen in Niedrigenergiehaus- und Passivhausqualität für alle untersuchten Gebäudestandorte erfüllt ist. Eine thermische Qualität gemäß OIB-Richtlinie 6 (10) reicht hingegen nicht aus (in Tab. 5.10 rot gekennzeichnet).

Ist die Gebäudehülle in Passivhausqualität ausgeführt, so reichen lt. Tab. 5.10 bereits ca. 25% der Deckenfläche aus, um den Raum zu beheizen. In diesem Zusammenhang liegt es nahe, die Fragestellung zu verändern und die Registerfläche mit 24,5 m² vorzugeben und nach dem dann notwendigen Achsabstand der Rohre im Register zu fragen.

Wie leicht nachzuvollziehen, führt eine Umformung von Gleichung <5.2> unter Verwendung von Gleichung <4.2> auf

$$\Lambda_{r,u} = a \cdot d^2 + b \cdot d + c = \frac{\Phi_{HL}}{A \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} \quad . \quad <5.3>$$

Die Lösung dieser quadratischen Gleichung nach dem Achsabstand d ist bekanntlich durch

$$d = \frac{1}{2 \cdot a} \cdot \left[-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot \left(c - \frac{\Phi_{HL}}{A \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} \right)} \right] \quad <5.4>$$

gegeben, wobei a, b und c die Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ sind und den Tabellen in Kapitel IV entnommen werden können.

Anwendung von Gleichung <5.4> unter Verwendung der in Tab. 5.8 angegebenen Heizlast-Werte und den Regressionskoeffizienten gemäß Tab. 4.7 führt auf folgendes Ergebnis.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	---	26,6	2,0
Eisenstadt	---	24,1	---
Klagenfurt	---	22,0	---

Tab. 5.11: Modellraum: erforderliche Achsabstände in cm bei einer Registerfläche von 24,5 m²

Es zeigt sich, dass für ein Passivhaus die quadratische Gleichung <5.3> keine reelle Lösung hat; der Wert unter der Wurzel in Gleichung <5.4> ist für alle drei Standorte negativ. Dies bedeutet, dass ein Register mit 24,5 m² Fläche zu groß ist, sofern die Heizmitteltemperatur mit 30 °C angesetzt wird. Natürlich kann bei Beibehaltung einer Registerfläche von 24,5 m² und der Festsetzung eines Rohrabstands die zur Deckung der Heizlast notwendige Heizmitteltemperatur rückgerechnet werden. Hierzu ist Gleichung <5.2> lediglich nach der Rohrtemperatur Θ_r aufzulösen:

$$\Theta_r = \Theta_u + \frac{\Phi_{HL}}{\Lambda_{r,u} \cdot A} \quad \langle 5.5 \rangle$$

Bei einem angenommenen Achsabstand der Rohre von z. B. $d = 0,30 \text{ m}$ (dies führt auf $\Lambda_{r,u} = 3,6983 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) ergibt sich daraus für den Standort Wien eine maximal notwendige Rohrtemperatur von $\Theta_r = 24,2 \text{ °C}$; für Klagenfurt liegt dieser Wert mit $\Theta_r = 24,6 \text{ °C}$ nur unwesentlich höher. Anwendung von Gleichung $\langle 4.3 \rangle$ führt unter diesen Bedingungen auf mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht zwischen $22,4 \text{ °C}$ (Wien) und $22,6 \text{ °C}$ (Klagenfurt). Bei der angesetzten Raumlufttemperatur von 20 °C kann davon ausgegangen werden, dass diese niedrigen Oberflächentemperaturen des beheizten Teils der Geschoßdecke auch bei extremen winterlichen Bedingungen für einen sehr hohen thermischen Komfort sorgen.

Tab. 5.11 zeigt jedoch auch, dass bei einer thermischen Qualität der Gebäudehülle nach OIB-Richtlinie 6 (10) eine dichtere Verlegung der Rohre des Heizregisters keine taugliche Maßnahme zur Versorgung des Raums mit ausreichender Wärme darstellt. Für den Standort Wien ergibt sich rechnerisch ein Achsabstand der Rohre von nur $2,0 \text{ cm}$; dies sollte für eine Ausführung natürlich nicht empfohlen werden. Für die beiden anderen Standorte ergeben sich die Achsabstände nach Gleichung $\langle 5.4 \rangle$ negativ. Dies bedeutet, dass auch bei einer Verlegung der Rohre dicht an dicht die errechnete Heizlast vom Rohrregister nicht erbracht werden kann.

Natürlich kann auch in diesem Fall nach der für die Erbringung der Heizlast erforderlichen Heizmitteltemperatur gefragt werden. Bei einem angenommenen Achsabstand der Rohre von $0,15 \text{ m}$ ($\Lambda_{r,u} = 4,5982 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) und dem unverändert für die Fläche des Rohrregisters angenommenen Wert $A = 24,5 \text{ m}^2$ ergibt sich für den Standort Wien nach Gleichung $\langle 5.5 \rangle$ $\Theta_r = 32,1 \text{ °C}$; der entsprechende Wert für Klagenfurt liegt bei $\Theta_r = 32,8 \text{ °C}$. Die dazu gehörigen mittleren Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht liegen nun bei $28,6 \text{ °C}$ für Wien und $29,1 \text{ °C}$ für Klagenfurt. Evident führt eine Verschlechterung der thermischen Qualität der Gebäudehülle auf Probleme beim thermischen Komfort im Raum.

Conclusio:

Die Berechnung der Heizflächen aus der Heizlast erweist sich unter den in Abschnitt IV entwickelten Berechnungsmethoden und Kennwerten als leicht durchführbar und aussagekräftig. Insbesondere sind folgende Erkenntnisse erwähnenswert:

- Die thermische Qualität der Gebäudehülle erweist sich als wesentliches Kriterium für die problemlose Einsetzbarkeit der Bauteilaktivierung als alleinige Heizquelle.
- Bei einer thermischen Qualität der Gebäudehülle in Niedrigenergiestandard (oder besser) ist die Beheizung eines Wohnraums durch eine thermisch aktivierte Decke allein ohne weiteres möglich. Die für die Zwecke der Raumakustik verwendbare Deckenfläche in der Größenordnung von ca. 30% der gesamten Deckenfläche steht in diesem Fall problemlos zur Verfügung.
- Im Fall eines Passivhauses empfiehlt es sich, die Fläche des Heizregisters überzudimensionieren und mit großen Rohrabständen zu arbeiten. Dies führt zu sehr niedrigen Heizmitteltemperaturen und in der Folge zu geringem Energiebedarf, zu niedrigen Oberflächentemperaturen im Bereich der Temperierung und damit zu sehr hohem thermischem Komfort.

V.2.3 Dynamische Kühllastberechnung

Auch die Kühllastberechnungen erfolgen für den in Abschnitt V.1 definierten Modellraum mittels periodisch eingeschwungener Simulation unter Zugriff auf das Gebäudesimulationsprogramm GEBA (11). Dem in Tab. 5.7 aufgelisteten Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur für den jeweiligen Standort wird eine mittlere monatliche Tagesschwankung überlagert, die gemäß ÖNorm B8110-3 (12) Standortunabhängig mit $\pm 7,0\text{ K}$ angesetzt wird. Die derart errechneten Tagesverläufe der Außenlufttemperatur sind in folgender Abbildung dargestellt.

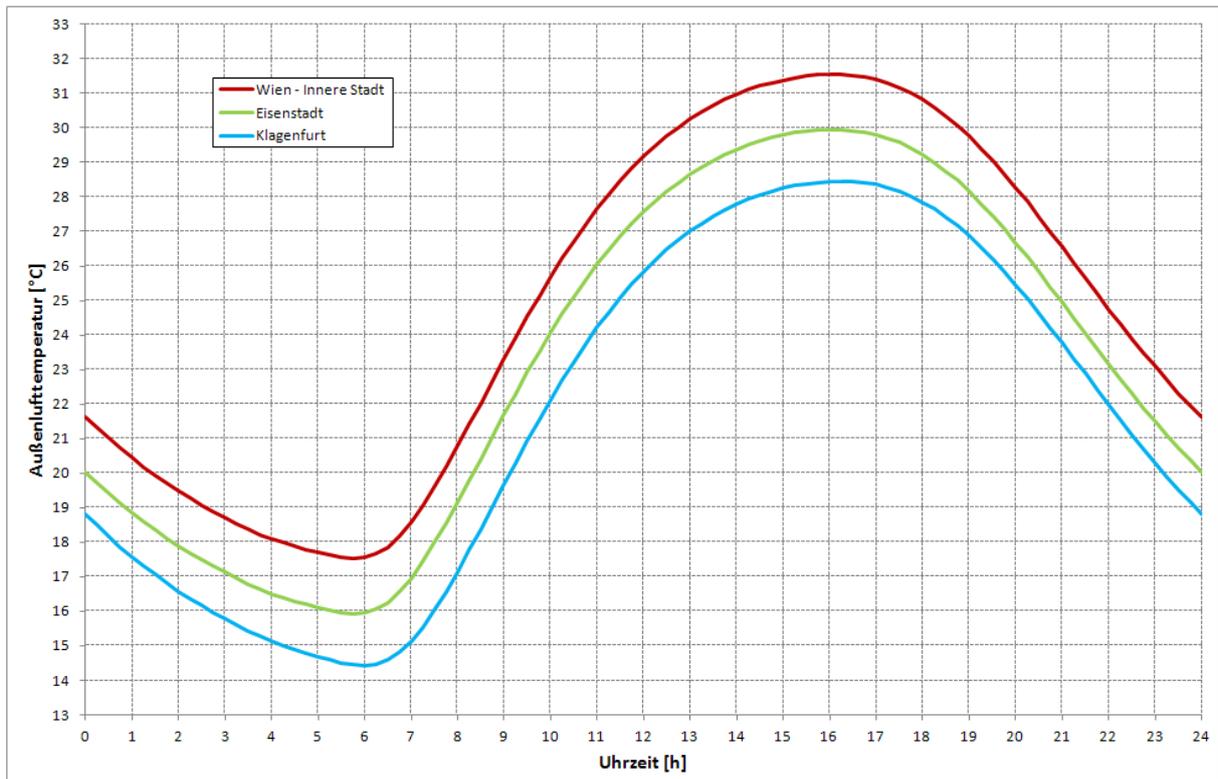


Abb. 5.8: Den dynamischen Kühllastberechnungen zugrunde gelegte Tagesverläufe der Außenlufttemperatur

Ersichtlich handelt es sich bei den entworfenen Tagesgängen der Außenlufttemperatur um parallel verschobene Kurven, deren Tagesmittelwerte den in Tab. 5.7 für die Sommertauglichkeitsberechnung aufgelisteten Werten entsprechen.

In Hinblick auf die Sonneneinstrahlung werden die Vorgaben der ÖNorm B8110-3 (12) verwendet. Die Trübungsparameter werden demnach unabhängig vom Gebäudestandort auf $T = 4,5$ ($T \dots$ Trübungsparameter nach Linke) und $\kappa = 0,333$ ($\kappa \dots$ Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz) gesetzt. Dies bedeutet, dass die Kühllastberechnung für einen „Strahlungstag“ - d. h. einen unbewölkten Tag mit geringer Lufttrübung - durchgeführt wird.

Für die Reflexionszahl der Umgebung (Albedo) wird gemäß ÖNorm B8110-3 (12) ein Wert von $\rho = 0,20$ angesetzt.

Auch in Hinblick auf die Raumnutzung werden die Vorgaben der ÖNorm B8110-3 (12) für den Musterraum verwendet. Es werden zum einen die in der Tabelle 2 dieser Norm für Wohnnutzung angegebene Personenbelegung und die Wärmeabgabe von Beleuchtung und Geräten als nutzungsbedingte Innenwärmen der Berechnung zugrunde gelegt. Zum anderen wird auch der Tagesgang der in dieser Tabelle aufscheinenden hygienischen Frischluftstraten angesetzt. Dies

bedeutet, dass der aus hygienischen Gründen erforderliche Bedarf an Frischluft gedeckt wird, aber keine zusätzlichen Lüftungsmaßnahmen zur Verringerung der Kühllast gesetzt werden.

Die Annahmen zur Frischluftzufuhr werden bewusst für alle drei für die Gebäudehülle definierten Qualitätsklassen gleich gehalten. Zwar wäre das Ausloten der Möglichkeiten spezieller Lüftungsstrategien - wie z. B. Fensterlüftung während der Nacht – in Hinblick auf eine Reduzierung der Kühllast eine interessante Fragestellung. Sie würde jedoch von der hier interessierenden Fragestellung ablenken und zudem die Gefahr der Fehlinterpretation der Berechnungsergebnisse vergrößern.

Per Simulation berechnet wird jener Tagesverlauf der sensiblen Kühlleistung, der gewährleistet, dass das Tagesmaximum der operativen Temperatur 27 °C nicht übersteigt. Die sensible Kühlleistung ist jene Kühlleistung, die dem Raum zugeführt werden muss und damit genau jene Größe, die für die folgende Berechnung von Kühlflächen benötigt wird. Das Maximum des errechneten Tagesverlaufs der sensiblen Kühlleistung wird mit der gesuchten Kühllast identifiziert.

Die folgenden Abbildungen zeigen die errechneten Tagesverläufe der benötigten sensiblen Kühlleistung für die drei ausgewählten Standorte.

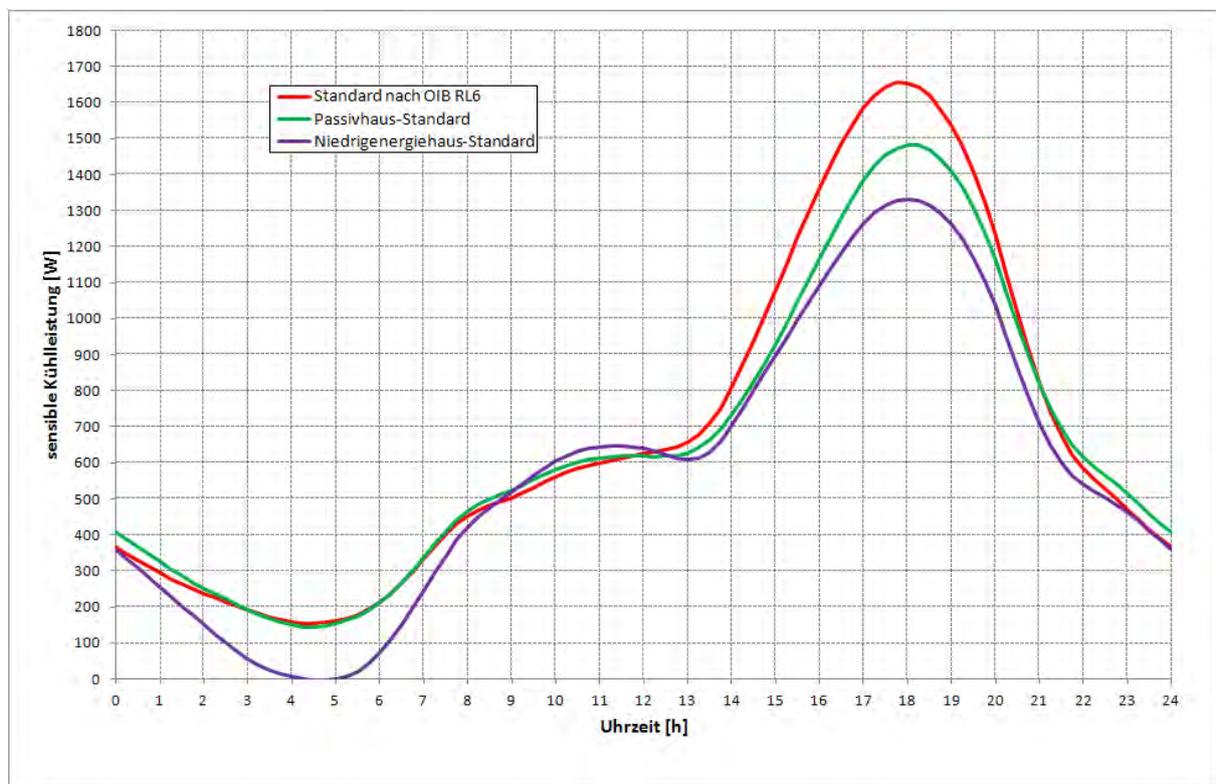


Abb. 5.9: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen; Norm-Sommertag für **Wien, Innere Stadt**

Die für die Gewährleistung der Sommertauglichkeit¹⁰ erforderliche sensible Kühlleistung zeigt für alle untersuchten Qualitätsklassen der Gebäudehülle ein ausgeprägtes Maximum am späten Nachmittag. Dieses Maximum wird durch den hohen solaren Eintrag durch die nach Westen ausgerichtete, unverschattete Fenstertür hervorgerufen und liefert den gesuchten Wert der sensiblen Kühllast.

¹⁰ Als sommertauglich wird hier gemäß ÖNorm B8110-3 (12) ein Raum bezeichnet, dessen Tagesgang der operativen Temperatur die Obergrenze von 27 °C nicht überschreitet.

Der thermische Standard der Gebäudehülle nach OIB Richtlinie 6 (10) („Bauordnung“) führt auf die deutlich höchste Kühllast. Den niedrigsten Wert der Kühllast liefert die Variante mit Niedrigenergie-Standard. Beim Passivhaus-Standard liegt die sensible Kühllast deutlich höher.

Eine tiefergehende Analyse des Ergebnisses zeigt, dass der Haupteinfluss auf die benötigte Kühlleistung durch die Art der Gläser hervorgerufen wird. Für das Niedrigenergiehaus wurde der Einbau eines „normalen“ 3-fach Wärmeschutzglases angenommen; beim Passivhaus wurde hingegen ein 3-fach Wärmeschutzglas mit sehr hohem Strahlungsdurchgang („Solarglas“) angesetzt, was zu einem deutlich höheren solaren Eintrag im Raum führt.

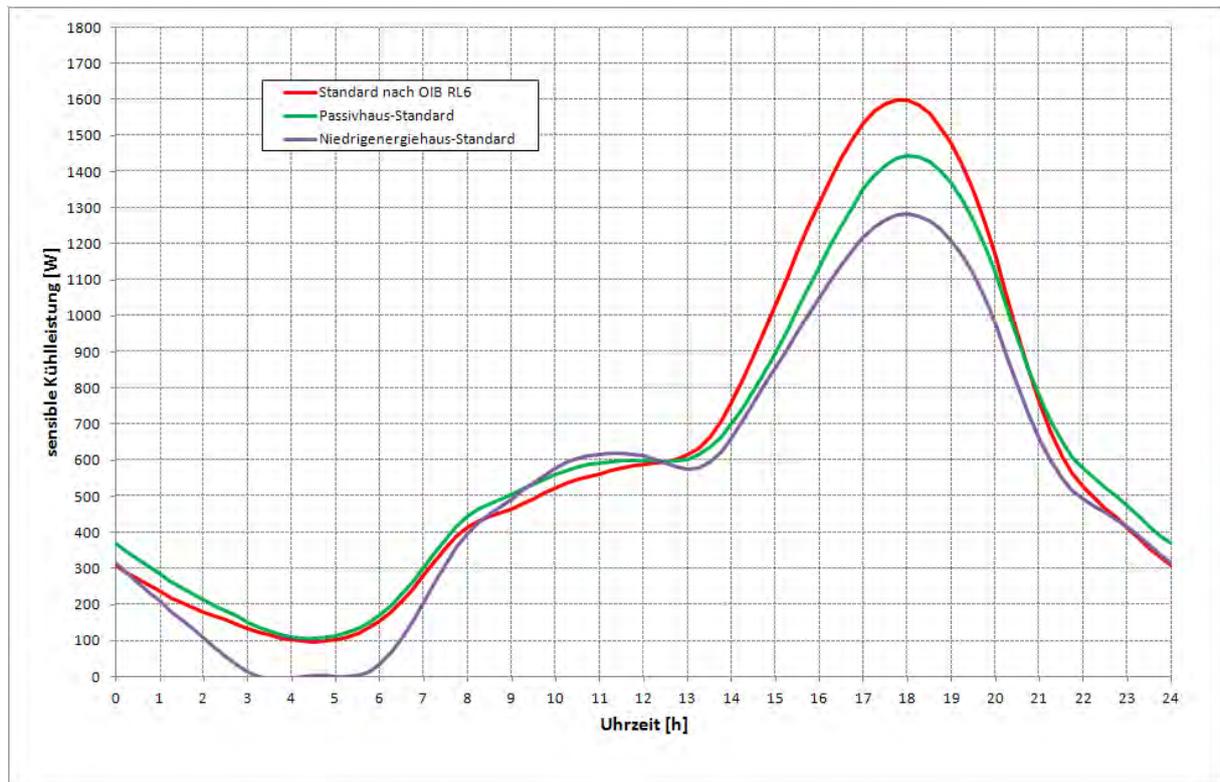


Abb. 5.10: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen; Norm-Sommertag für Eisenstadt

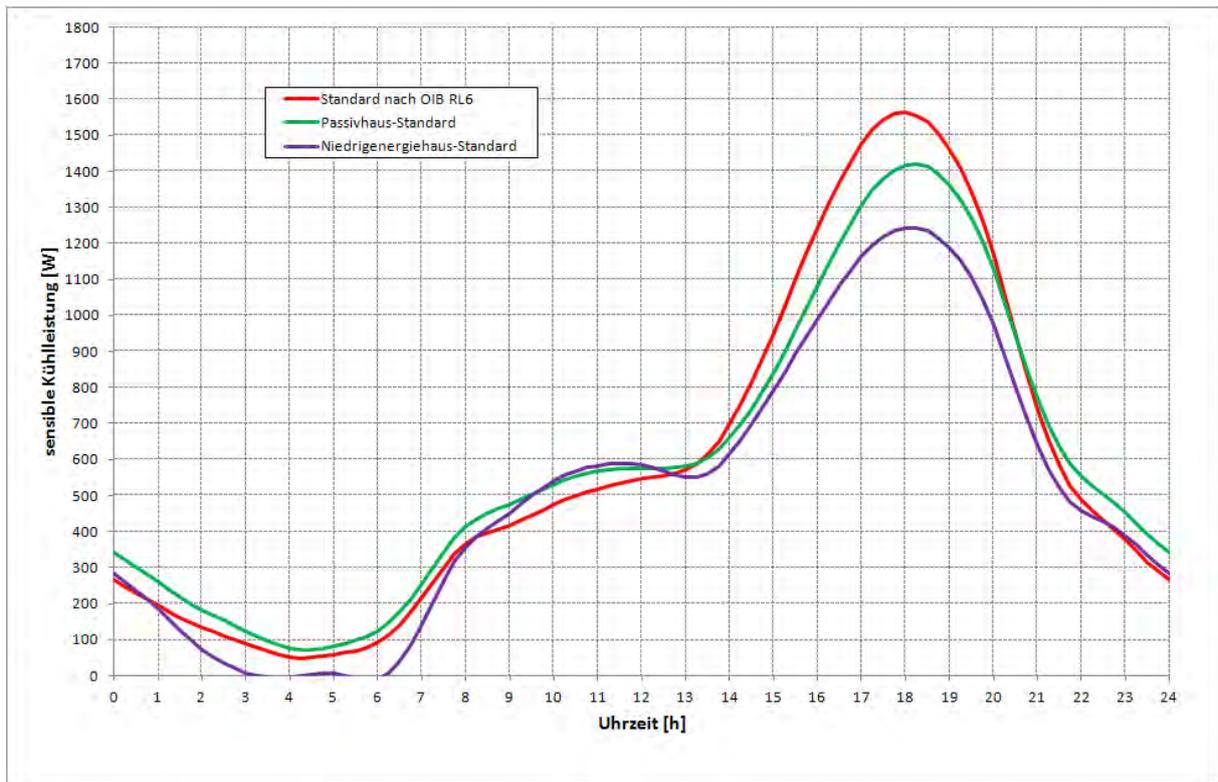


Abb. 5.11: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen; Norm-Sommertag für Klagenfurt

Für Eisenstadt und Klagenfurt ergeben sich qualitativ faktisch gleiche Tagesverläufe wie für Wien, Innere Stadt. Natürlich bewirken die etwas niedrigeren sommerlichen Außenlufttemperaturen ein deutliches Zurückgehen der erforderlichen sensiblen Kühllast. Die folgende Abbildung zeigt die Auswirkung des Außenklimas auf die berechneten Tagesgänge der erforderlichen sensiblen Kühlleistung.

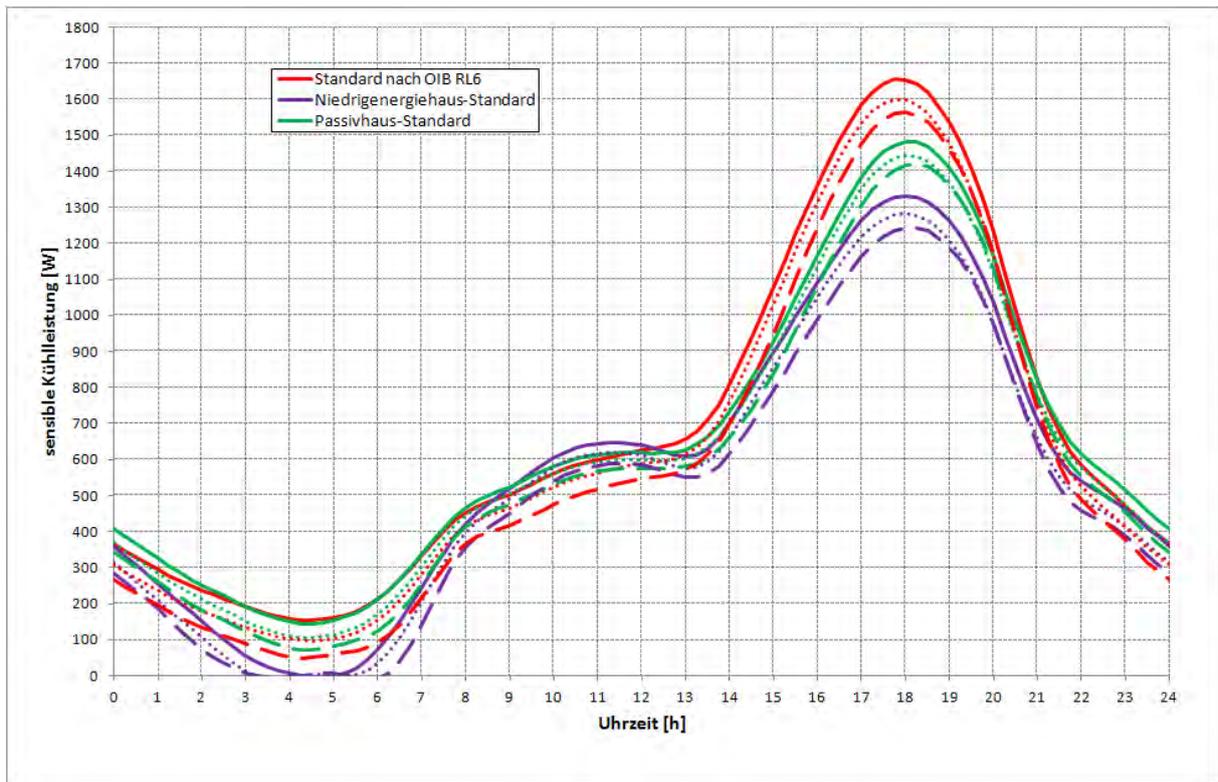


Abb. 5.12: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen am Norm-Sommertag für die Standorte Wien – Innere Stadt (durchgezogene Linie), Eisenstadt (punktierte Linie) und Klagenfurt (strichlierte Linie)

Diese Zusammenschau der berechneten Ergebnisse zeigt, dass die thermische Qualität der Gebäudehülle die erforderliche sensible Kühlleistung stärker beeinflusst als das sommerliche Außenklima.

Die gesuchte Kühllast ist mit dem Maximum des berechneten Tagesverlaufs der am Norm-Sommertag benötigten sensiblen Kühlleistung gegeben. Die folgende Tabelle zeigt die berechneten Kühllasten in Abhängigkeit von der thermischen Qualität der Gebäudehülle und dem Gebäudestandort.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	1482,1	1332,6	1654,8
Eisenstadt	1443,7	1282,1	1599,5
Klagenfurt	1420,1	1243,9	1563,4

Tab. 5.12: Für den Modellraum berechnete sensible Kühllasten in Watt

Die nächste Tabelle zeigt die auf die Nutzfläche des Modellraums von 35 m² bezogenen Kühllasten.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	42,3	38,1	47,3
Eisenstadt	41,2	36,6	45,7
Klagenfurt	40,6	35,5	44,7

Tab. 5.13: Für den Modellraum berechnete nutzflächenbezogene sensible Kühllasten in Wm^{-2}

Es zeigt sich, dass die nutzflächenbezogenen sensiblen Kühllasten wesentlich höher liegen, als die nutzflächenbezogenen Heizlasten. Für die Auslegung der Registerflächen wäre in diesem Fall das sommerliche Raumverhalten ausschlaggebend.

Es ist allerdings zu bedenken, dass die großen, westorientierten Fenstertüren des Modellraums bisher als unverschattet angenommen wurden. Es liegt nahe, danach zu fragen, welchen Einfluss eine Verschattung der Westverglasung auf den Tagesgang der erforderlichen Kühllasten hat. Hierzu wird angenommen, dass (nur) die nach Westen orientierten Fenstertüren während sommerlicher Hitzeperioden (Norm-Sommertag) ganztägig durch Außenjalousien verschattet sind. Das Ergebnis der entsprechenden Parameterstudie zeigt folgende Abbildung.

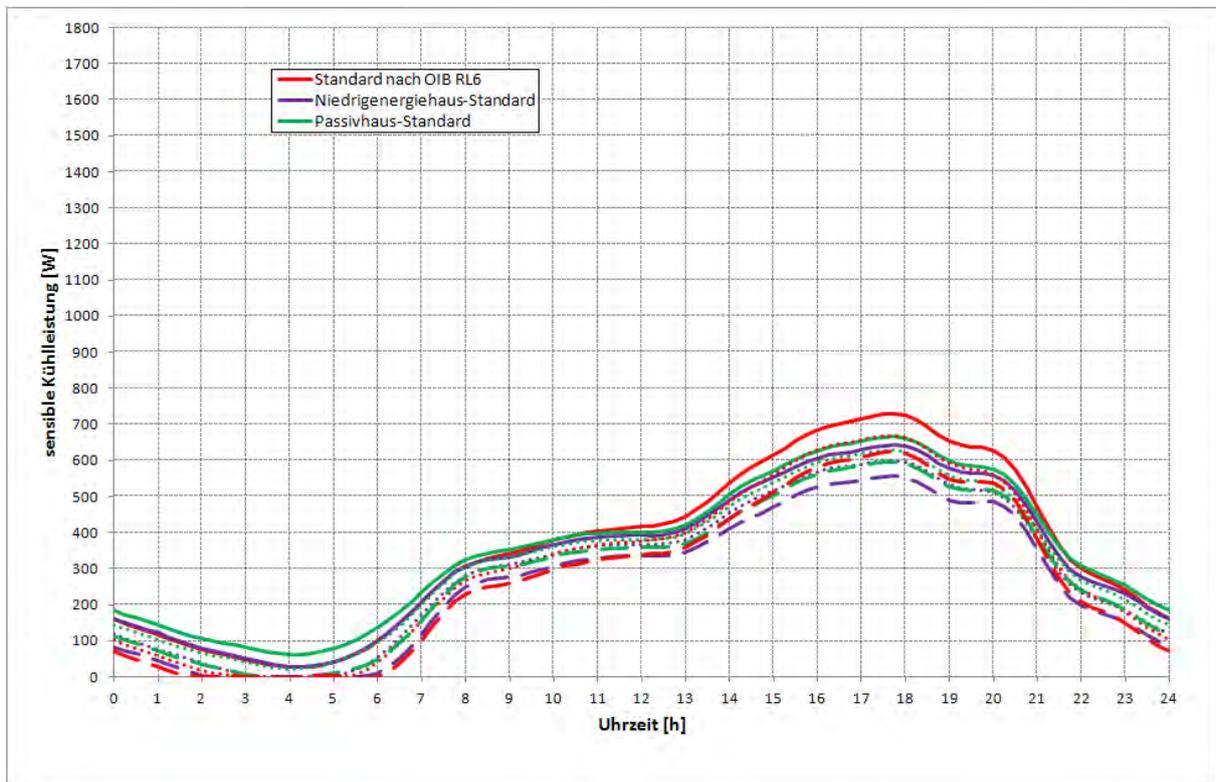


Abb. 5.13: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühllasten am Norm-Sommertag bei **ganztägig verwendeter Außenjalousie** vor den westlich orientierten Fenstertüren für die Standorte Wien – Innere Stadt (durchgezogene Linie), Eisenstadt (punktierte Linie) und Klagenfurt (strichlierte Linie)

Es zeigt sich, dass durch Jalousie-Verwendung die erforderliche Kühllast mehr als halbiert wird. Die Kühllast wird nach wie vor durch das Maximum am späten Nachmittag bestimmt. Allerdings spielt bei Jalousie-Verwendung der Wärmeeintrag durch die Sonne nicht mehr die dominierende Rolle. Die normgemäß angesetzten nutzungsbedingten Innenwärmern durch die Personenbelegung und die Wärmeabgabe von Beleuchtung und Geräten machen nun deutlich mehr als 50% der gesamten Innenwärmern des Raums aus.

Die folgende Tabelle zeigt die errechneten Kühllast-Werte im Fall der Jalousieverwendung.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	666,8	643,0	730,3
Eisenstadt	628,1	599,9	669,0
Klagenfurt	596,8	556,2	624,6

Tab. 5.14: Für den Modellraum berechnete sensible Kühllasten bei Jalousieverwendung in Watt

Die nächste Tabelle zeigt die auf die Nutzfläche des Modellraums von 35 m² bezogenen Kühllasten bei Jalousieverwendung.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	19,1	18,4	20,9
Eisenstadt	17,9	17,1	19,1
Klagenfurt	17,1	15,9	17,8

Tab. 5.15: Für den Modellraum berechnete nutzflächenbezogene sensible Kühllasten bei Jalousieverwendung in Wm⁻²

Es zeigt sich, dass die nutzflächenbezogenen sensiblen Kühllasten bei Jalousieverwendung vor den Fenstertüren im Fall von Passivhausqualität der Gebäudehülle deutlich höher sind, als die errechneten Heizlast-Werte (siehe Tab. 5.9). Für Niedrigenergiehausqualität oder eine thermische Qualität nach Bauordnung (OIB RL 6) liegen hingegen die Heizlast-Werte deutlich über den Kühllast-Werten. Es zeigt sich somit, dass die thermische Qualität der Gebäudehülle nicht nur wesentlichen Einfluss auf die Heiz- und Kühllastwerte hat, sondern auch bestimmt, ob die Auslegung der Kühlregister nach dem Sommer- oder dem Winterfall zu erfolgen hat.

Conclusio:

Die dynamische Berechnung der sensiblen Kühllast für den in Abschnitt V.1 definierten Modellraum führt auf folgende Ergebnisse.

- Die errechneten Werte der sensiblen Kühllast für den Musterraum werden durch die Verschattungsmaßnahmen für die Westfenster wesentlich beeinflusst. Das Vorsehen einer außen liegenden Jalousie reduziert die Kühllast um deutlich mehr als die Hälfte und ist damit unbedingt zu empfehlen.
- Im Vergleich zu den Heizlast-Werten liegen die Kühllast-Werte für den Niedrigenergie-Standard und die thermische Gebäudequalität nach OIB Richtlinie 6 (10) deutlich niedriger.
- Für eine thermische Qualität der Gebäudehülle in Passivhausqualität liegen die Kühllast-Werte hingegen deutlich über den entsprechenden Heizlast-Werten.

V.2.3.1 Ermittlung der erforderlichen Kühlfläche

Die im vorher gehenden Abschnitt errechneten sensiblen Kühllasten bilden – gemeinsam mit den Erkenntnissen aus Abschnitt V.2.2.1 - die Grundlage für die Dimensionierung der thermisch aktivierten Flächen in der Decke des Raums. Wie gezeigt, liegen die Kühllast-Werte bei Fehlen sinnvoller Verschattungsmaßnahmen weit über den Heizlast-Werten. Es wird im Folgenden daher davon ausgegangen, dass die für den Modellraum angenommenen großflächigen, westorientierten Fensterflächen durch Außenjalousien verschattet sind. Für die Berech-

nung der erforderlichen Flächen der Kühlregister werden damit die Kühllasten von Tab. 5.14 herangezogen.

Wie schon bei der Berechnung der für die Deckung der Heizlast erforderlichen Registerflächen, wird die zu Gleichung <5.2> analoge Beziehung

$$A = \frac{\Phi_{KL}}{\Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_u - \Theta_r)} \quad <5.6>$$

zur Berechnung der erforderlichen thermisch aktivierbaren Fläche A herangezogen. Φ_{KL} ist die errechnete sensible Kühllast in Watt und wird Tab. 5.14 entnommen; Θ_u ist die der Kühllastberechnung zugrunde gelegte Obergrenze für die Solltemperatur des unter der Geschoßdecke liegenden Raums und beträgt im Fall der in Abschnitt V.2.3 präsentierten Kühllastberechnung 27 °C. Θ_r ist die Temperatur des Kühlmittels und wird hier vorerst mit 18,0 °C festgesetzt.

Wird wie im Fall der Heizflächen-Berechnung angenommen, dass der Achsabstand der Rohre 15 cm, der Außendurchmesser des Rohrs 17 mm (Rohr 17 x 2,0) und die Betonüberdeckung 50 mm beträgt, so sind die Regressionskoeffizienten der Tab. 4.7 zu entnehmen. Der flächenbezogene thermische Leitwert zwischen Register und unter der Decke liegendem Raum ergibt sich demnach zu $\Lambda_{r,u} = 12,203 \cdot 0,15^2 - 16,428 \cdot 0,15 + 8,6439 = 6,4543 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Bei einer thermischen Qualität der Gebäudehülle nach OIB-Richtlinie 6 (10) wird z. B. für den Standort Klagenfurt der gesuchte Flächeninhalt A gemäß Gleichung <5.6> mit

$$A = \frac{\Phi_{KL}}{\Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} = \frac{624,6}{6,4543 \cdot (27 - 18)} = 10,75 \text{ m}^2$$

erhalten.

Um die errechnete Kühllast zu decken, würden somit ca. 10,8 m² Registerfläche ausreichen, sofern die Kühlmitteltemperatur mit 18 °C nach unten begrenzt ist. Im Fall der Gebäudehülle nach OIB-Richtlinie 6 stellt sich somit heraus, dass die Heizlast die für die Auslegung des Rohrregisters maßgebliche Größe ist.

Die folgende Tab. 5.16 zeigt die nach dem soeben beispielhaft gezeigten Berechnungsgang ermittelten Registerflächen für die 9 untersuchten Fälle.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	11,48	11,07	12,57
Eisenstadt	10,81	10,33	11,52
Klagenfurt	10,27	9,58	10,75

Tab. 5.16: Für den Modellraum aus der Kühllast errechnete Registerflächen in m²

Es zeigt sich, dass für alle drei untersuchten Qualitätsstufen für die Gebäudehülle an allen drei betrachteten Standorten die Deckenfläche bei weitem ausreicht, um die Kühllast unter den angenommenen Bedingungen zu decken. Zu beachten ist lediglich, dass im Fall der Passivhaustaughlichkeit der Gebäudehülle die Kühllastberechnung die Auslegung der Register bestimmen sollte.

Wird wiederum angenommen, dass die Registerfläche mit 24,5 m² vorgegeben ist, so kann die Rohrtemperatur Θ_r nach folgender, aus Gleichung <5.6> abgeleiteten Beziehung

$$\Theta_r = \Theta_u - \frac{\Phi_{KL}}{\Lambda_{r,u} \cdot A} \quad <5.7>$$

berechnet werden. Unter der Annahme, dass die Rohre in 0,3 m Abstand verlegt sind (dies führt auf $\Lambda_{r,u} = 4,8138 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), ergibt sich für Wien im Auslegungsfall bei Passivhausqualität eine Rohrtemperatur von 21,3 °C, für Klagenfurt mit 21,9 °C ein etwas höherer Wert. Die entsprechenden Rohrtemperaturen für eine Gebäudehülle im Niedrigenergiehaus-Standard betragen 21,5 °C für Wien bzw. 22,3 °C für Klagenfurt. Wie bereits besprochen, kann die Rohrtemperatur in guter Näherung mit dem Mittelwert aus Vorlauf- und Rücklauftemperatur des Kühlmittels identifiziert werden. Es zeigt sich somit, dass bereits mit verhältnismäßig hohen Kühlmitteltemperaturen die erforderlichen sensiblen Kühlleistungen bereitgestellt werden können.

Anwendung von Gleichung <4.3> führt unter den angenommenen Bedingungen auf mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht, die beim Maximalwert der Lufttemperatur von 27 °C und einer Gebäudehülle in Passivhausqualität zwischen 24,5 °C (Wien) und 24,7 °C (Klagenfurt) liegt. Dieses Ergebnis zeigt, dass bei Kühlung mittels thermischer Aktivierung der Decke hohe thermische Behaglichkeit selbst während lange andauernder sommerlicher Hitzeperioden gewährleistet ist.

Conclusio:

Die Berechnung der Kühlflächen aus der sensiblen Kühllast erweist sich unter den in Abschnitt V.2.2.1 entwickelten Berechnungsmethoden und Kennwerten als leicht durchführbar und aussagekräftig. Insbesondere sind folgende Erkenntnisse erwähnenswert:

- Ohne Verschattungsmaßnahmen für die großflächigen Fenstertüren im Westen kann der Modellraum nicht allein durch Bauteilaktivierung ausreichend gekühlt werden. Das Vorsehen und die Verwendung einer Außenjalousie während hochsommerlicher Hitzeperioden erweist sich als unbedingt notwendig.
- Im Vergleich zur Auslegung der Rohrregister nach der Heizlast-Berechnung ergeben sich für alle untersuchten Standorte im Fall des Passivhaus-Standards größere, thermisch zu aktivierende Flächen. In diesem Fall ist also die Kühllast für die Auslegung heranzuziehen.
- Für den Niedrigenergiehaus-Standard und eine thermische Qualität der Gebäudehülle nach OIB-Richtlinie 6 reichen die nach der Heizlast dimensionierten, thermisch aktivierten Flächen in der Geschoßdecke bei weitem aus, um die erforderliche Kühllast zu erbringen. In diesen Fällen ist somit die Heizlast für die Auslegung heranzuziehen.
- Der Grund für die hohen Kühllasten bei Passivhausqualität sind die angenommenen „Solargläser“ mit sehr hohem Gesamtenergiedurchlassgrad. Werden „normale“ 3-fach Wärmeschutzgläser verwendet, so ist die die Auslegung nach den Heizlast-Werten auch für den Passivhaus-Standard zulässig.

V.3 Energiebedarfsberechnungen

Die Energiebedarfsberechnungen unterscheiden sich insofern von den bisher behandelten Heiz- und Kühllastberechnungen, als der Energiebedarf eine rechnerische Prognose in Hinblick auf die dem Raum im langjährigen Schnitt zuzuführende Heizwärme bzw. – im Sommerfall – die dem Raum zu entziehende Wärmemenge darstellt. Das Ergebnis von Heizlast- und Kühllastbe-

rechnung hingegen waren Leistungen, die zur Auslegung der Heizkörper im Raum bzw. der Auslegung der zu aktivierenden Deckenflächen benötigt werden.

Üblicherweise bezieht sich das Ergebnis einer Heizwärmebedarfsberechnung auf die gesamte Heizsaison; ebenso wird sich der Kühlbedarf auf das gesamte Zeitintervall eines Jahres, während dessen gekühlt werden muss, beziehen. Hier interessiert jedoch in erster Linie nicht der gesamte, jährliche Heizwärme- oder Kühlbedarf, sondern ein Vergleich der Bedarfs-Werte zwischen der alleinigen Versorgung des Musterraums mit thermisch aktivierten Flächen und einer konventionellen Wärmeversorgung bzw. Kühlung. Vereinfachend wird hierbei für den konventionellen Ansatz der Konditionierung des Raums eine rein konvektive Wärmezufuhr (d. h. eine Konvektorheizung) bzw. eine rein konvektiv arbeitende Kühlung angenommen.

Für den Vergleich einfacher und in Hinblick auf das Ergebnis aussagekräftiger ist es, wenn der ins Auge gefasste Vergleich des Energiebedarfs auf einen einzigen Monat beschränkt wird. Zudem liefert eine periodisch eingeschwungene Simulation für einen in Hinblick auf die außerklimatischen Verhältnisse und die Nutzungsansätze „mittleren“ Tag Ergebnisse, die – mit der Anzahl der Tage im Monat multipliziert – eine sehr gute Näherung für den gesuchten monatlichen Energiebedarf darstellen.

Als Randbedingungen sind somit mittlere Nutzungsangaben, wie Personenbelegung, die Wärmeabgabe für Beleuchtung und Geräte sowie Angaben zur Lüftung anzusetzen. Diese Werte werden der zuständigen Norm für Österreich - der ÖNorm B8110-5 (18) – entnommen.

Demnach ist im Falle der Heizwärmebedarfsberechnung für die Wärmeabgabe von Personen, Beleuchtung und Geräten als flächenbezogener Wert pauschal $3,5 \text{ Wm}^{-2}$ anzusetzen. Als Bezugsfläche ist hierzu die Brutto-Grundfläche heranzuziehen. Dieser Wert ist für Passivhäuser auf $2,10 \text{ Wm}^{-2}$ zu reduzieren. Bezüglich der Lüftung ist im Fall der Heizwärmebedarfsberechnung mit permanent 0,4-fachem Luftwechsel zu rechnen.

Für die Berechnung des Kühlbedarfs sind in der ÖNorm B8110-5 (18) keine entsprechenden Angaben zu finden, da davon ausgegangen wird, dass Wohnhäuser nicht gekühlt werden. Für die ins Auge gefassten Simulationen werden daher in Hinblick auf die Raumnutzung die Werte der ÖNorm B8110-3 (12), also jene Ansätze, die auch der Kühllastberechnung zugrunde gelegt wurden, verwendet.

Bezüglich der außerklimatischen Bedingungen geht es darum, Klimadaten anzusetzen, die den am Gebäudestandort im langjährigen Schnitt anzutreffenden Verhältnissen entsprechen. Der Auswahl dieser Klimadaten ist der folgende Abschnitt gewidmet.

V.3.1 Außenklimatische Bedingungen - mittlere Verhältnisse

Die Simulationen des thermischen Verhaltens des in Abschnitt V.1 definierten Musterraums sollen für die drei bereits für die Heiz- und Kühllastberechnung exemplarisch ausgewählten Standorte Wien, Innere Stadt, Eisenstadt und Klagenfurt durchgeführt werden. Benötigt werden somit die Außenlufttemperatur und Angaben zur Sonneneinstrahlung für diese drei Standorte.

Die benötigten langjährigen Klimadaten können mit dem Programm OEKLIM (19) flächendeckend für Österreich berechnet werden. OEKLIM war in einer reduzierten Form auch auf der Homepage des BMFWF als „Klimadatenrechner“ (20) installiert und für die Allgemeinheit frei verfügbar. Dieser Rechner wurde nach Verschiebung auf die Homepages anderer Ministerien im Jahr 2018 vom Netz genommen und ist somit nicht mehr zugreifbar.

In Hinblick auf die anzusetzenden Außenlufttemperaturen interessieren vor allem die Monatsmittelwerte für die drei ausgesuchten Standorte. Die folgende Abbildung zeigt die mit OEKLIM

(19) berechneten langjährigen Monatsmittelwerte, wobei sich der Mittelungszeitraum auf 30 Jahre (1978 bis 2007) bezieht.

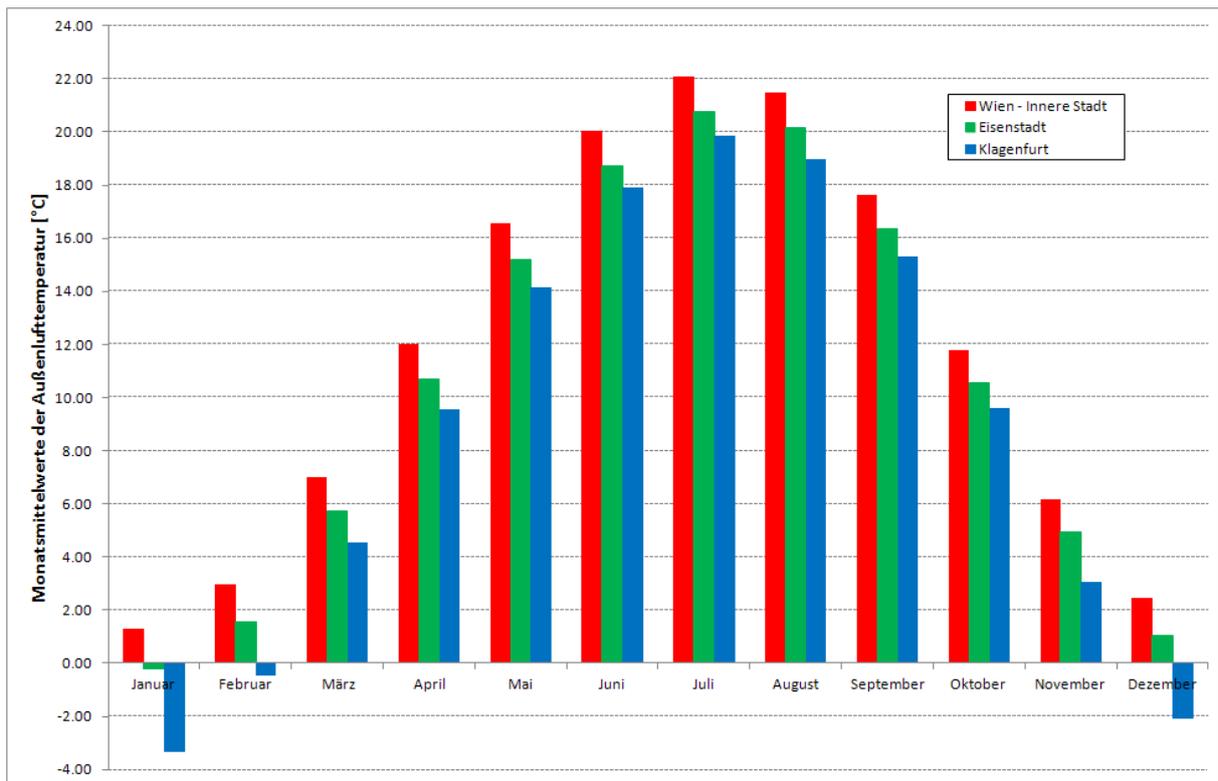


Abb. 5.14: Langjährige Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur für Wien, Innere Stadt, Eisenstadt und Klagenfurt

Es zeigt sich, dass sich auch in Hinblick auf die langjährigen außenklimatischen Bedingungen die drei ausgewählten Standorte deutlich unterscheiden und damit für die ins Auge gefassten Vergleichsrechnungen sehr gut geeignet sind.

Die mittleren monatlichen Tagesschwankungen der Außenlufttemperatur sind im Klimadatenkatalog (15) zu finden und werden dem Monatsmittelwert nach Abb. 5.14 überlagert.

Bezüglich der Sonneneinstrahlung liefert OEKLIM (19) nicht nur die langjährigen Tagessummen von Global- und Himmelsstrahlung auf die horizontale Fläche, sondern auch die entsprechenden Tagessummen von Global- und Diffusstrahlung auf beliebig orientierte, vom Programm benutzer definierte Empfangsflächen. Beispielhaft für ein solches Berechnungsergebnis zeigt folgende Abbildung die mittleren monatlichen Tagessummen der Globalstrahlung auf die Westfassade.

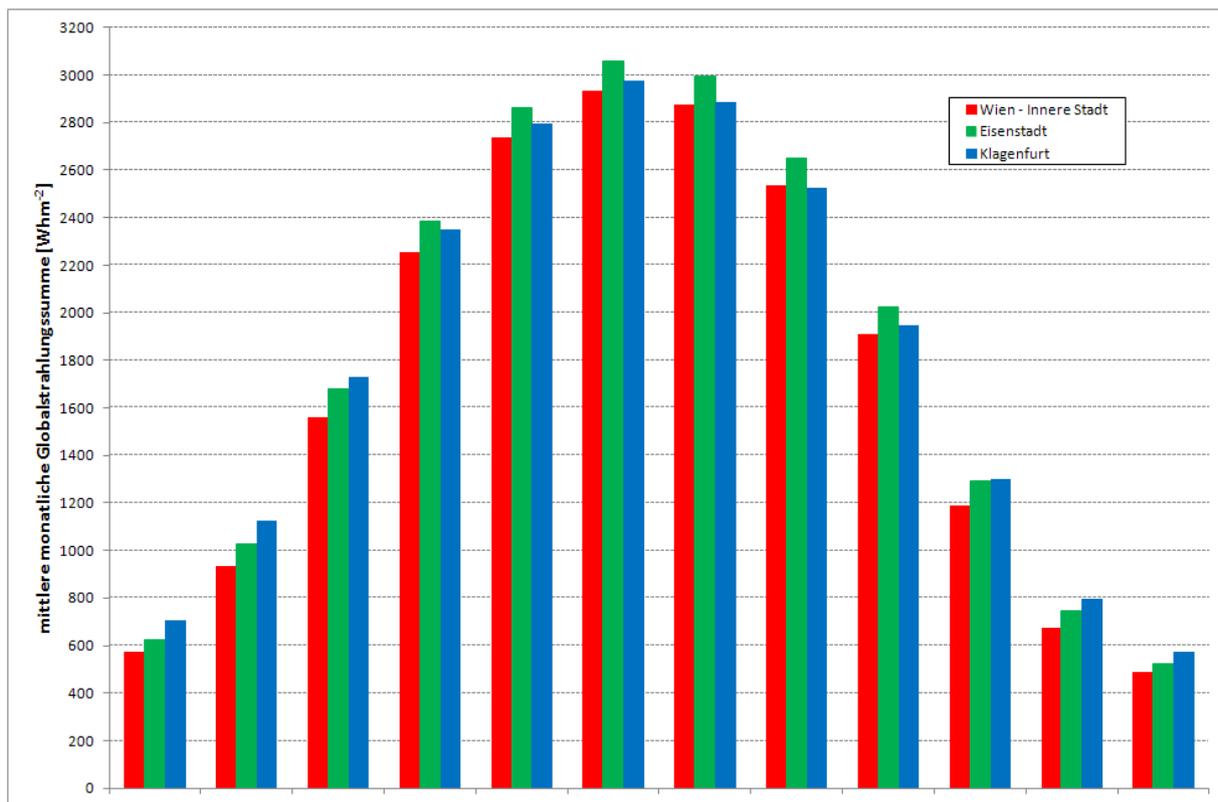


Abb. 5.15: Langjährige monatliche Summen der Globalstrahlung auf die vertikale Westfassade für Wien, Innere Stadt, Eisenstadt und Klagenfurt

Auch in Hinblick auf die solare Einstrahlung ergeben sich zwischen den ausgewählten Standorten deutliche Unterschiede. Die von OEKLIM (19) gelieferten Strahlungssummen auf die West- und Nordfassade werden im Zuge der Simulation verwendet, um Tagesgänge der entsprechenden Sonneneinstrahlungswerte rückzurechnen.

V.3.2 Berechnung des Heizwärmebedarfs

Der Heizwärmebedarf soll in Abhängigkeit von der Art der Beheizung des Modellraums für den Monat mit den tiefsten Temperaturen berechnet werden. Gemäß Abb. 5.14 ist dies für alle drei Standorte der Januar. Die folgende Tabelle zeigt die zur Beschreibung der langjährigen außerklimatischen Verhältnisse verwendeten Parameter.

	Temperatur [°C]		Strahlungsfaktoren [-]	
	Mittelwert	Amplitude	Linke	Reitz
Wien-Innere Stadt	1,31	2,15	8,3217	0,2668
Eisenstadt	-0,21	2,15	7,8925	0,2786
Klagenfurt	-3,35	2,15	7,6958	0,2854

Tab. 5.17: Parameter zur Beschreibung der außerklimatischen Verhältnisse im Januar für die ausgewählten Landeshauptstädte

Aufgrund der Ergebnisse von Abschnitt V.2.2 wird die Variante mit der thermischen Qualität der Gebäudehülle nach OIB-Richtlinie 6 ausgeschieden und die Untersuchung auf Niedrigenergie- und Passivhäuser beschränkt.

In folgender Abbildung sind die Tagesverläufe der benötigten Heizleistung bei rein konvektiver Beheizung des Raums jenen Tagesverläufen gegenübergestellt, die sich bei Aktivierung von 70% der Deckenfläche ($A = 24,5\text{ m}^2$) ergeben. Es wurde hierbei mit 5 cm Betonüberdeckung, Rohren der Dimension $17 \times 2,0$ und einem Rohrabstand von 20 cm gerechnet¹¹. Als Gebäudestandort wird vorerst Wien, Innere Stadt festgelegt.

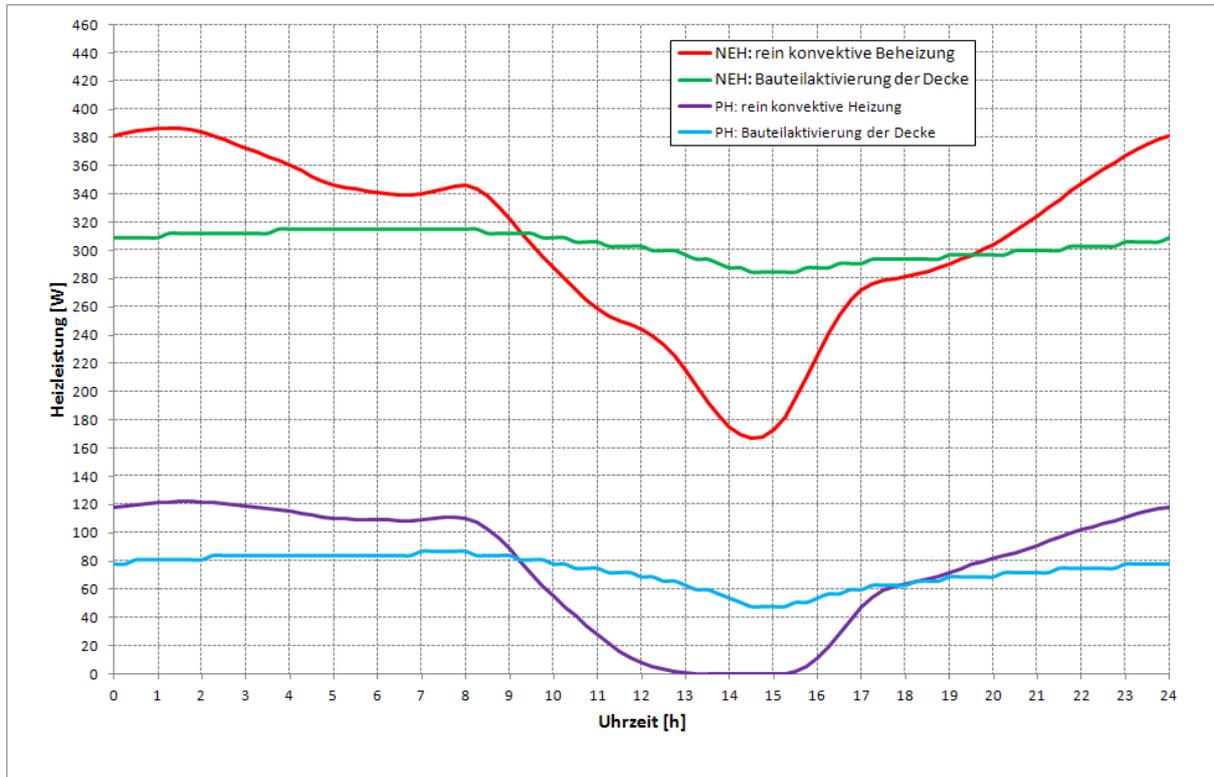


Abb. 5.16: Tagesgänge der erforderlichen Heizleistungen für den mittleren Januar-Tag am Standort Wien, Innere Stadt

Bei den Varianten für rein konvektive Beheizung wurde als Solltemperatur des Raums die Lufttemperatur angesetzt und angenommen, dass die Heizung ideal regelt, also zu jedem Zeitpunkt des Tages die Lufttemperatur exakt eingehalten wird. Dem gegenüber wurde bei der Aktivierung der Geschoßdecke eine tageszeitlich konstante Heizmitteltemperatur angesetzt, die Heizung somit unregelt angenommen.

Abb. 5.16 zeigt starke Unterschiede im Tagesverlauf der an den Raum abgegebenen Heizleistungen. In erster Linie interessiert hier jedoch der Heizwärmebedarf, also die während des Tages an den Raum abgegebene Wärmemenge. Diese ergibt sich durch Integration der errechneten Heizleistungsgänge und ist in Abb. 5.16 als Fläche unter der jeweiligen Kurve zu sehen. In folgender Tabelle sind die errechneten Heizwärmebedarfs-Werte für den mittleren Januar-Tag am Standort Wien gegenübergestellt.

¹¹ Mit einem Achsabstand der Rohre von 20 cm kann auch bei einer Gebäudehülle im Niedrigenergie-Standard selbst für Klagenfurt die Heizlast mit $24,5\text{ m}^2$ aktivierter Deckenfläche erbracht werden.

Niedrigenergiehaus		Passivhaus	
rein konvektiv	Deckenaktivierung	rein konvektiv	Deckenaktivierung
7,37	7,29	1,80	1,76

Tab. 5.18: Heizwärmebedarf in kWh für den mittleren Januar-Tag in Wien, Innere Stadt in Abhängigkeit von der Qualität der Gebäudehülle und der Art der Beheizung

Es zeigt sich, dass der Heizwärmebedarf im Fall der thermischen Aktivierung der Geschosdecke geringfügig unter jenem bei rein konvektiver Beheizung des Raumes liegt. Der prozentuelle Unterschied liegt bei Niedrigenergie-Standard bei ca. 1% und vergrößert sich für Passivhäuser auf 2%. In diesem Zusammenhang muss betont werden, dass diese Gegenüberstellung auf eine rein bauphysikalische Betrachtung beschränkt ist. Das hohe Einsparungspotential, das sich aufgrund der niedrigen Heizmittelttemperaturen auf der haustechnischen Seite ergibt, ist hier nicht berücksichtigt und auch nicht Thema dieser Arbeit.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Heizleistungsverläufe, deren Tagesmittelwerte aber annähernd konstant sind, drängt sich die Frage nach den sich im Raum einstellenden Tagesverläufen der operativen Temperatur auf. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die errechneten Tagesverläufe der operativen Temperatur für die beiden betrachteten Klassen der thermischen Qualität in Abhängigkeit von der Art der Beheizung.

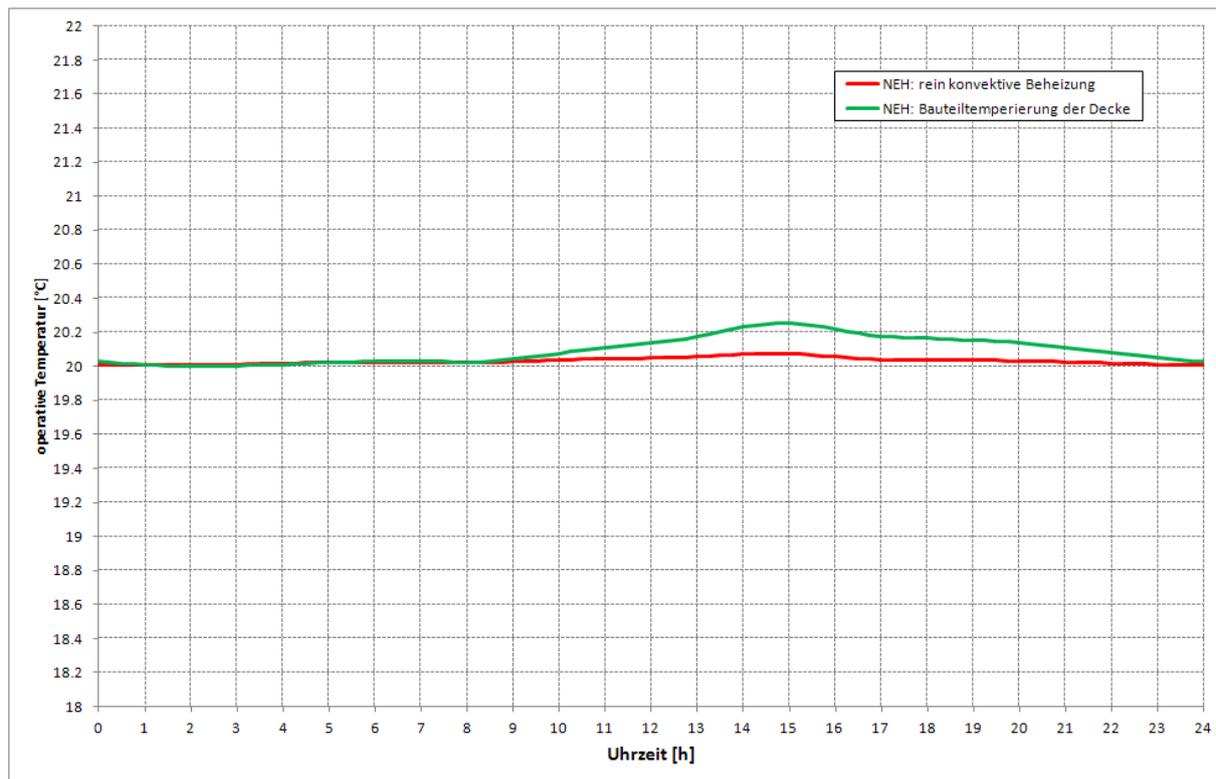


Abb. 5.17: Niedrigenergiehaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Beheizung nach Abb. 5.16; mittlerer Januar-Tag in Wien, Innere Stadt

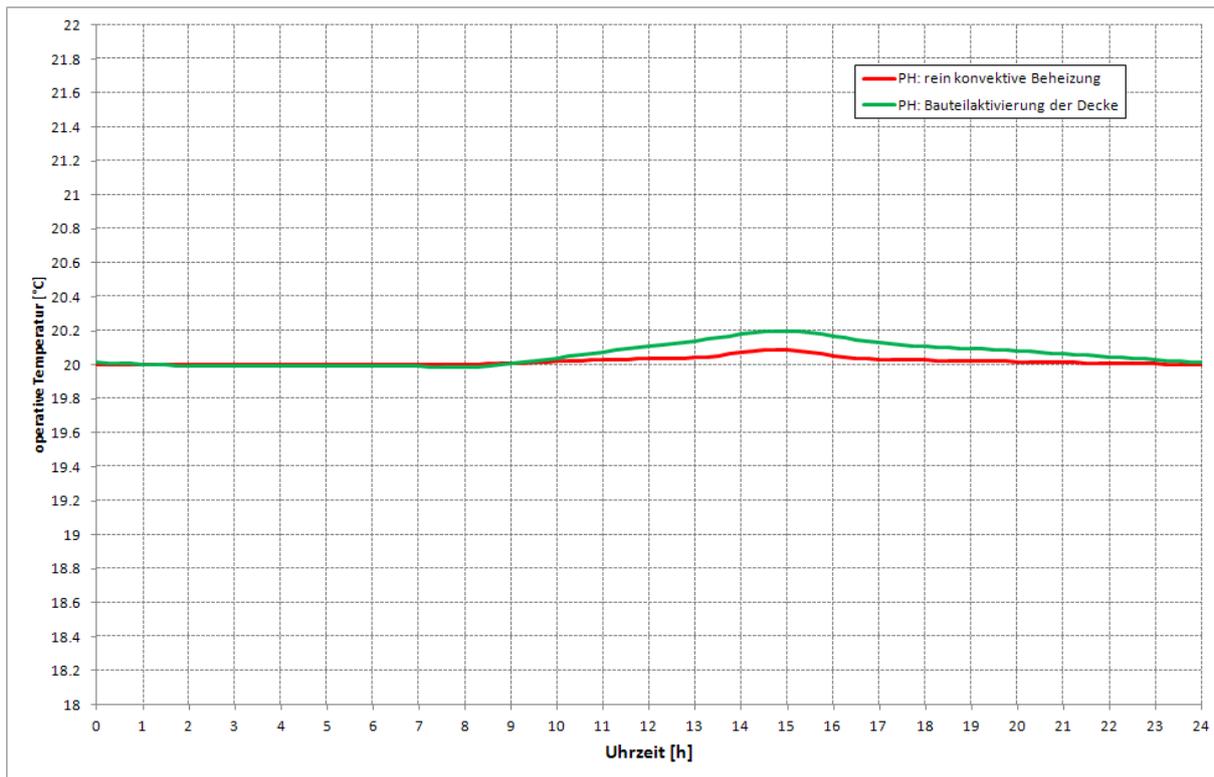


Abb. 5.18: Passivhaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Beheizung nach Abb. 5.16; mittlerer Januar-Tag in Wien, Innere Stadt

Ersichtlich liefert die thermisch aktivierte Decke untertags leicht höhere operative Temperaturen als eine rein konvektive Beheizung; der thermische Komfort im Raum ist damit bei Verwendung der Bauteilaktivierung etwas höher. Beachtenswert ist aber, dass die Tageschwankung der operativen Temperatur in allen Fällen im Bereich von nur wenigen Zehntel Grad liegt. Dies ist insbesondere für die thermische Aktivierung der Decke überraschend, als in diesem Fall ja mit tageszeitlich konstanter Heizmitteltemperatur gerechnet wurde. Bewirkt wird dieses thermische Verhalten durch den ausgeprägten Selbstregelungseffekt der thermischen Bauteilaktivierung.

Der gesuchte Heizwärmebedarf für den Monat Januar ergibt sich aus dem in Tab. 5.18 gezeigten Heizwärmebedarf für den mittleren Januar-Tag mittels Multiplikation mit der Zahl der Tage im Januar, also 31. Die folgende Tabelle zeigt die errechneten Heizwärmebedarfs-Werte für den Monat Januar in Abhängigkeit von der Qualität der Gebäudehülle, der Art der Beheizung und dem Gebäudestandort.

	Niedrigenergiehaus		Passivhaus	
	rein konvektiv	Deckenaktivierung	rein konvektiv	Deckenaktivierung
Wien	228,5	226,0	56,0	54,6
Eisenstadt	253,8	251,2	64,9	64,5
Klagenfurt	308,6	305,6	85,1	84,8

Tab. 5.19: Heizwärmebedarf für den Januar in kWh in Abhängigkeit von der Qualität der Gebäudehülle, der Art der Beheizung und dem Gebäudestandort

Auch für die Standorte Eisenstadt und Klagenfurt bestätigt sich der Trend, wonach für die Bauteilaktivierung ein geringfügig kleinerer Heizwärmebedarf benötigt wird als im Fall rein kon-

vektiver Beheizung des Modellraums. Die Unterschiede liegen im Bereich um 1% und sind damit nahezu vernachlässigbar.

Es zeigt sich, dass der Schritt vom Niedrigenergiehaus zum Passivhaus den Heizwärmebedarf im Tiefwinter stark reduziert. Für die Gebäudehülle in Passivhausqualität ist der Heizwärmebedarf nur ca. $\frac{1}{4}$ von jenem eines Niedrigenergiehauses. Die Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs vom Gebäudestandort ist zwar ebenso klar zu sehen, bleibt jedoch weit weniger ausgeprägt als die Abhängigkeit von der thermischen Qualität des Gebäudes.

Conclusio:

Die für den Januar durchgeführten Heizwärmebedarfsberechnungen führen auf folgende Ergebnisse:

- Im Vergleich zu einer rein konvektiven Beheizung des Raums ergeben sich im Fall einer Beheizung durch thermische Aktivierung von 70% der Deckenfläche geringfügig niedrigere Wärmebedarfs-Werte. Dieser Effekt steigt mit Erhöhung der thermischen Qualität der Gebäudehülle an, bleibt jedoch in Bereichen, die fast vernachlässigbar sind.
- Im Fall der Bauteilaktivierung ergeben sich etwas höhere operative Temperaturen im Raum, was im Vergleich zur konvektiven Beheizung zu einem geringfügig höheren thermischen Komfort führt.
- Auch bei tageszeitlich konstanter Heizmitteltemperatur schwankt im Fall der Bauteilaktivierung die operative Temperatur im Raum nur um wenige Zehntel Grad. Das System der thermisch aktivierten Decke erweist sich somit als sehr gut selbst regelnd.

V.3.3 Berechnung des sensiblen Kühlbedarfs

Der sensible Kühlbedarf wird in Abhängigkeit von der Art der Beheizung des Modellraums für den Monat mit den höchsten Temperaturen berechnet werden. Gemäß Abb. 5.14 ist dies für alle drei Standorte der Juli. Die folgende Tabelle zeigt die zur Beschreibung der langjährigen außerklimatischen Verhältnisse verwendeten Parameter.

	Temperatur [°C]		Strahlungsfaktoren [-]	
	Mittelwert	Amplitude	Linke	Reitz
Wien-Innere Stadt	22,07	7,05	11,012	0,3355
Eisenstadt	20,77	7,05	10,342	0,3442
Klagenfurt	19,86	7,05	11,098	0,3332

Tab. 5.20: Parameter zur Beschreibung der außerklimatischen Verhältnisse im Juli für die ausgewählten Landeshauptstädte

Aufgrund der Ergebnisse von Abschnitt V.2.3 wird die sensible Kühllast für den Monat Juli unter der Annahme errechnet, dass Außenjalousien vor den westorientierten Fenstertüren ganztägig herabgelassen bleiben. Die Annahmen bezüglich der Raumnutzung werden von der Kühllastberechnung ungeändert übernommen – siehe Abschnitt V.2.3.

Gesucht wird jeweils jener Tagesverlauf der Kühlleistung, der ein Überschreiten der Obergrenze von 27 °C für die operative Temperatur verhindert.

Bei den Varianten für rein konvektive Kühlung wurde als Solltemperatur die Lufttemperatur des Raums derart angesetzt, dass ein Überschreiten der Obergrenze von 27 °C für die operative Temperatur verhindert wird. Die Regelung wird hierbei hypothetisch als ideal angenommen.

Dem gegenüber wurde bei der Aktivierung der Decke eine tageszeitlich konstante Kühlmitteltemperatur angesetzt, die Kühlung somit unregelmäßig angenommen.

In folgender Abbildung sind die Tagesverläufe der benötigten sensiblen Kühlleistung bei rein konvektiver Kühlung des Raums jenen Tagesverläufen gegenübergestellt, die sich bei Aktivierung von 70% der Deckenfläche ($A = 24,5 \text{ m}^2$) ergeben. Es wurde hierbei mit 5 cm Betonüberdeckung, Rohren der Dimension $17 \times 2,0$ und einem Rohrabstand von 20 cm gerechnet. Als Gebäudestandort wird vorerst Wien, Innere Stadt festgelegt.

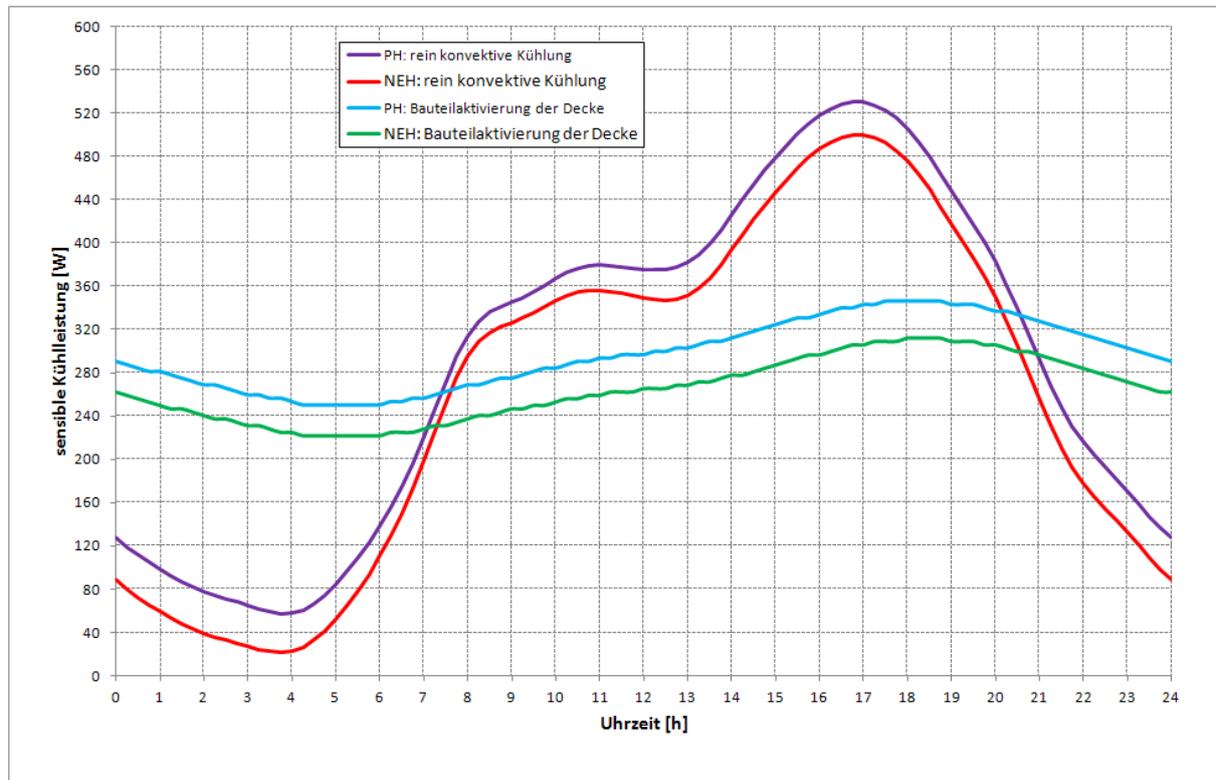


Abb. 5.19: Tagesgänge der erforderlichen sensiblen Kühlleistungen für den mittleren Juli-Tag am Standort Wien, Innere Stadt

Abb. 5.19 zeigt ausgeprägte Unterschiede im Tagesverlauf der vom Raum aufgenommenen sensiblen Kühlleistungen. In erster Linie interessiert hier jedoch der sensible Kühlbedarf, also die während des Tages dem Raum entzogene Wärmemenge. Diese ergibt sich durch Integration der errechneten Kühlleistungsgänge und ist in Abb. 5.19 als Fläche unter der jeweiligen Kurve zu sehen. In folgender Tabelle sind die errechneten Kühlbedarfs-Werte für den mittleren Juli-Tag am Standort Wien gegenübergestellt.

Niedrigenergiehaus		Passivhaus	
rein konvektiv	Deckenaktivierung	rein konvektiv	Deckenaktivierung
6,22	6,36	6,96	7,12

Tab. 5.21: Kühlbedarf in kWh für den mittleren Juli-Tag in Wien, Innere Stadt, in Abhängigkeit von der Qualität der Gebäudehülle und der Art der Beheizung

Der sensible Kühlbedarf im Fall der thermischen Aktivierung der Decke liegt geringfügig über jenem für rein konvektive Kühlung. Der prozentuelle Unterschied liegt in der Größenordnung von ca. 2% und ist damit nicht von Relevanz. Beim Niedrigenergiestandard liegt der Kühlbedarf für den Monat Juli knapp unter dem für den Januar ermittelten Heizwärmebedarf – siehe die

Tab. 5.18. Zu beachten ist, dass der für Juli errechnete Kühlbedarf im Fall des Passivhauses ca. 4 Mal so groß ist wie der für Januar berechnete Heizwärmebedarf.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Kühlleistungsverläufe, deren Tagesmittelwerte aber annähernd konstant sind, drängt sich die Frage nach den sich im Raum einstellenden Tagesverläufen der operativen Temperatur auf. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die errechneten Tagesverläufe der operativen Temperatur für die beiden betrachteten Klassen der thermischen Qualität in Abhängigkeit von der Art der Kühlung.

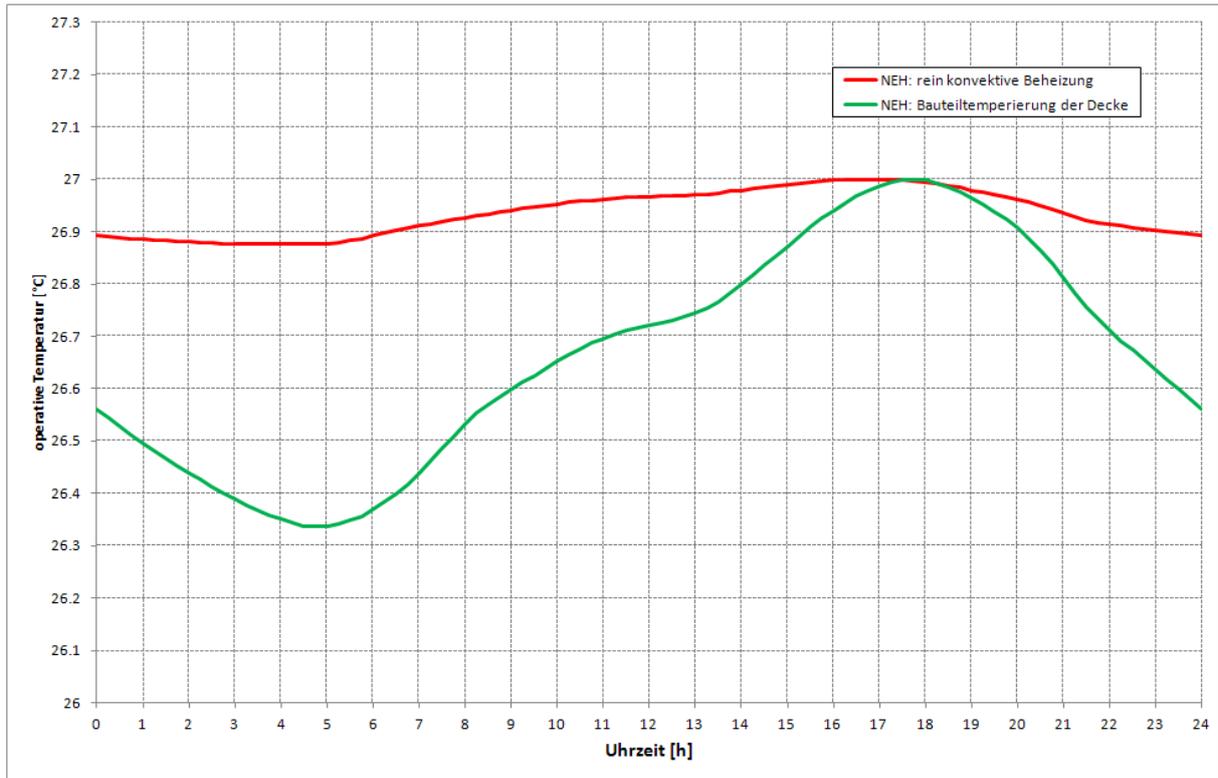


Abb. 5.20: Niedrigenergiehaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Kühlung nach Abb. 5.19; mittlerer Juli-Tag in Wien, Innere Stadt

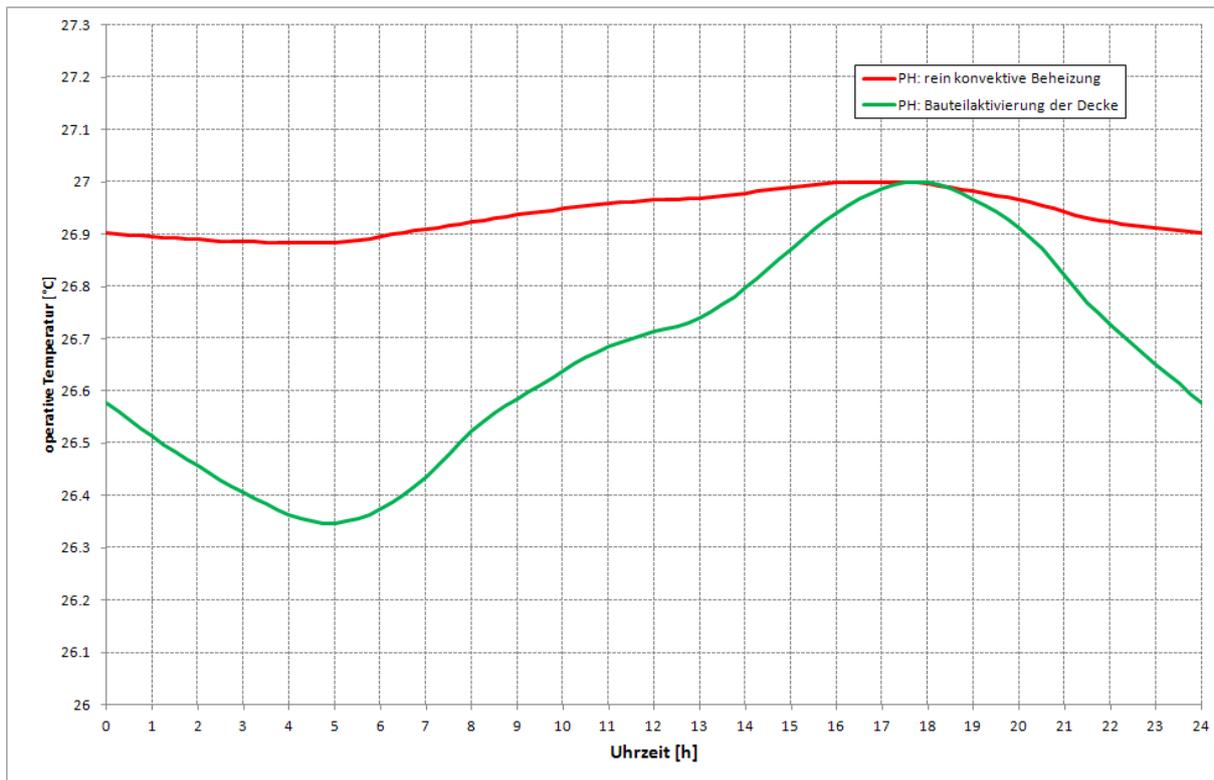


Abb. 5.21: Passivhaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Kühlung nach Abb. 5.19; mittlerer Juli-Tag in Wien, Innere Stadt

Die Tagesschwankung der operativen Temperatur ist im Fall der thermisch aktivierten Decke weit größer als bei rein konvektiver Kühlung. Dies bewirkt, dass der thermische Komfort in der Nacht bei Verwendung der Bauteilaktivierung aufgrund der niedrigeren Temperaturen spürbar höher ist als bei konvektiver Kühlung. Beachtenswert ist, dass die Tagesschwankung der operativen Temperatur im Fall der aktivierten Decke unter 0,7 K bleibt, obwohl angenommen wurde, dass die Kühlmitteltemperatur tageszeitlich konstant ist. Dies zeigt, dass der ausgezeichnete Selbstregelungseffekt der thermischen Bauteilaktivierung auch im Fall der Kühlung vorliegt.

Der gesuchte Kühlbedarf für den Monat Juli ergibt sich aus dem in Tab. 5.21 gezeigten Kühlbedarf für den mittleren Juli-Tag mittels Multiplikation mit der Zahl der Tage im Juli, also 31. Die folgende Tabelle zeigt die errechneten Kühlbedarfs-Werte für den Monat Juli in Abhängigkeit von der Qualität der Gebäudehülle, der Art der Kühlung und dem Gebäudestandort.

	Niedrigenergiehaus		Passivhaus	
	rein konvektiv	Deckenaktivierung	rein konvektiv	Deckenaktivierung
Wien	192,7	197,1	215,8	220,8
Eisenstadt	172,1	176,8	197,4	202,1
Klagenfurt	154,5	159,7	181,0	186,4

Tab. 5.22: Kühlbedarf für den Juli in kWh in Abhängigkeit von der Qualität der Gebäudehülle, der Art der Beheizung und dem Gebäudestandort

Auch für die Standorte Eisenstadt und Klagenfurt bestätigt sich der Trend, wonach für die Bauteilaktivierung ein geringfügig höherer sensibler Kühlbedarf benötigt wird als im Fall rein konvektiver Kühlung. Die Unterschiede liegen im Bereich von ca. 2% bis 3% und sind damit na-

hezu vernachlässigbar. Natürlich muss bei diesem Vergleich beachtet werden, dass die operative Temperatur im Raum im Fall der Bauteilaktivierung im Schnitt deutlich niedriger liegt als bei der konvektiven Kühlung.

Es zeigt sich, dass der Kühlbedarf für den Passivhausstandard für alle untersuchten Standorte ca. 10% höher liegt, als jener für den Niedrigenergie-Standard. Wie schon bei der Kühllastberechnung angemerkt, ist dieser Umstand in der höheren Strahlungsdurchlässigkeit der für die Berechnung angenommenen Passivhaus-Gläser begründet. Die Standortabhängigkeit ist für den Kühlbedarf ersichtlich höher als die Abhängigkeit von der thermischen Qualität der Gebäudehülle.

Conclusio:

Die für den Juli durchgeführten Kühlbedarfsberechnungen führen auf folgende Ergebnisse:

- Im Vergleich zu einer rein konvektiven Kühlung des Raums ergeben sich im Fall einer Kühlung mittels thermischer Aktivierung von 70% der Deckenfläche geringfügig höhere Kühlbedarfs-Werte. Dieser Mehrbedarf bewegt sich jedoch in Bereichen, die fast vernachlässigbar sind.
- Im Fall der Bauteilaktivierung ergeben sich vor allem während der Nacht deutlich niedrigere operative Temperaturen im Raum, was im Vergleich zur konvektiven Kühlung zu einem höheren thermischen Komfort führt.
- Auch bei tageszeitlich konstanter Kühlmitteltemperatur schwankt im Fall der Bauteilaktivierung die operative Temperatur im Raum im Tagesverlauf nur um weniger als 7 Zehntel Grad. Das System der thermisch aktivierten Decke erweist sich somit auch im Fall der Kühlung als sehr gut selbst regelnd.

V.4 Energiespeicherung mittels thermischer Bauteilaktivierung

Das Potential der Wärmespeicherung in einer thermisch aktivierten Decke wurde bereits in Abschnitt IV.1.3 beleuchtet. Im Zuge dieser bauteilbezogenen Untersuchungen musste allerdings die Temperatur im unter der Decke liegenden, zu konditionierenden Raum vorgegeben werden. Hier soll nun die Thematik insofern erweitert werden, als das thermische Verhalten eines mit einer thermisch aktivierten Decke konditionierten Raums nach einer Unterbindung der Zufuhr des Heiz- bzw. Kühlmittels, d. h. nach einer endgültigen Abschaltung der Umwälzpumpe interessiert. Diese Fragestellung ist insofern von großer Relevanz als erneuerbare Energien u. a. dadurch gekennzeichnet sind, dass das Angebot starken zeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Mit den folgenden Simulationsrechnungen soll untersucht werden, wie lange eine Heizungs- oder Kühlungsunterbrechung dauern darf, ohne dass der thermische Komfort im Raum leidet.

Den Berechnungen wird die Geometrie des in Abschnitt V.1 definierten Modellraums zugrunde gelegt. Die Gebäudehülle soll dem Passivhaus-Standard entsprechen.

V.4.1 Annahmen zur Gebäudehülle

Um mit dem Modellraum eine besonders kritische Situation abzubilden, wird – anders als in Abschnitt V.1 – angenommen, dass der Raum sich im obersten Geschoß befindet und damit in der Gebäudeecke situiert ist. Die Gebäudehülle besteht somit aus der Außenwand, dem Fenster, den Fenstertüren und einem Flachdach.

Die Außenwand wird passivhaustauglich angenommen und deren Schichtaufbau von Tab. 5. 5 übernommen. Auch für die Eigenschaften der Fenster und der Fenstertür wird – analog zu dem in Abschnitt V.1.2.3 Gesagten – angenommen, dass diese dem Passivhausstandard entsprechen. In die Passivhausrahmen (mit $U_F = 0,80 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) sind 3-fach-Wärmeschutzgläser (mit $U_G = 0,70 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) eingebaut, die einen hohen Gesamtenergiedurchlassgrad ($g = 0,60$) aufweisen.

Die Decke des Raums grenzt direkt nach außen und ist hoch gedämmt. Die folgende Tabelle zeigt den angenommenen Schichtaufbau des Flachdachs.

	d [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	c [$\text{kJkg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
oben				
Rundkies	0,0600			
Filterflies	0,0020			
Dachabdichtung	0,0100	0,170	1200	1,26
EPS Dämmplatte	0,3200	0,036	25	1,40
Dampfspernbahn	0,0040			
Stahlbetondecke	0,2500	2,200	2400	1,00
unten				

Tab. 5.23: Aufbau der obersten Decke (Flachdach); $U_{OD} = 0,11 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

V.4.2 Annahmen zur Raumnutzung

Es wird angenommen, dass es sich beim betrachteten Modellraum um einen Wohnraum handelt. Die durch die Personenbelegung und die Wärmeabgabe von Beleuchtung und Geräten verursachten Wärmemengen im Inneren des Modellraums werden gemäß ÖNorm B8110-5 (18) in Form einer nutzflächenbezogenen Wärmeleistung angesetzt. Für Passivhäuser wird hierbei ein Tagesmittelwert von $2,1 \text{ Wm}^{-2}$ angegeben. Um der Nutzung als Wohnraum zu entsprechen, sollen die Innenwärmen nur in der Zeit zwischen 8^{00} und 20^{00} zum Tragen kommen. Unter diesen Annahmen sind somit in der Zeit von 8^{00} bis 20^{00} bei einer Nutzfläche von 35 m^2 147 W Wärmeabgabeleistung anzusetzen.

In Hinblick auf die Lüftungswärmeverluste wird zum einen gemäß PHPP (21) ein Infiltrationsluftwechsel mit einer Luftwechselzahl $0,12 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Diese Luftwechselzahl ist lt. PHPP anzusetzen, wenn beim Drucktest die Grenze von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ nicht überschritten wurde. Zum anderen wird der hygienisch erforderliche Luftwechsel gemäß PHPP mit einer Luftwechselzahl von $0,32 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Diese Frischluftzufuhr wird über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung bewerkstelligt. Der effektive Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage wird mit 80% angesetzt. Es wird hierbei angenommen, dass die Lüftungsanlage durchgehend in Betrieb ist.

V.4.3 Abkühlverhalten nach Beendigung der Heizmittelzufuhr

Im Folgenden wird mittels thermischer Simulation berechnet, wie lange der Modellraum im Winter ohne Heizmittelzufuhr behaglich bleibt. Natürlich muss zur Beantwortung dieser Frage eine Festlegung in Hinblick auf die im Raum akzeptierten operativen Temperaturen getroffen werden. Anders als gewohnt ist für den Raum also nicht eine „Solltemperatur“ festzulegen. An

deren Stelle tritt ein Band der akzeptierten operativen Temperaturen, dessen Lage und Breite mit den Bewohnern abgestimmt werden muss. Nur unter diesen Voraussetzungen kann das Potential der Wärmespeicherung in der thermisch aktivierten Decke ausgelotet werden.

V.4.3.1 Annahmen zum winterlichen Außenklima

In Hinblick auf die anzunehmenden außenklimatischen Bedingungen wird im Sinne eines „worst-case“-Szenarios das Wetter an einem Auslegungstag für die Heizlastberechnung gemäß Passivhaus Projektierungspaket V9.2 (21) angenommen. Als Gebäudestandort wird hierbei Wien, Innere Stadt, angesetzt. Obwohl die Fragestellung nach einem sich über mehrere Tage ziehenden Abkühlungsvorgangs nicht mit dem bisher angewandten periodisch eingeschwungenen Ansatz zu beantworten ist, soll das Außenklima dennoch periodisch mit einer Periodenlänge von einem Tag angesetzt werden. Damit wird angenommen, dass sich der „Auslegungstag“ unendlich oft wiederholt. Dieser Ansatz liegt einerseits insofern „auf der sicheren Seite“ als eine sehr lang andauernde Kälteperiode mit dem Auslegungstag entsprechenden Witterungsbedingungen äußerst unwahrscheinlich ist. Andererseits erleichtert der periodisch eingeschwungene Ansatz für die außenklimatischen Bedingungen die Interpretation der Berechnungsergebnisse erheblich.

V.4.3.1.1 Außenlufttemperatur

Gemäß PHPP (21) ist für die Heizlastberechnung als Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur ein Wert von $-8,0\text{ °C}$ anzusetzen, wenn es sich um einen kalten, klaren Tag handelt. Dieser Fall soll den Auskühlungsberechnungen zugrunde gelegt werden. Passend zu einem klaren Wintertag wird diesem Tagesmittelwert eine Tagesschwankung von $\pm 6,0\text{ K}$ überlagert. Die folgende Abbildung zeigt den der Simulation zugrunde gelegten Tagesgang der Außenlufttemperatur.

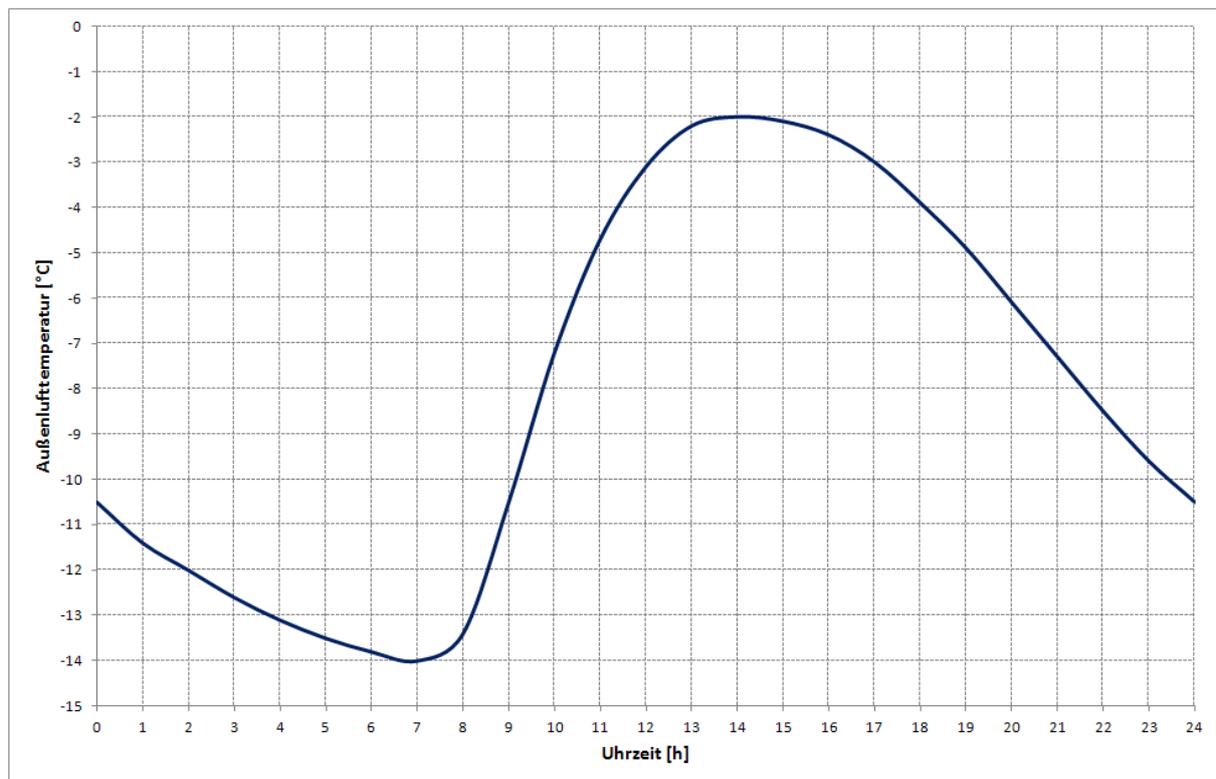


Abb. 5.22: Winterfall: Den Simulationen zugrunde gelegter Tagesverlauf der Außenlufttemperatur

Bezüglich der Außenlufttemperatur handelt es sich somit um eine Folge von „Eistagen“, d. h. von Tagen, an denen die Außenlufttemperatur ganztags unterhalb des Gefrierpunkts liegt.

V.4.3.1.2 Sonneneinstrahlung

In Hinblick auf die Sonneneinstrahlung sind im PHPP (21) Tagesmittelwerte der solaren Bestrahlungsstärken auf die vier Haupthimmelsrichtungen und die horizontale Fläche vorgegeben. Für den Modellraum spielen nur die Bestrahlungsstärken auf die West- und die Nordfassade, sowie auf das Flachdach eine Rolle. Die solare Einstrahlung kann in einer für bauphysikalische Zwecke ausreichenden Genauigkeit mit Hilfe des Linke'schen Trübungs-faktors, des Reitz'schen Diffusstrahlungsfaktors und des Albedo-Werts berechnet werden, sofern das Datum und die Position des Standorts bekannt sind. Der Linke'sche Trübungs-faktor und der Reitz'sche Diffusstrahlungsfaktor wurden mittels Verwendung von Programmpaket GEBA (11) für die Simulationsläufe derart angesetzt, dass die vom PHPP vorgegebenen Bestrahlungsstärken möglichst gut approximiert werden. Das Ergebnis dieser Anpassung zeigt folgende Tabelle.

	Tagesmittelwert [Wm^{-2}]	
	PHPP	GEBA
Westfassade	25	25,0
Nordfassade	20	20,0
horizontale Fläche /Flachdach	40	41,6

Tab. 5.24: Tagesmittelwerte der solaren Bestrahlungsstärken

Mit einem Linke'schen Trübungs-faktor von 9,0, einem Reitz'schen Diffusstrahlungsfaktor von 0,297 und einem normgemäß angesetzten Albedo-Wert von 0,2 lassen sich die von PHPP vorgegebenen solaren Bestrahlungsstärken auf die West- und die Nordfassade genau approximieren, wenn als Datum für die Berechnung der Sonnenbahn der 15. Januar angesetzt wird.

Dass mit diesem Ansatz die Bestrahlungsstärke auf die horizontale Ebene etwas zu hoch ausfällt, spielt aufgrund der sehr hoch gedämmten Dachkonstruktion keine Rolle. Die folgende Abbildung zeigt die den Simulationen zugrunde gelegten Tagesverläufe der solaren Bestrahlungsstärken.

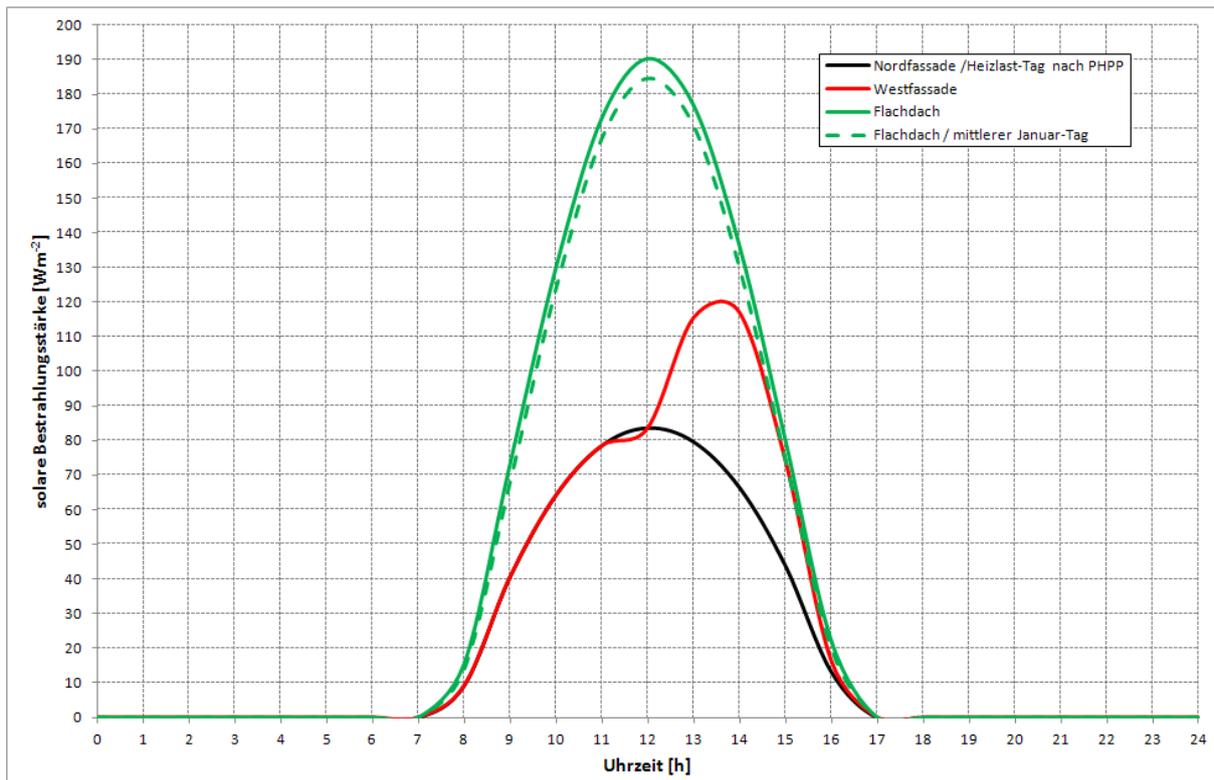


Abb. 5.23: Winterfall: Den Simulationen zugrunde gelegte solare Bestrahlungsstärken

Der Vergleich mit den mittleren klimatischen Verhältnissen (strichlierte, grüne Linie in Abb. 5.23) zeigt, dass der gemäß PHPP „klare“ Tag nur geringfügig höhere Bestrahlungsstärken aufweist als ein am Gebäudestandort Wien, Innere Stadt, auftretender Januar Tag, der dem langjährigen Mittel entspricht („mittlerer Tag“). Es stellt sich somit heraus, dass die durch PHPP für einen klaren Tag vorgegebenen solaren Bestrahlungsstärken eher niedrig angesetzt sind und damit „auf der sicheren Seite“ liegen.

V.4.3.2 Simulationsergebnisse

Die Auskühlung des Modellraums nach Abschaltung der Heizanlage wird für folgende Varianten mittels thermischer Simulation unter Verwendung von Programmpaket INTEMP (22) errechnet:

Variante	Kurzbeschreibung
1	rein konvektive Beheizung des Raums; Ausgangstemperatur: 23 °C
2	Beheizung mittels thermisch aktivierter Decke; Ausgangstemperatur: 23 °C
3	rein konvektive Beheizung des Raums; Ausgangstemperatur: 24 °C
4	Beheizung mittels thermisch aktivierter Decke; Ausgangstemperatur: 24 °C
5	rein konvektive Beheizung des Raums; Ausgangstemperatur: 25 °C
6	Beheizung mittels thermisch aktivierter Decke; Ausgangstemperatur: 25 °C

Tab. 5.25: Winterfall: Liste der Berechnungsvarianten

Bei den Varianten 2, 4 und 6 wird davon ausgegangen, dass nur 70% der Deckenfläche – das sind 24,5 m² – aktiviert sind, sodass die übrige Deckenfläche z. B. für Zwecke zur Verbesserung der Raumakustik zur Verfügung steht.

Bei den im Folgenden gezeigten Berechnungsvarianten wird davon ausgegangen, dass in Absprache mit dem Raumnutzer ein Intervall für die im Tiefwinter im Raum akzeptierte operative Temperatur festgelegt wurde. Dieses Band wird grundsätzlich mit einer Untergrenze von 22,0 °C angesetzt. Die Obergrenze des Temperaturbands wird in Schritten von 1,0 K variiert, um den Einfluss der Breite des Temperaturbandes auf die Auskühldauer quantifizieren zu können.

Wird nun angenommen, dass im Raum vor Abschaltung der Heizanlage eine operative Temperatur von z. B. 23,0 °C vorherrscht, so interessiert in erster Linie die Dauer zwischen dem Abschaltzeitpunkt und dem Erreichen einer operativen Raumtemperatur von 22 °C. Diese Dauer entspricht jenem Zeitintervall, in dem bei Aufrechterhaltung akzeptabler innenklimatischer Bedingungen kein Nachheizbedarf besteht.

Der Vergleich zwischen einer rein konvektiven Beheizung des Raums und der Beheizung mittels thermischer Aktivierung der Decke ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn die Ausgangslage vor Abschaltung der Heizung als gleich eingestuft werden kann. Im Zuge der Simulation wird dies dadurch erreicht, dass die Heizungsregelung derart angesetzt wird, dass der Tagesmittelwert der operativen Temperatur jeweils gleich ist und der Obergrenze des Temperaturbands entspricht. Wie aus Abb. 5.24 bis Abb. 5.26 ersichtlich, wird dieser Tagesmittelwert beim beheizten Raum im Tagesverlauf geringfügig über- und unterschritten. Die durch Sonneneinstrahlung und nutzungsbedingten Innenwärmen verursachten Tagesschwankungen der operativen Temperatur unterscheiden sich bei konvektiver Beheizung und thermische Aktivierung der Decke nur marginal, sodass die Ausgangslage vor Abschaltung der Heizung als gleichwertig angesehen werden kann.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Zeitverläufe der operativen Temperatur im Musterraum vor und während der Abkühlphase für eine Ausgangstemperatur von 23 °C (Varianten 1 und 2). Die Heizung wird hierbei zu Mitternacht, also zur Stunde 0, abgeschaltet (siehe Markierung in Abb. 5.24).

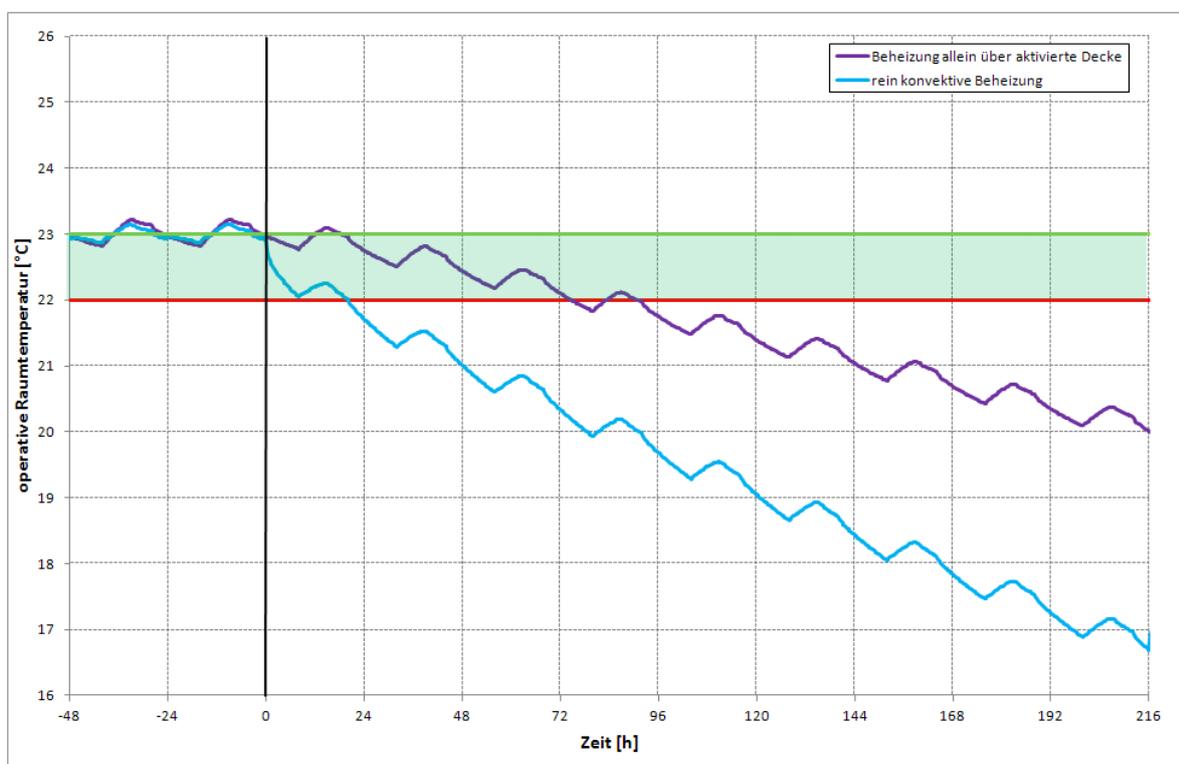


Abb. 5.24: Auskühlverhalten des Raums bei einer zugelassenen **Bandbreite der operativen Temperatur von 1,0 K**; Untergrenze der Soll-Temperatur: 22,0 °C

Die sägezahnartigen Zeitverläufe von Abb. 5.24 rühren daher, dass die Abkühlung vorwiegend in der Nacht erfolgt. Unter Tags stellt sich hingegen aufgrund der solaren und der nutzungsbedingten Innenwärmen eine leichte Erwärmung ein.

Es fällt auf, dass die Auskühlung des Raums im Falle der Beheizung durch die thermisch aktivierte Decke sehr viel langsamer erfolgt als bei einer rein konvektiven Beheizung. Grund für diesen sehr stark ausgeprägten Effekt ist die in der Decke gespeicherte Wärmemenge, die nach Abschaltung der Umwälzpumpe nach und nach an den Raum abgegeben wird.

Bei rein konvektiver Beheizung geben die raumbegrenzenden Bauteile in der Abkühlphase zwar auch ihren Wärmeinhalt an den Raum ab. Die in den Bauteilen gespeicherte und an den Raum abgegebene Wärmemenge kann in diesem Fall eine Abkühlung des Raums unter 22 °C nur 20 Stunden lang verhindern. Durch die höher temperierte Decke wird im Fall der thermischen Aktivierung 22 °C erst nach 75 Stunden, also etwas über drei Tagen, unterschritten.

In den folgenden beiden Abbildungen ist das Abkühlverhalten des Modellraums für eine Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur von 2,0 K (Varianten 3 und 4) und 3,0 K (Varianten 5 und 6) dargestellt.

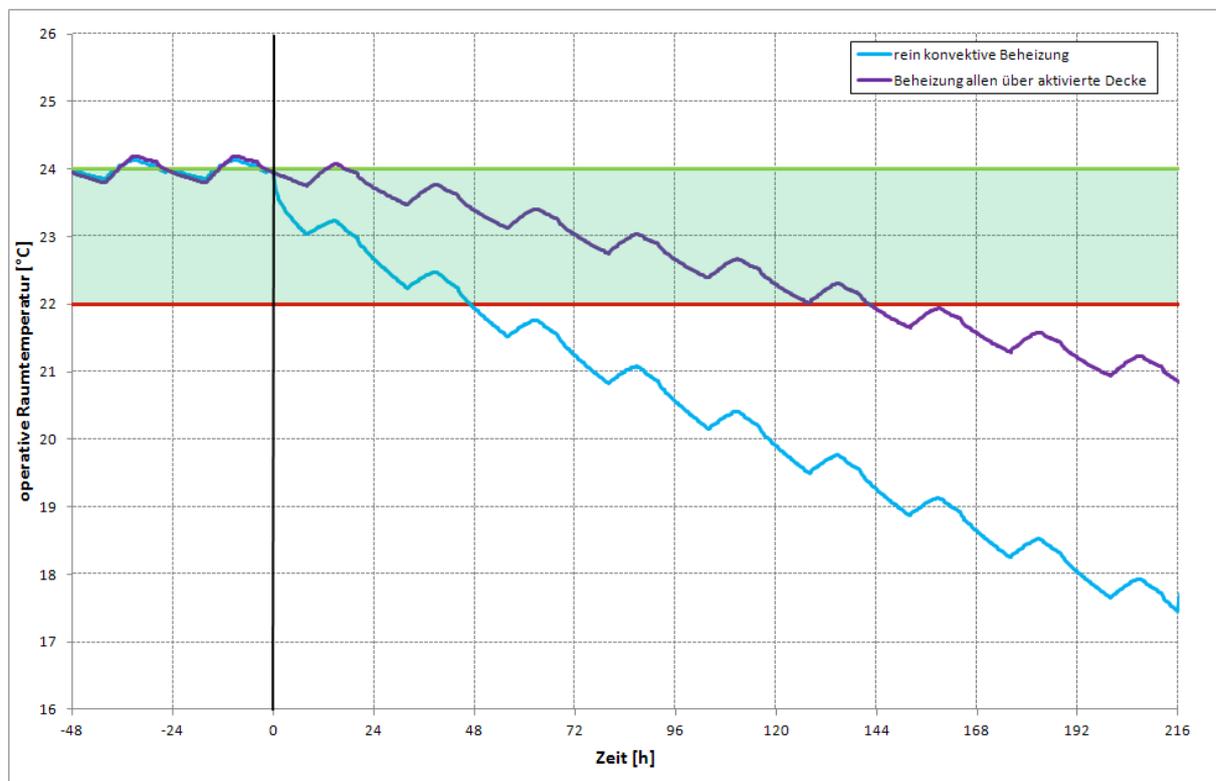


Abb. 5.25: Auskühlverhalten des Raums bei einer zugelassenen **Bandbreite der operativen Temperatur von 2,0 K**; Untergrenze der Soll-Temperatur: 22,0 °C

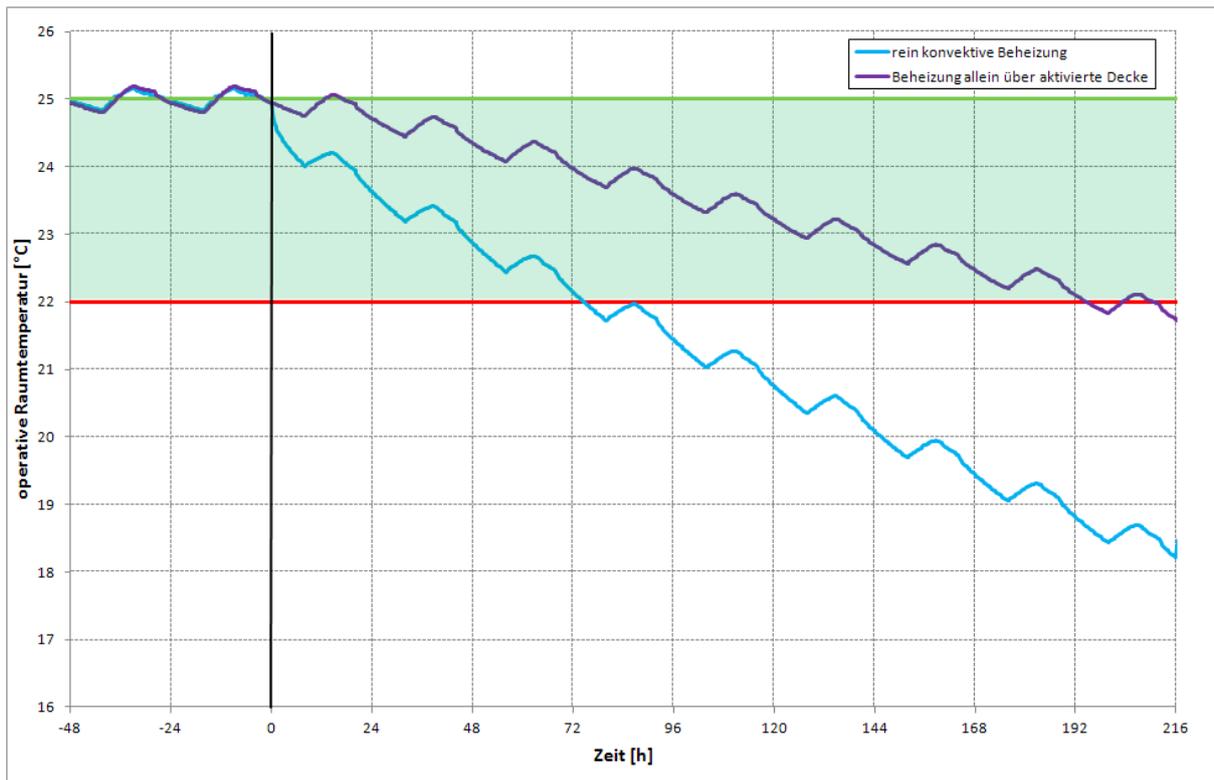


Abb. 5.26: Auskühlverhalten des Raums bei einer zugelassenen **Bandbreite der operativen Temperatur von 3,0 K**; Untergrenze der Soll-Temperatur: 22,0 °C

Qualitativ bleibt die Aussage in Hinblick auf das stark unterschiedliche Auskühlverhalten bei konvektiver Beheizung auf der einen Seite und Bauteilaktivierung der Decke auf der anderen Seite auch bei größeren Bandbreiten der im Raum akzeptierten operativen Temperatur erhalten. Die Bauteilaktivierung bremst die Auskühlung des Raums ganz erheblich.

Quantitativ zeigt sich, dass eine Erhöhung der Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur von 1,0 K auf 2,0 K die Dauer bis zur Unterschreitung der Untergrenze der operativen Temperatur von 22 °C in etwa verdoppelt. Bei einer weiteren Erhöhung dieser Bandbreite auf 3,0 K erhöht sich die Dauer der Zeit ohne Nachheizbedarf nochmals erheblich. In folgender Tabelle sind die Zeitintervalle zwischen der Heizungsabschaltung und dem Erreichen der Untergrenze der operativen Temperatur – und damit die Zeiten ohne Nachheizbedarf – in Abhängigkeit von der Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur und der Art der Beheizung angegeben.

Bandbreite [K]	Luftheizung	Bauteilaktivierung
1,0	20 h	75 h
2,0	47 h	142 h
3,0	75 h	195 h

Tab. 5.26: Zeiträume ohne Nachheizbedarf in Stunden

Generell lässt sich sagen, dass die Erhöhung der Breite des vom Nutzer akzeptierten Bandes der operativen Temperatur die Zeiten ohne Nachheizbedarf stark vergrößern. Bei rein konvektiver Beheizung steigt diese Zeitspanne von knapp einem Tag bei 1,0 K Bandbreite auf etwas über 3 Tage bei 3,0 K Bandbreite an. Wird der Raum ausschließlich mittels thermischer Aktivierung der Decke beheizt, so ergibt sich die Zeitspanne ohne Nachheizbedarf von ca. 3 Tagen

bereits bei einer Bandbreite von 1,0 K. Bei 3,0 K Bandbreite liegt die Zeitspanne ohne Nachheizbedarf mit 195 h bereits bei über 8 Tagen.

Conclusio:

Die mittels thermischer Simulation eines Modellraums durchgeführten Untersuchungen zum Auskühlverhalten eines Raums in einem Passivhaus führen auf folgende Ergebnisse.

- Die Ausnutzung der in den raumbegrenzenden Bauteilen gespeicherten Wärmemengen zur Verhinderung einer raschen Auskühlung des Raums im Fall der Abschaltung der Heizung während einer tiefwinterlichen Kälteperiode wird erst dann möglich, wenn ein Temperaturband, innerhalb dessen sich die operativen Temperaturen im Raum bewegen dürfen, festgelegt wurde. Diese Festlegung hat natürlich in Abstimmung mit den Bewohnern zu erfolgen.
- Die Breite des Temperaturbandes beeinflusst den Zeitraum zwischen der Abschaltung der Heizung und dem Erreichen der Untergrenze der operativen Temperatur erheblich. Diese Zeitspanne stellt den Zeitraum ohne Nachheizbedarf dar und ist für die Frage der Nutzbarkeit von Erneuerbaren Energien von wesentlicher Bedeutung.
- Der Vergleich zwischen einer rein konvektiven Beheizung des Raums und einer Beheizung ausschließlich über die thermische Aktivierung von 70% der Deckenfläche zeigt, dass der Zeitraum ohne Nachheizbedarf im Fall der thermischen Bauteilaktivierung erheblich länger ist als bei konvektiver Beheizung. Wie stark dieser Unterschied ausgeprägt ist, hängt von der angesetzten Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur ab. Grob gesagt verlängert sich bei thermischer Aktivierung der Decke der Zeitraum ohne Nachheizbedarf im Vergleich zu einer konvektiven Beheizung um einen Faktor in der Größenordnung von drei.
- Bei thermischer Bauteilaktivierung von 70% der Deckenfläche liegt der Zeitraum ohne Nachheizbedarf zwischen ca. 3 Tagen bei einer Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur von 1,0 K und ca. 8 Tagen bei einer Bandbreite von 3,0 K.

Bei der Interpretation dieser Untersuchungsergebnisse ist zu beachten, dass in diese eine Fülle von Annahmen zu Geometrie, Orientierung und Aufbau des Modellraums, zu dessen Raumnutzung sowie zu den außenklimatischen Bedingungen eingegangen sind. Da beim Ansetzen dieser Annahmen jeweils versucht wurde, ein „worst case“ Szenario zu schaffen, können die errechneten Zeitdauern ohne Nachheizbedarf als Näherungswerte für die Untergrenze dieser Zeitspannen für einen Gebäudestandort in Wien dienen.

V.4.4 Aufheizverhalten nach Beendigung der Kühlmittelzufuhr

Hier wird nun die zu Abschnitt V.4.3 analoge Fragestellung für den Fall sommerlicher Kühlung behandelt. Untersucht wird somit das thermische Verhalten des zu konditionierenden Raums nach einer endgültigen Beendigung der Kühlmittelzufuhr d. h. nach einer Abschaltung der Umwälzpumpe. Die Festlegung der außenklimatischen Randbedingungen ist hierbei insofern leichter, als normative Vorgaben vorliegen.

V.4.4.1 Annahmen zum sommerlichen Außenklima

In Hinblick auf die anzunehmenden außenklimatischen Bedingungen wird der „Norm-Sommertag“ nach ÖNorm B8110-3:2012 (12) für den Gebäudestandort Wien, Innere Stadt, angenommen. Natürlich wird auch hier der Norm-Sommertag periodisch angesetzt, womit das

thermische Raumverhalten während einer sehr lange andauernden Hitzeperiode im Juli untersucht wird.

V.4.4.1.1 Außenlufttemperatur

Gemäß ÖNorm B8110-5 (18) ist der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort der Tabelle NAT-T13.XLS (13) zu entnehmen. Für Wien, Innere Stadt, hat dieser bei einer Seehöhe von 172 m einen Wert von 24,9 °C. Diesem Tagesmittelwert wird eine Tagesschwankung von $\pm 5,50$ K überlagert. Dieser Ansatz ist zwar nicht normgemäß (ÖNorm B8110-3: $\pm 7,00$ K), berücksichtigt aber den Umstand, dass die nächtliche Auskühlung im innerstädtischen Bereich während Hitzeperioden deutlich geringer ausfällt als außerhalb der Stadt. Die folgende Abbildung zeigt den Tagesverlauf der Außenlufttemperatur, der den folgenden Simulationsrechnungen zugrunde gelegt wird.

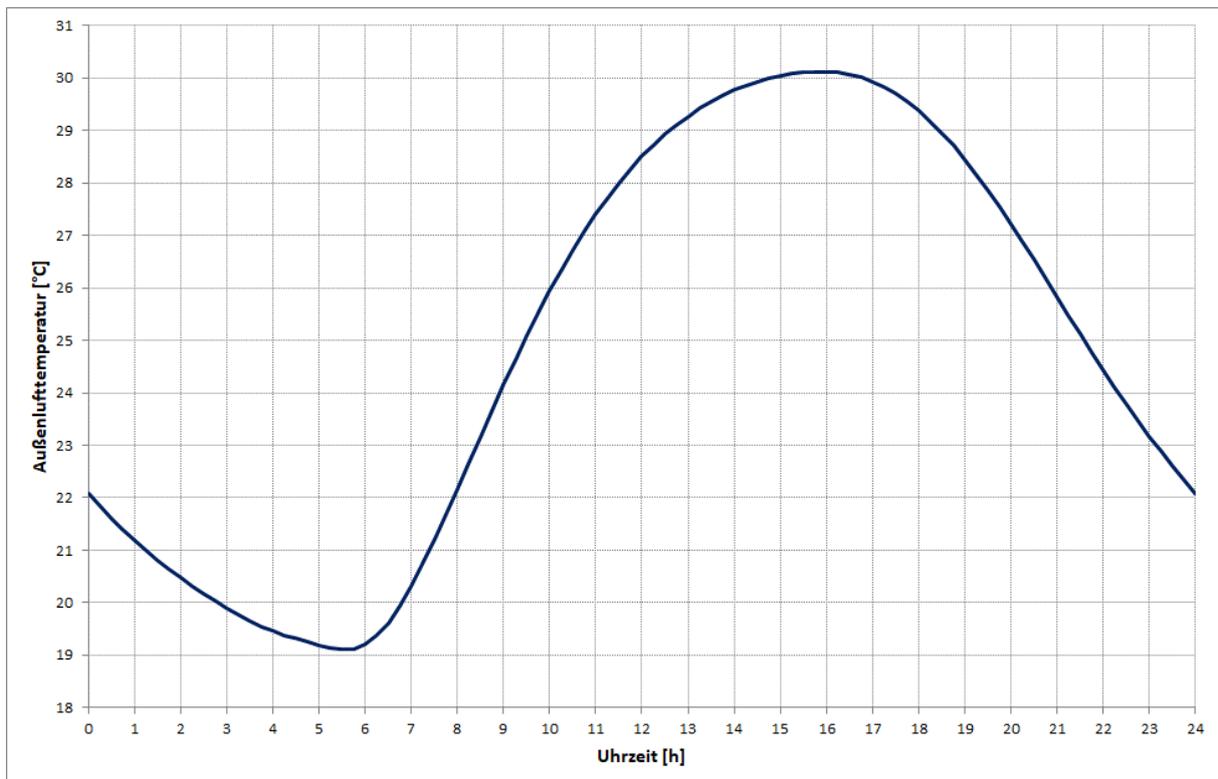


Abb. 5.27: Sommerfall: Den Simulationen zugrunde gelegter Tagesverlauf der Außenlufttemperatur

V.4.4.1.2 Sonneneinstrahlung

Auch die solare Einstrahlung ist in der ÖNorm B8110-3:2012 (12) insofern vorgegeben als der Linke'sche Trübungsfaktor mit 4,5, der Reitz'sche Diffusstrahlungsfaktor mit 0,333 und die Reflexionszahl der Umgebung (Albedo) mit 0,2 für den Norm-Sommertag anzunehmen ist. Diese Werte charakterisieren einen Strahlungstag, d. h. einen klaren, unbewölkten Tag im dicht verbauten Gebiet.

In die Berechnung der Bestrahlungsstärken geht zudem das Datum und der Standort ein. Das Datum ist normgemäß mit dem 15. Juli anzunehmen. Der Gebäudestandort ist mit $48^{\circ} 13'$ geografischer Breite und $16^{\circ} 23'$ geografischer Länge und einer Seehöhe von 172 m gegeben.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Tagesverläufe der Bestrahlungsstärken am Norm-Sommertag für die beiden Fassaden und das Flachdach.

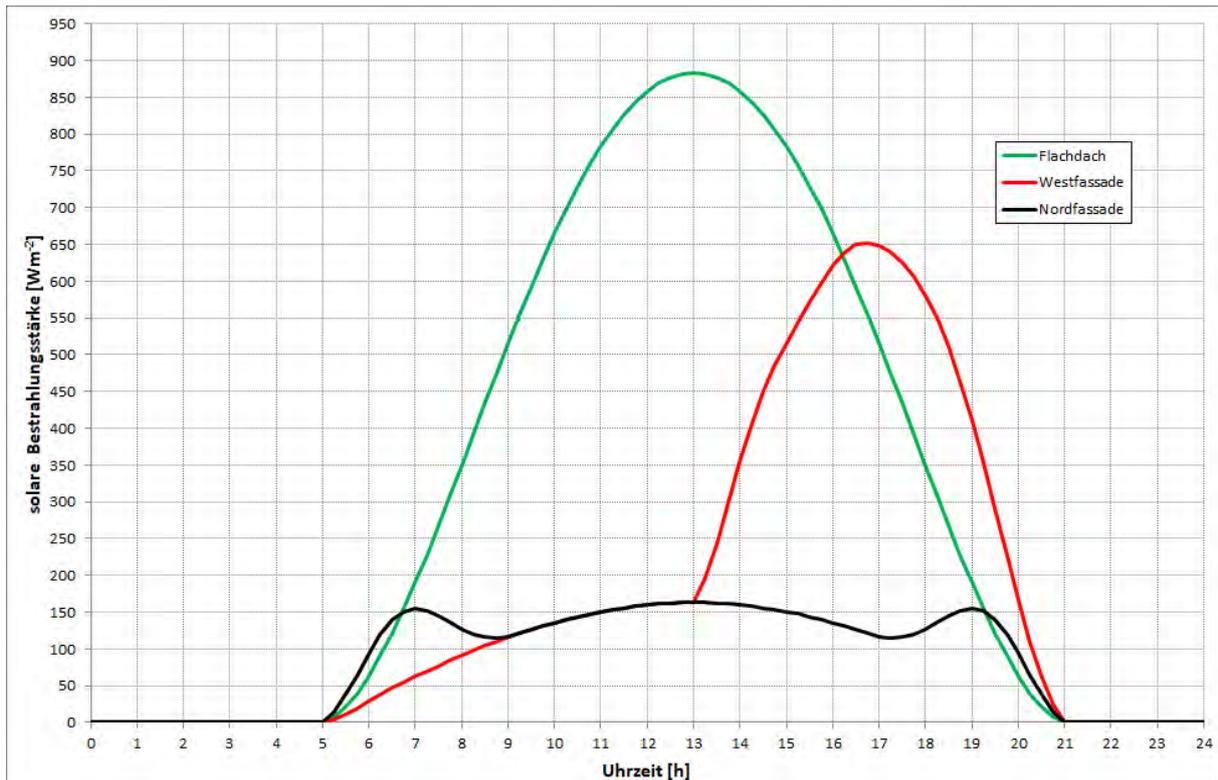


Abb. 5.28: Sommerfall: Den Simulationen zugrunde gelegte solare Bestrahlungsstärken; Uhrzeit in mitteleuropäischer Sommerzeit

Ein Vergleich zwischen Abb. 5.28 und der entsprechenden Abb. 5.23 für den Winterfall zeigt, dass die Tagesverläufe der Bestrahlungsstärken sehr unterschiedlich ausfallen. Der Maximalwert der auf das Flachdach auftreffenden Globalstrahlung (grüne Linie in Abb. 5.28) ist mit ca. 880 Wm^{-2} nahezu 5 mal so groß wie das entsprechende Maximum an einem klaren Tag im Januar (190 Wm^{-2} - siehe Abb. 5.23). Aufgrund der im Sommer wesentlich größeren Tageslänge ist die während des Tages auf das Dach auftreffende Energie mit ca. $7,7 \text{ kWh}$ im Sommer sogar fast 8 Mal so groß, wie jene im Januar (ca. $1,0 \text{ kWh}$).

Wichtiger für das sommerliche Raumverhalten ist die solare Einstrahlung auf die beiden Fassaden, da diese Fenster und Fenstertüren enthalten. Das Maximum der Einstrahlung auf die Westfassade (rote Linie in Abb. 5.28) liegt bei ca. 650 Wm^{-2} und ist damit mehr als 5 Mal so groß wie jene an einem klaren Januartag (ca. 120 Wm^{-2} - siehe Abb. 5.23).

In Hinblick auf die solare Einstrahlung auf die Nordfassade fällt auf, dass diese im Hochsommer jeweils in der Früh und am Abend Direktstrahlung erhält. Die Tagessumme der Globalstrahlung auf diese Fassade fällt natürlich mit ca. $2,0 \text{ kWh}$ erheblich kleiner aus als jene auf die Westfassade (ca. $4,2 \text{ kWh}$) und jene auf das Flachdach (ca. $7,7 \text{ kWh}$).

V.4.4.2 Simulationsergebnisse

Die Aufheizung des Modellraums nach Abschaltung der Kühlmittelzufuhr mittels thermischer Simulation wird unter Verwendung von Programmpaket INTEMP (22) untersucht. Hierbei wird davon ausgegangen, dass 70% der Deckenfläche des Raums – das sind $24,5 \text{ m}^2$ – thermisch aktiviert sind. Um die Auswirkungen der Verschattungseinrichtungen an den westorientierten Fenstertüren und am nordorientierten Fenster auf die benötigte Kühlmitteltemperatur und das Aufheizverhalten des Raums nach Abschaltung der Umwälzpumpe zu ergründen, wird eine Parameterstudie mit der Art der Verschattungseinrichtung als Parameter durchgeführt. Die mitt-

lere Kühlmitteltemperatur wird dabei in einem ersten Schritt derart eingeregelt, dass der Mittelwert der operativen Temperatur im Raum vor dem Abschalten der Umwälzpumpe für alle untersuchten Varianten gleich ist und bei 25,3 °C liegt. Die folgende Tabelle zeigt die drei Berechnungsvarianten mit der zugehörigen Kühlmitteltemperatur.

Variante	Kurzbeschreibung	Kühlmitteltemperatur [°C]
1	ohne Jalousie-Verwendung	22,9
2	Innenjalousien ($F_c = 0,65$), von 8 ⁰⁰ bis 20 ⁰⁰	23,7
3	Außenjalousien ($F_c = 0,27$), von 8 ⁰⁰ bis 20 ⁰⁰	24,5

Tab. 5.27: Sommerfall: Liste der Berechnungsvarianten und der angenommen mittleren Kühlmitteltemperaturen

Bereits bei der Suche nach der Kühlmitteltemperatur, die zum angepeilten Tagesmittelwert der operativen Temperatur im Raum von $\Theta_u = 25,3$ °C führt, zeigt sich, dass sich die Abschattung der Fenster und Fenstertüren deutlich auf den Wert der erforderlichen Kühlmitteltemperatur auswirkt. Werden während einer sommerlichen Hitzeperiode die Außenjalousien unter Tags, d. h. von 8⁰⁰ bis 20⁰⁰, heruntergelassen, so genügt eine tageszeitlich konstante Kühlmitteltemperatur von 24,5 °C (Variante 3). Der Sonnenschutz ist dabei mit einem Abschattungsfaktor von $F_c = 0,27$ gut. Stehen nur helle Innenjalousien zur Verfügung, so fällt die erforderliche Kühlmitteltemperatur um 0,8 K auf 23,7 °C (Variante 2). Wird auf eine Verschattung gänzlich verzichtet, so sinkt die erforderliche Kühlmitteltemperatur um weitere 0,8 K und beträgt nun 22,9 °C (Variante 1).

Die Beantwortung der Frage nach dem Aufheizverhalten des Raums, das sich nach einer Unterbindung der Kühlmittelzufuhr, also nach Abschaltung der Umwälzpumpe ergibt, zeigt die folgende Abbildung.

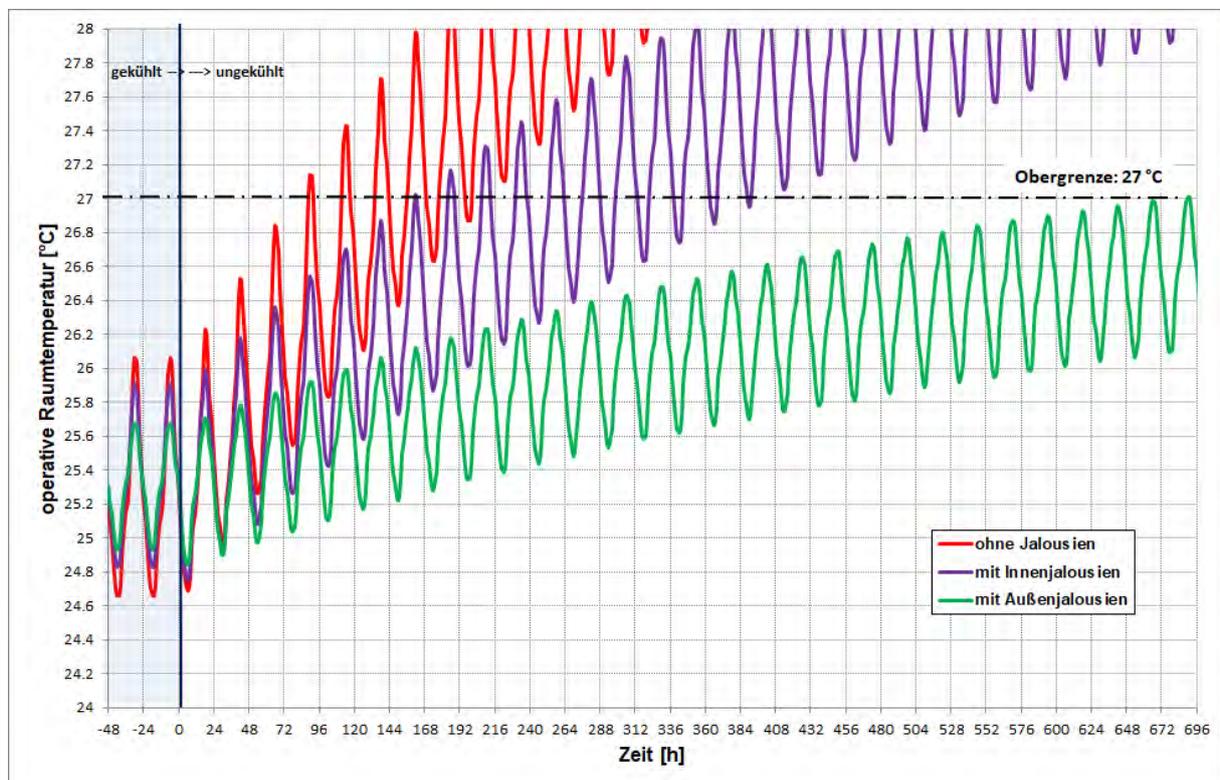


Abb. 5.29: Entwicklung der operativen Temperatur im Raum nach Abschaltung der Umwälzpumpe für verschiedene Abschattungsvarianten

Die Abschaltung der Umwälzpumpe erfolgt in obiger Abb. 5.29 zum Zeitpunkt „0“. Vor diesem Zeitpunkt (bei negativen Zeitangaben) ist der Tagesverlauf der operativen Temperatur aufgrund der periodisch angenommenen Randbedingungen periodisch eingeschwungen. Für alle drei Varianten liegt der Tagesmittelwert bei 25,3 °C. Das Tagesmaximum liegt selbst bei der Variante ohne Sonnenschutz (rote Linie in Abb. 5.29) mit 26,1 °C deutlich unter der für Wohnräume gesetzten Obergrenze von 27 °C.

Nach dem Abschalten der Umwälzpumpe verschieben sich die Tagesverläufe der operativen Temperatur zu höheren Werten. Ersichtlich ist die Art der Aufheizung aber sehr stark von der Art der Verschattung des Fensters und der Fenstertür abhängig.

Ohne Jalousiebenutzung (rote Linie in Abb. 5.29) wird die gesetzte Obergrenze der operativen Temperatur von 27 °C bereits am 4. Tag nach Abschaltung der Umwälzpumpe um 18⁰⁰ mit einem Wert von 27,4 °C überschritten. Ab dem 10. Tag nach der Abschaltung liegen die Temperaturwerte bereits ganztags über 27 °C.

Bei Verwendung der Innenjalousie (lila Linie in Abb. 5.29) ist der Aufheizvorgang etwas weniger ausgeprägt. Am 7. Tag nach Abschaltung der Umwälzpumpe erreicht die operative Temperatur mit 27 °C die gesetzte Obergrenze. Erst nach 17 Tagen ab Abschaltung der Umwälzpumpe liegen die Temperaturwerte ganztags über 27 °C.

Die ganztägige Abschattung der Fenster und Fenstertüren mit einer Außenjalousie (grüne Linie in Abb. 5.29) wirkt sich ersichtlich stark bremsend auf die Aufheizung des Raums aus. Erst am 28. Tag nach der Unterbindung der Kühlmittelzufuhr wird um 18⁰⁰ der Grenzwert von 27,0 °C erreicht. Damit zeigt sich deutlich, dass bei einer sinnvollen Verschattung der Fenster und Fenstertüren auch sehr lang andauernde Hitzeperioden ohne eine neuerliche Kühlmittelzufuhr in dem Sinn überstanden werden können, dass der thermische Komfort im Raum erhalten bleibt. Voraussetzung hierfür ist natürlich, dass vor einer solchen Hitzeperiode die Decke gekühlt war. Wie bereits erwähnt, liegt die dazu erforderliche Kühlmitteltemperatur unter den angenommenen Bedingungen (Außenjalousien ganztags) mit 24,5 °C eher hoch.

Conclusio:

Die mittels thermischer Simulation eines Modellraums durchgeführten Untersuchungen zum Aufheizverhalten eines Raums in einem Passivhaus während einer sommerlichen Hitzeperiode führen zu folgenden Ergebnissen.

- Die Art der Verschattung der transparenten Anteile an der Gebäudehülle beeinflusst die zur Einhaltung der Solltemperatur erforderliche Kühlmitteltemperatur erheblich. Der Verzicht auf Verschattungsmaßnahmen schlägt sich im Vergleich zu einer ganztägigen Verschattung durch Außenjalousien in einer Erniedrigung der Kühlmitteltemperatur um 1,6 K nieder.
- Die für die Wahrung eines hohen sommerlichen Komforts notwendigen Kühlmitteltemperaturen liegen bei Verwendung von Jalousien im Bereich von ca. 24 K und damit eher hoch. Die thermische Aktivierung von Betondecken erweist sich somit auch im Fall der Kühlung als energiesparend.
- Die Temperaturentwicklung im Raum nach einer Abschaltung der Kühlmittelzufuhr erweist sich als stark von der Wahl der Abschattung der Fenster abhängig. Ohne Abschattung wird die Obergrenze der operativen Temperatur von 27 °C nach 90 Stunden ab dem Abschaltzeitpunkt überschritten. Bei ganztägiger Verwendung von Innenjalousien wird diese Obergrenze erst nach 162 Stunden erreicht. Die entsprechende Verwendung von Außenjalousien bremst die Aufheizung gravierend. In diesem Fall wird die Obergrenze

der operativen Temperatur erst nach 690 Stunden erreicht. Dies bedeutet, dass eine Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr auch nach 28 Tagen in einer Hitzeperiode zu keiner Überhitzung des Raums führt.

V.5 Thermische Behaglichkeit

Bisher wurde die thermische Behaglichkeit nur insofern berücksichtigt, als die operative Temperatur als Kenngröße herangezogen wurde. Die operative Temperatur ist der arithmetische Mittelwert aus Lufttemperatur und mittlerer Oberflächentemperatur und kann damit die sich im Raum einstellende Temperaturverteilung nicht abbilden. Zudem werden durch die Mittelung die Bedeutung der Lufttemperatur zu hoch und jene der Oberflächentemperaturen zu gering eingeschätzt.

Das thermische Empfinden wird in erster Linie durch den Strahlungsaustausch zwischen der im Raum befindlichen Person und den inneren Oberflächen des Raums bestimmt. Eine wesentlich genauere Aussage über die zu erwartende thermische Behaglichkeit liefert daher die Berechnung des Strahlungsfelds im Raum. Wie in Abschnitt III.2.3 skizziert, sind dazu die Wärmeflüsse aufgrund des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen allen raumbegrenzenden Bauteilen zu berechnen. Da der in Abschnitt V.1 definierte Modellraum konvex ist, werden bei diesen Berechnungen auch alle Reflexionen berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten werden exemplarisch jene Temperaturen im Modellraum berechnet, die ein kugelförmiger Messfühler bei einer Bewegung durch den Raum registriert. Aus diesen Berechnungen kann auf Temperaturgradienten geschlossen werden, womit weit tragfähigere Aussagen zum thermischen Komfort getroffen werden können.

V.5.1 Strahlungsfeld im Winter

Im Folgenden wird das Strahlungsfeld in dem in Abschnitt V.1 definierten Modellraum für einen Zeitpunkt des mittleren Januar-Tags berechnet werden. Hierbei wird der in Hinblick auf die Oberflächentemperaturen kritischste Fall beleuchtet. Den Ergebnissen von Abschnitt V.3.2 folgend ist dies der Modellraum in Niedrigenergiehaus-Qualität am Standort Klagenfurt.

Für die Strahlungsaustauschberechnungen gehen als Eingabegrößen neben der Raumgeometrie die Emissionszahlen für langwellige Strahlung der inneren Oberflächen und die Oberflächentemperaturen ein. Die folgende Abbildung zeigt die für den mittleren Januar-Tag in Klagenfurt errechneten inneren Oberflächentemperaturen des Modellraums in Niedrigenergiehaus-Qualität.

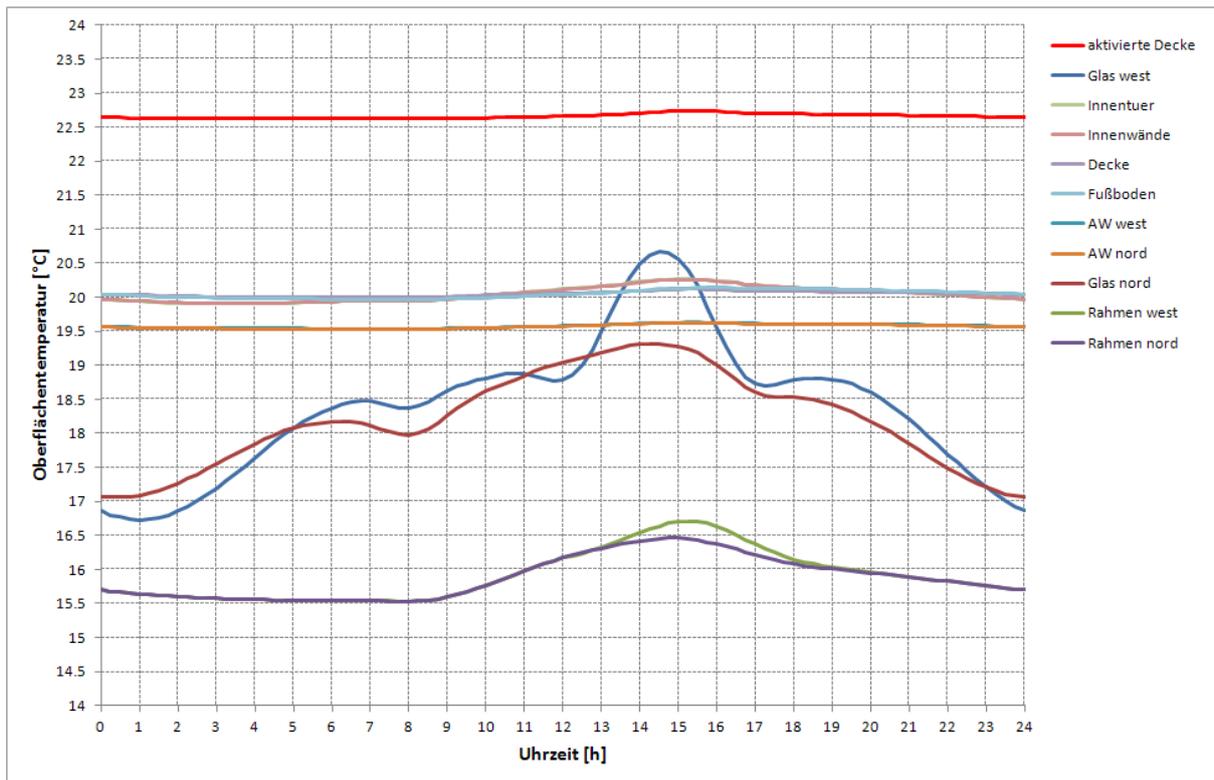


Abb. 5.30: Niedrigenergiehaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der Oberflächentemperaturen bei Beheizung mittels Aktivierung der Decke; mittlerer Januar-Tag in Klagenfurt

Die Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke liegt bis zu ca. 3 K über jenen der nicht temperierten Bauteile. Lediglich die Fenster, und hier insbesondere die Fensterrahmen weisen im Tagesverlauf zum Teil deutlich höhere Temperaturunterschiede zur beheizten Decke auf. Das Strahlungsfeld soll nun für 8 Uhr früh, also zu einem Zeitpunkt am Beginn der Raumnutzung, berechnet werden.

Die folgende Tabelle zeigt die um 8 Uhr früh errechneten inneren Oberflächentemperaturen.

Glas West	18,4 °C	aktivierte Decke	22,6 °C
Rahmen West	15,5	Decke	20,0
AW West	19,5	Fußboden	20,0
Glas Nord	18,0	Innenwand	19,9
Rahmen Nord	15,5	Innentür	19,9
AW Nord	19,5		

Tab. 5.28: Oberflächentemperaturen in °C für den mittleren Januar-Tag um 8⁰⁰; Niedrigenergie-Standard; Klagenfurt

Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung der von einem kugelförmigen Messfühler in einer horizontalen Ebene in Höhe von 1,8 m – also ca. in Kopfhöhe - über dem Fußboden registrierten Temperaturen.

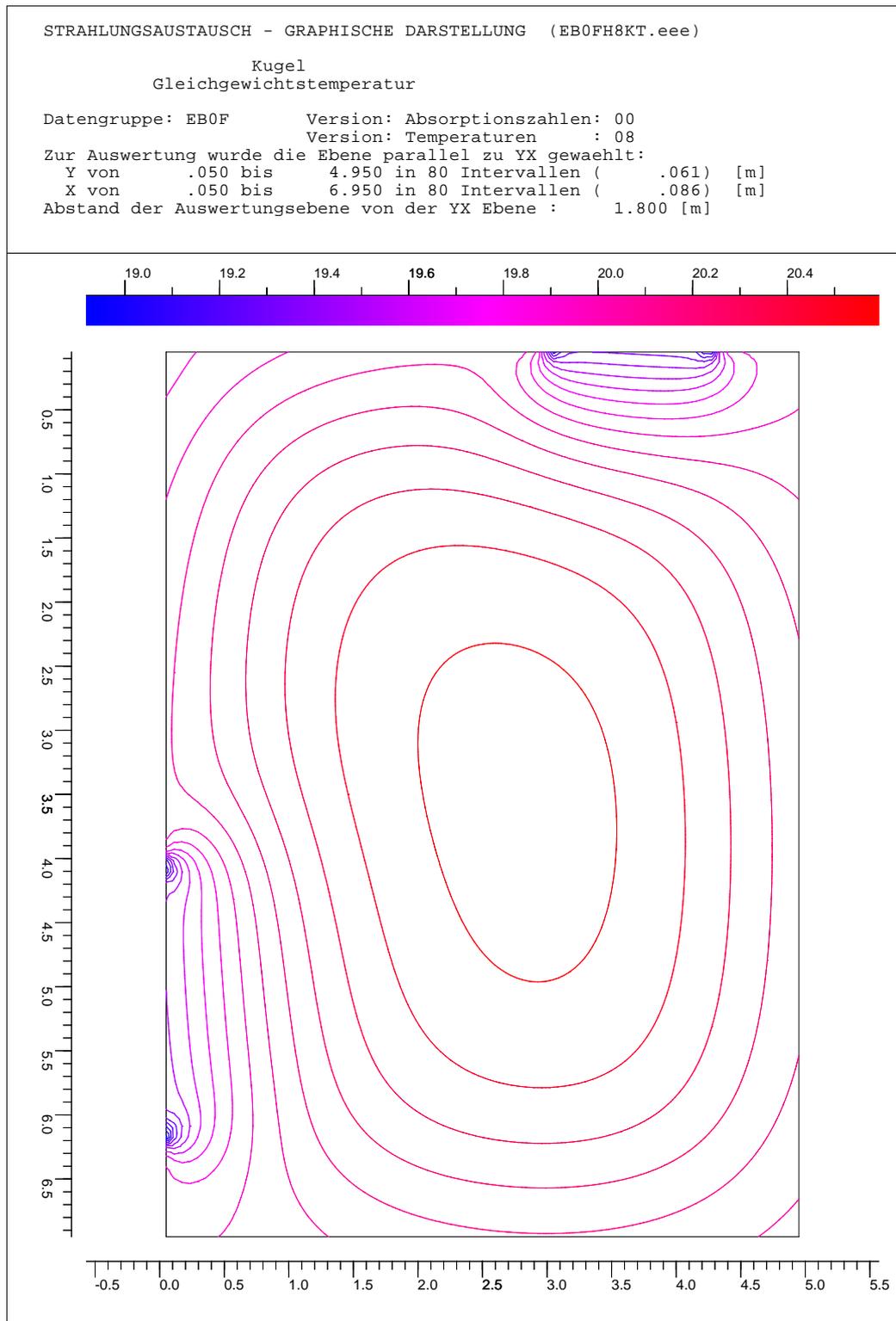


Abb. 5.31: Errechnete Temperaturverteilung in einer horizontalen, 1,8 m über der Fußbodenoberkante situierten Ebene; mittlerer Januar-Tag in Klagenfurt, 8⁰⁰; Isothermen-darstellung: von 19,0 °C (blau) bis 20,5 °C (rot); Abstand 0,1 K

Die innerste Isotherme gehört zu einer vom Kugelthermometer registrierten Temperatur von 20,5 °C. Mit Ausnahme der Bereiche nahe dem Fenster und Fenstertür fällt die Temperatur auf 19,8 °C im unmittelbaren Bereich der Kante der beiden Außenwände (links oben) ab. Die re-

registrierte Temperatur ändert sich somit lediglich um maximal 0,6 K und liegt vornehmlich knapp über der Solltemperatur von 20 °C.

Anmerkung: Bezüglich der aktivierten Fläche wird im Zuge der Strahlungsaustauschberechnung angenommen, dass diese ein Rechteck mit 24,5 m² Flächeninhalt in der Deckenmitte bildet. Der Abstand zwischen beheizter Fläche und Kante zwischen Decke und Wand wurde dabei generell auf 0,48 m gesetzt.

Im Abstand von ca. 0,5 m von den Fenstertüren fällt die Temperatur von 19,9 °C auf 19,7 °C ab. Im unmittelbaren Bereich vor den Fensterrahmen stellt sich der Minimalwert der Temperatur mit 19,0 °C ein.

Es zeigt sich damit, dass in Kopfhöhe die Temperaturunterschiede sehr klein sind und in den Aufenthaltsbereichen des Raums knapp über der Solltemperatur liegen. Der Abfall der Temperatur in unmittelbarer Nähe der Fenster auf minimal 19 °C wird sich auf die thermische Behaglichkeit im Raum kaum spürbar auswirken.

Besonders interessant ist die Temperaturverteilung für einen Vertikalschnitt durch den Raum. Die kritischste Position für solch' eine Ebene ist wohl jene, die durch die Mitte des Nordfensters gelegt ist. In folgender Abbildung ist diese Ebene in die dreidimensionale Darstellung des Modellraums rot hinterlegt eingezeichnet.

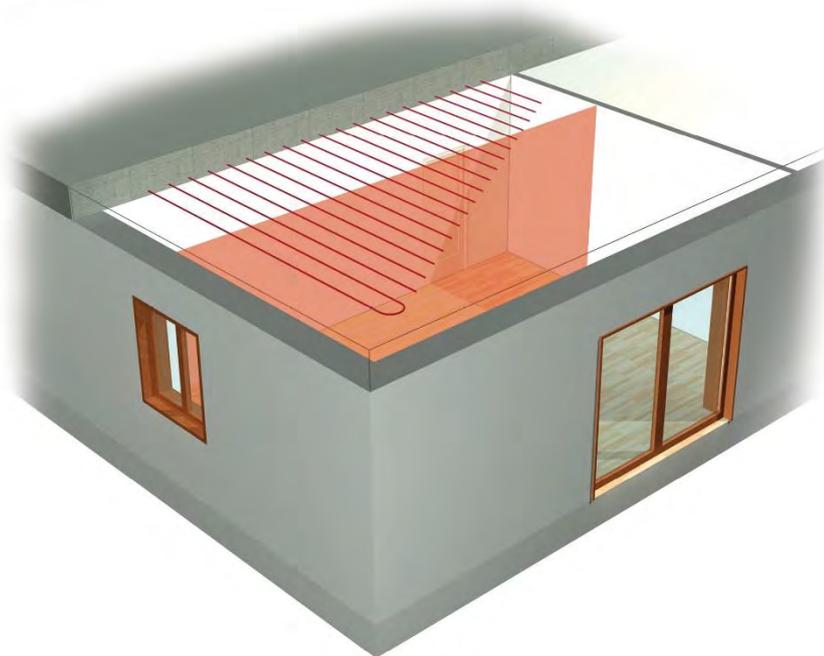


Abb. 5.32: Skizze der Position der vertikalen Ebene, für die die Temperaturverteilung berechnet wird; © Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H

In der nächsten Abbildung ist als Ergebnis der Strahlungsaustauschberechnung die von einem Kugelthermometer registrierte Temperatur in Form einer Isothermendarstellung für den Vertikalschnitt gemäß Abb. 5.32 dargestellt. Die Blickrichtung ist dabei nach Osten, also von der Außenwand mit der Fenstertür zur Innenwand hin gerichtet.

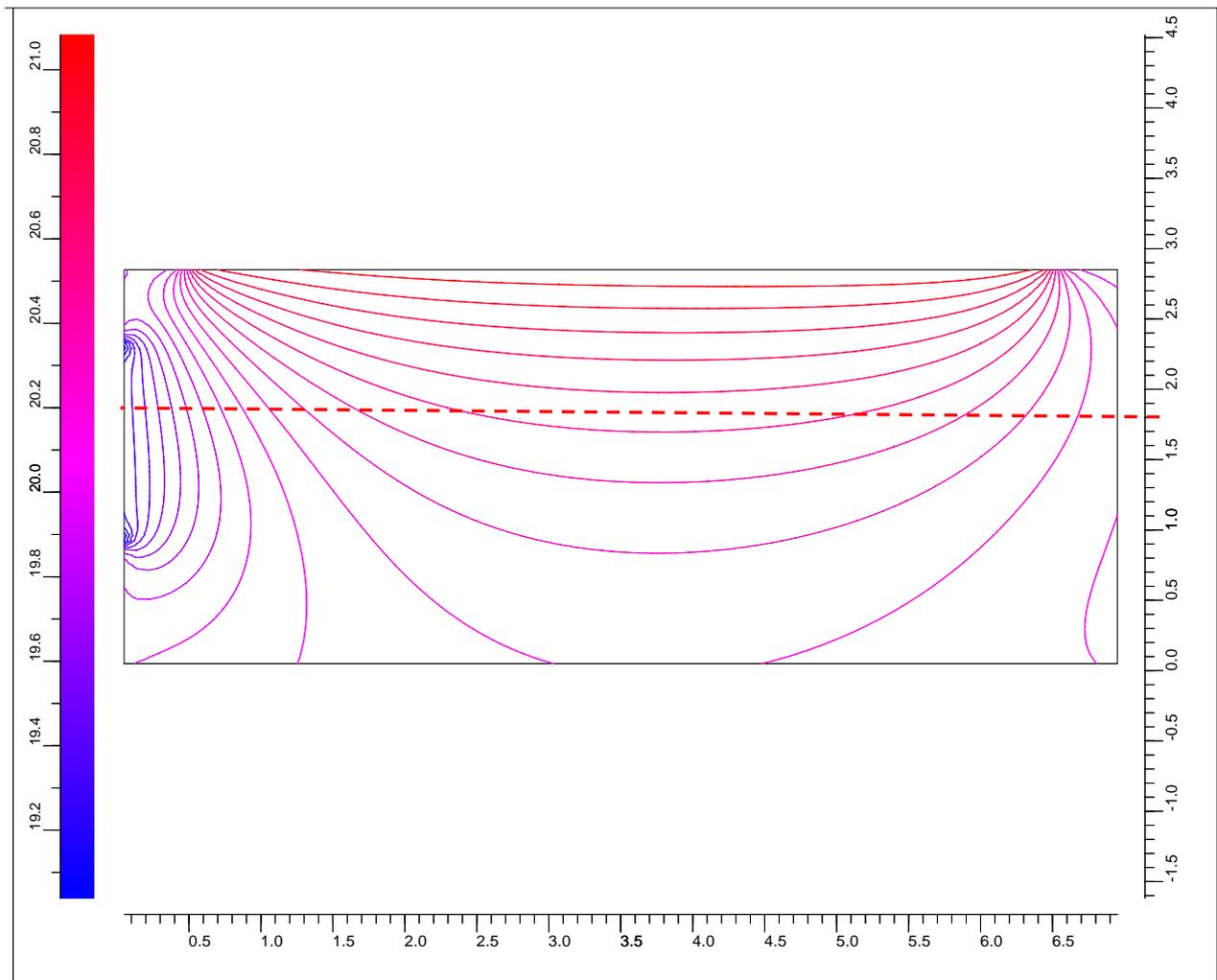


Abb. 5.33: Errechnete Temperaturverteilung in einer vertikalen Ebene; Schnitt parallel zur AW West im Abstand von 3,65 m (siehe Abb. 5.32); mittlerer Januar-Tag in Klagenfurt, 8⁰⁰; Isothermendarstellung: von 19,1 °C (blau) bis 21,0 °C (rot); Abstand 0,1 K

Die Lage der horizontalen Ebene, deren Temperaturverteilung in Abb. 5.31 gezeigt ist, ist in obigem Bild strichliert eingezeichnet. Der interessierende Aufenthaltsbereich vom Fußboden bis ca. 1,8 m Raumhöhe liegt somit unter der strichlierten Linie.

Es zeigt sich, dass die Temperaturschichtung im Aufenthaltsbereich des Raums mit maximalen Temperaturdifferenzen zwischen 20,0 °C im Bereich der Kanten zwischen Fußboden und Außenwand und 20,5 °C in Kopfhöhe kaum ausgeprägt ist. Ein Temperaturgradient von maximal 0,5 K zwischen Fußbereich und Kopf wird wohl kaum wahrgenommen werden.

Im Bereich des Nordfensters (in Abb. 5.33 links) fällt die Temperatur von 20 °C auf 19,4 °C unmittelbar vor der Scheibe in Scheibenmitte ab. Die Minimaltemperatur wird mit 19,1 °C im unmittelbaren Bereich vor den Fensterrahmen erreicht. Die deutliche Erhöhung der Temperatur im Bereich des Nordfensters (Oberflächentemperaturen: 18,0 °C am Glas, 15,5 °C am Rahmen – siehe Tab. 5.28) ist auf den Strahlungsaustausch zwischen thermisch aktivierter Decke und dem Fenster zurück zu führen und trägt zu der hervorragenden thermischen Qualität des Innenraums bei.

Conclusio:

Die für den mittleren Januar-Tag am Standort Klagenfurt für den Modellraum in Niedrigenergiehaus-Qualität durchgeführten Strahlungsaustausch-Berechnungen führen auf folgende Ergebnisse:

- Im Aufenthaltsbereich des Modellraums zwischen Fußboden und ca. 1,8 m Höhe ab Fußbodenoberkante ergeben sich Temperaturunterschiede, die großteils im Bereich von ca. 0,5 K liegen und damit für die thermische Empfindung kaum registrierbar sind. Die von einem Kugelthermometer angezeigten Temperatur-Werte liegen hierbei knapp oberhalb der Soll-Temperatur von 20 °C.
- Im unmittelbaren Bereich der Fenster fällt die Temperatur bis auf ca. 19 °C ab. Ein größerer Temperaturabfall wird durch den Strahlungsaustausch zwischen der thermisch aktivierten Deckenfläche und dem Fenster bzw. der Fenstertür verhindert.
- Zusammenfassend zeigt die Berechnung des Strahlungsfelds im Raum, dass die thermische Qualität im Fall der Beheizung des Modellraums mittels Aktivierung von 70 % der Deckenfläche als ausgezeichnet einzustufen ist.

V.5.2 Strahlungsfeld im Sommer

Für den Sommerfall wird das Strahlungsfeld in dem in Abschnitt V.1 definierten Modellraum für den mittleren Juli-Tag berechnet. Hierbei soll der in Hinblick auf die Oberflächentemperaturen kritischste Fall beleuchtet werden. Den Ergebnissen von Abschnitt V.3.3 folgend ist dies der Modellraum in Passivhausqualität am Standort Wien, Innere Stadt.

Wie im Winterfall gehen in die Strahlungsaustausch-Berechnungen als Eingabegrößen neben der Raumgeometrie die Emissionszahlen für langwellige Strahlung der inneren Oberflächen und die Oberflächentemperaturen ein. Die folgende Abbildung zeigt die für den mittleren Juli-Tag in Wien, Innere Stadt, errechneten inneren Oberflächentemperaturen des Modellraums in Passivhaus-Qualität. Natürlich wird hierbei angenommen, dass die westorientierte Fenstertür ganztägig durch Außenjalousien verschattet ist.

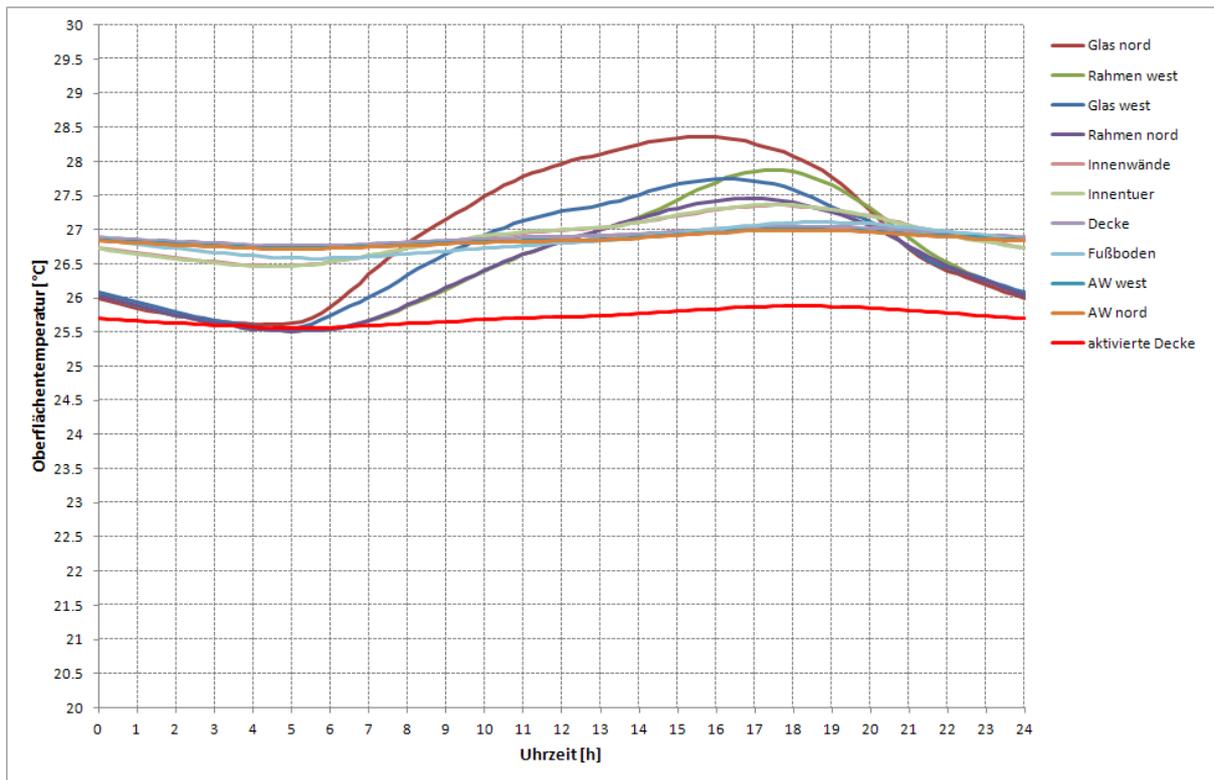


Abb. 5.34: Passivhaushaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der Oberflächentemperaturen bei Kühlung mittels Aktivierung der Decke; mittlerer Juli-Tag in Wien, Innere Stadt

Die Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Geschoßdecke liegt lediglich bis zu ca. 2,0 K unter jenen der nicht temperierten Bauteile. Lediglich die Fenster weisen im Tagesverlauf zum Teil etwas höhere Temperaturunterschiede zur gekühlten Decke auf. Die höchsten Temperaturen treten am Glas des Nordfensters auf, da angenommen wurde, dass dies nicht verschattet ist.

Das Strahlungsfeld soll nun für 18⁰⁰, dem Zeitpunkt der maximalen Wärmeabgabeleistung der Decke (siehe dazu z. B. Abb. 5.19), berechnet werden. Die folgende Tabelle zeigt die für 18⁰⁰ errechneten inneren Oberflächentemperaturen.

Glas west	27,6 °C	aktivierte Decke	25,9 °C
Rahmen west	27,9	Decke	27,1
AW west	27,0	Fußboden	27,1
Glas nord	28,1	Innenwand	27,4
Rahmen nord	27,4	Innentür	27,4
AW nord	27,0		

Tab. 5.29: Oberflächentemperaturen in °C für den mittleren Juli-Tag um 18⁰⁰; Passivhaus-Standard; Wien, Innere Stadt

Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung der von einem kugelförmigen Messfühler in einer horizontalen Ebene in Höhe von 1,8 m – also ca. in Kopfhöhe - über dem Fußboden registrierten Temperaturen anhand eines Isothermenbilds.

Fenster und der Fenstertür steigt die Temperatur auf 27,2 °C im unmittelbaren Bereich der Kante der beiden Innenwände (rechts unten) an. Die registrierte Temperatur ändert sich somit lediglich um maximal 0,3 K und liegt vornehmlich bei der Grenztemperatur von 27 °C.

Aufgrund der heruntergelassenen Außenjalousien steigt auch im Bereich der Fenstertüren in der Westfassade (links unten) die Temperatur nicht über 27,2 °C. Der Maximalwert der Temperatur stellt sich unmittelbar vor der Scheibe des nicht beschatteten Nordfensters (rechts oben) mit 27,4 °C ein.

Es zeigt sich damit, dass in Kopfhöhe die Temperaturunterschiede sehr klein sind und in den Aufenthaltsbereichen des Raums im Bereich von 27 °C liegen. Die im Vergleich zu den Oberflächentemperaturen der Fenster (siehe Tab. 5.29) für die unmittelbare Umgebung der Fenster berechneten deutlich niedrigeren Temperaturen sind ein Indiz für den gut funktionierenden Strahlungsaustausch zwischen gekühlter Deckenoberfläche und den Fensteroberflächen.

Die nächste Abbildung zeigt die vom Kugelthermometer registrierte Temperatur für einen Vertikalschnitt durch den Raum, der durch die Mitte des Nordfensters gelegt ist (siehe Abb. 5.32). Die Blickrichtung ist nach Osten, also von der Außenwand mit der Fenstertür zur Innenwand hin gerichtet.

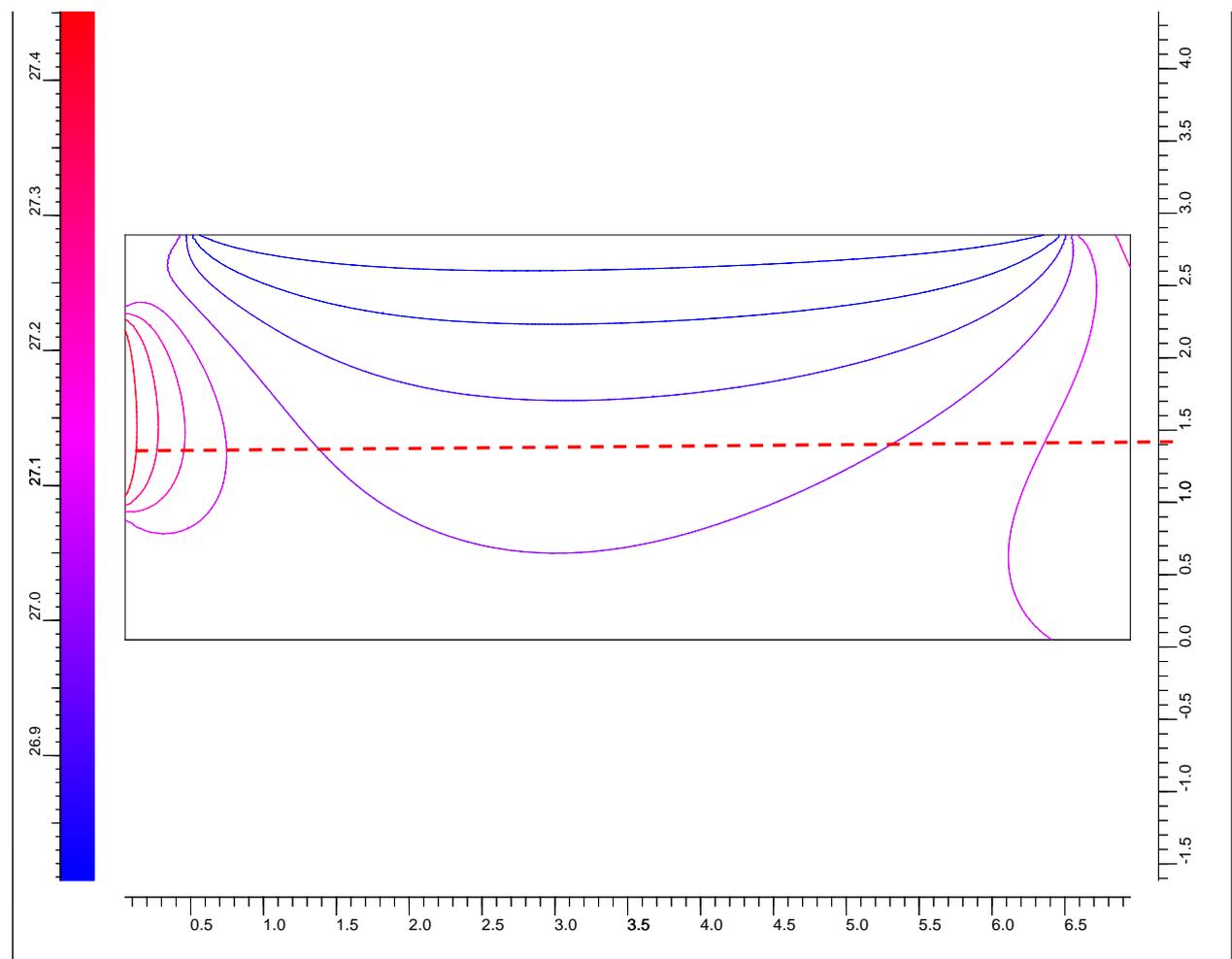


Abb. 5.36: Errechnete Temperaturverteilung in einer vertikalen Ebene; Schnitt parallel zur AW West im Abstand von 3,65 m; mittlerer Juli-Tag in Wien, Innere Stadt, 18⁰⁰; Isothermendarstellung: von 26,7 °C (blau) bis 27,4 °C (rot); Abstand 0,1 K

Die Lage der horizontalen Ebene, deren Temperaturverteilung in Abb. 5.35 gezeigt wurde, ist in obigem Bild rot strichliert eingezeichnet. Der interessierende Aufenthaltsbereich vom Fußboden bis 1,8 m Raumhöhe liegt somit unterhalb der strichlierten Linie.

Es zeigt sich, dass die Temperaturschichtung im Aufenthaltsbereich des Raums mit maximalen Temperaturdifferenzen zwischen 27,0 °C in der Raummitte im Bereich des Fußbodens und ca. 26,9 °C in Kopfhöhe sehr klein ist. Ein Temperaturgradient von 0,1 K zwischen Fußbereich und Kopf wird nicht wahrnehmbar sein.

Im Bereich des Nordfensters (in Abb. 5.36 links) steigt die Temperatur auf ihren Maximalwert von 27,4 °C unmittelbar vor der Scheibe an.

Conclusio:

Die für den mittleren Juli-Tag am Standort Wien, Innere Stadt, für den Modellraum in Passivhaus-Qualität durchgeführten Strahlungsaustausch-Berechnungen führen auf folgende Ergebnisse:

- Im Aufenthaltsbereich des Modellraums zwischen Fußboden und ca. 1,8 m Höhe ab Fußbodenoberkante ergeben sich Temperaturunterschiede, die großteils im Bereich von ca. 0,1 K liegen und damit für die thermische Empfindung nicht registrierbar sind. Die von einem Kugelthermometer angezeigten Temperatur-Werte liegen bei und knapp unterhalb der gesetzten Obergrenze von 27 °C.
- Im unmittelbaren Bereich des unverschatteten Nordfensters steigt die Temperatur bis auf ca. 27,4 °C an. Ein stärkerer Temperaturanstieg wird durch den Strahlungsaustausch zwischen der thermisch aktivierten Deckenfläche und dem Nordfenster bzw. der Fenstertür im Westen verhindert.
- Zusammenfassend zeigt die Berechnung des Strahlungsfelds im Raum, dass die thermische Qualität auch im Fall der Kühlung des Modellraums mittels Aktivierung von 70 % der Deckenfläche als ausgezeichnet einzustufen ist.

VI. Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Berechnungsergebnisse dienen dem besseren Verständnis der wärmetechnischen Vorgänge in thermisch aktivierten Stahlbetondecken. Grundsätzlich ist festzustellen, dass der Wärmefluss innerhalb solcher Decken mit den üblicherweise verwendeten eindimensionalen Verfahren nicht erfassbar ist. Dies bedeutet, dass an die Stelle analytischer Ansätze numerische Methoden treten, die für gewöhnlich unter dem Schlagwort „Wärmebrückenberechnung“ subsummiert werden. Unter Verwendung der Theorie der thermischen Leitwerte kann diese komplexe Thematik insofern vereinfacht werden, als die Charakteristiken für die Beschreibung des thermischen Verhaltens mit einigen, wenigen Kennzahlen vollständig erfassbar sind. Besonders wertvoll ist in diesem Zusammenhang, dass die für die bautechnische Umsetzung der thermischen Bauteilaktivierung benötigten Kenngrößen, wie z. B. die auf die Registerfläche bezogene Wärmeabgabe- oder Wärmeaufnahmeleistung, aus den Berechnungen unmittelbar und ohne Genauigkeitsverlust abgeleitet werden können. Damit ist das Ziel der Arbeit, die Grundlagen für eine Erhöhung der Planungssicherheit zu liefern, erreicht.

Die Auswirkung einer thermisch aktivierten Decke auf den zu beheizenden bzw. zu kühlenden Raum kann zwar mittels Simulation des thermischen Raumverhaltens mit hoher Genauigkeit

vorhergesagt werden. Nachteilig wirkt sich dabei allerdings aus, dass in eine solche Simulation - abgesehen vom Aufbau der thermisch aktivierten Decke und den Details des Rohrregisters - eine sehr große Anzahl von Festlegungen in Hinblick auf den Raum selbst aber auch auf das Gebäude, den Gebäudestandort und das Außenklima eingehen. Damit besteht die Gefahr, dass aufgrund der großen Anzahl an Berechnungsparametern der Fokus auf das eigentliche Thema – die thermisch aktivierte Betondecke – verloren geht.

Um der skizzierten Problematik auszuweichen, wird in dieser Arbeit eine zweistufige Vorgangsweise angewendet. In einem ersten Schritt wird Bauteilbezogen gerechnet, indem allein die thermisch aktivierte Decke betrachtet wird. Das thermische Verhalten der unter und über der Decke liegenden Räume bleibt dabei insofern unbeachtet als die in diesen Räumen vorherrschenden Temperaturen als Randbedingungen in die Berechnung eingehen und somit vorgegeben werden. Mittels Parameterstudien kann auf diese Art eine Vielzahl von wertvollen Erkenntnissen über die thermisch aktivierte Decke erhalten werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Bauteilbezogenen rechnerischen Untersuchungen wird in einem zweiten Schritt die Auswirkung einer thermisch aktivierten Decke auf den unter dieser Decke liegenden, zu konditionierenden Raum untersucht, also Raumbezogen gerechnet. Natürlich muss zu diesem Zweck die bereits angesprochene Vielzahl von Festlegungen getroffen werden. Um diese Problematik handhabbar bleiben zu lassen, wird ein Modellraum konzipiert, anhand dessen Aussagen über das thermische Verhalten mittels Anwendung der Methoden thermischer Gebäudesimulation getroffen werden. Natürlich sind solche Ergebnisse nicht unmittelbar auf andere Räume übertragbar, lassen aber Tendenzen klar erkennen.

Neben der Wahl zwischen Bauteil- und Raumbezogener Betrachtungsweise ist auch zwischen stationären – also zeitunabhängigen – und instationären, d. h. zeitabhängigen Berechnungsansätzen zu unterscheiden. Wichtig dabei ist es zu wissen, dass die besonders interessierenden Effekte der Wärmespeicherfähigkeit nur im Fall instationärer Vorgänge eine Rolle spielen. Um diese Effekte mit hoher Genauigkeit und prägnant darstellen zu können, wird überwiegend die zeitliche Periodizität als Berechnungsansatz herangezogen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit nach den soeben skizzierten Themenfeldern strukturiert und schlagwortartig aufgelistet.

VI.1 Bauteilbezogene Betrachtungen

Als Aufbau der thermisch aktivierten Decke wird überwiegend eine Geschoßdecke, also eine Decke zwischen zwei Regelgeschossen herangezogen. Über der thermisch aktivierten Stahlbetonplatte befindet sich eine 10 cm dicke Schicht aus Dämmschüttung und ein konventioneller Fußbodenaufbau mit einer 6 cm dicken Estrichschicht. Die Wärmeübergangskoeffizienten an der Deckenuntersicht sowie an der Fußbodenoberfläche werden normgemäß angesetzt.

VI.1.1 stationäres Verhalten

Den stationären Berechnungen werden die Raumlufttemperaturen sowie die Temperatur des Mediums im Rohrregister als konstante, also zeitunabhängige Werte zugrunde gelegt. Aus den stationär durchgeführten Parameterstudien ergeben sich folgende, wesentliche Erkenntnisse:

- Bei Vergrößerung des Achsabstands zwischen je zwei Rohren des Rohrregisters verkleinert sich im Fall der Heizung bei gleich gehaltener Rohrtemperatur die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Decke. Im Fall der Kühlung verringert sich bei ansteigendem Achsabstand die Wärmeaufnahmeleistung der Decke. Die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung kann in Abhängigkeit vom Achsabstand der Rohre mittels drei Zahlen (Regressionskoeffizienten) mit hoher Genauigkeit per Hand berechnet werden, wobei lediglich die Lufttemperaturen in den Räumen sowie die Rohrtemperatur eingehen.
- Der Innendurchmesser der Rohre des Registers beeinflusst die flächenbezogene Wärmeabgabe- und Aufnahmeleistung nur unwesentlich.
- Die Lage des Rohrregisters innerhalb der Stahlbetondecke kann durch die Betonüberdeckung – das ist der Abstand zwischen Deckenuntersicht und Unterseite des Rohrregisters – beschrieben werden. Bei größer werdender Betonüberdeckung sinkt bei gleicher Rohrtemperatur die flächenbezogene Wärmeabgabe- und Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke.
- Wärmedämmende Schichten an der Deckenuntersicht sind zu vermeiden, sofern hohe flächenbezogene Wärmeabgabe- und/oder Wärmeaufnahmeleistungen angestrebt werden. Selbst eine niedrige Wärmeleitfähigkeit eines Deckenputzes oder einer Spachtelmasse schlägt sich in einer merkbaren Reduktion der Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme der thermisch aktivierten Decke nieder. Eine Verkleidung der Deckenuntersicht führt zu einer sehr ausgeprägten Reduktion der flächenbezogenen Wärmeabgabe- und Wärmeaufnahmeleistung und kann nur im Fall großer aktivierter Flächen bei gleichzeitig kleinem Heizwärme- und/oder Kühlbedarf akzeptiert werden.
- Wird aus Gründen des thermischen Komforts gefordert, dass die Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke im Heizfall nicht 4,0 K über der Solltemperatur im Raum unter der Decke liegen darf, so begrenzt dies die erlaubte, flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der Decke mit $26,0 \text{ Wm}^{-2}$. Wird im Fall der Kühlung gefordert, dass die Oberflächentemperatur der gekühlten Fläche nicht mehr als 4,0 K unter der Raumtemperatur liegen darf, so ergibt sich die entsprechende maximale flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung der Decke zu $43,2 \text{ Wm}^{-2}$.
- Die sich unter stationären Bedingungen einstellende erforderliche Heizmitteltemperatur liegt bei engen Rohrabständen (z. B. 10 cm) und geringer Betonüberdeckung im Bereich um ca. 6,0 K über der Solltemperatur im Raum unter der Decke. Bei sehr großen Rohrabständen (z. B. 50 cm) vergrößert sich diese Temperaturdifferenz in etwa auf 9,0 K. Dies bedeutet, dass der Wärmeerzeuger als Niedrigsttemperaturheizung einzustufen ist und entsprechend effektiv betrieben werden kann. Die thermische Aktivierung erweist sich somit insbesondere für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen als besonders geeignet. Analog ergibt sich für den Fall der Kühlung die Aussage, dass sich bereits bei relativ hohen Kühlmitteltemperaturen ausreichende Kühleffekte einstellen. Grund für diese Eigenschaften thermisch aktivierter Decken ist die beachtliche Größe der Heiz- bzw. Kühlfläche. Eine thermisch aktivierte Decke ist damit in die Klasse der Flächenheizungen bzw. Flächenkühlungen einzuordnen.

- Bei der thermischen Aktivierung von Außenbauteilen – hier also der obersten Decke – ist zu beachten, dass ein Teil der vom Rohrregister erbrachten Heizleistung nicht dem Gebäude zugutekommt, sondern nach außen abfließt. Da die Differenz zwischen der Temperatur in den Rohren des Registers und der Außenlufttemperatur im Winter wesentlich größer ist als jene zwischen Rohrtemperatur und Solltemperatur im zu beheizenden Raum, gehen selbst bei in Passivhausniveau gedämmten obersten Decken ca. 10 % der vom Rohrregister abgegebenen Wärmeleistung nach außen verloren.

Im Fall des Kühlbetriebs liegt der Anteil der von außen dem Rohrregister zuströmenden Wärmemenge im Fall dunkler Dachhaut beim Passivhaus-Dach ebenfalls im Bereich von 10%. Dieser Anteil lässt sich durch Veränderung der Farbe der Dachhaut hin zu hellerer Ausgestaltung wesentlich verkleinern.

VI.1.2 instationäres Verhalten

Im Fall der instationären Berechnungen tritt ein durch Stundenwerte definierter Zeitverlauf der Heiz- oder Kühlmitteltemperatur an die Stelle der zeitlich konstanten Rohrtemperatur des stationären Falls. Aus Gründen der besseren Interpretierbarkeit der Simulationsergebnisse werden die Lufttemperaturen im zum konditionierenden Raum und im über der Decke liegenden Raum hierbei nach wie vor konstant, also zeitunabhängig angesetzt. Die Berechnungsergebnisse zeigen unter den genannten Ansätzen das thermische Verhalten der aktivierten Decke im Fall von unterbrochener Heiz- bzw. Kühlmittelzufuhr, also bei nicht permanent durchlaufender Umwälzpumpe. Im Gegensatz zur stationären Berechnung spielt nun die Wärmespeicherung in der Stahlbetondecke eine wesentliche Rolle.

Die für instationäre Bedingungen durchgeführten Parameterstudien führen auf folgende bedeutsame Erkenntnisse:

- Die Unterbrechung einer Zufuhr des Heizmittels mittels Abschaltung der Umwälzpumpe führt zu einem langsamen Absinken der Oberflächentemperatur der Deckenunterseite der thermisch aktivierten Decke. Damit ist auch ein langsames Absinken der Wärmeabgabeleistung verbunden. Es zeigt sich, dass selbst eine tägliche Heizungsunterbrechung von 16 h Dauer – somit eine tägliche Beladungszeit von 8 h Dauer – ausreicht, um dem Raum 73% jener Wärmemenge zuzuführen, die bei durchlaufendem Heizbetrieb möglich sind.
- Bei Unterbrechung der Heizmittelzufuhr kann die Heizmitteltemperatur während der Beladungszeit erhöht werden, ohne dass die Oberflächentemperatur der Deckenunterseite zu stark ansteigt.
- Auch im Fall des Kühlbetriebs erweist sich die Reduktion der Beladungszeit auf täglich 8 Stunden als unproblematisch möglich. Bei einer solchen Betriebsweise kann die Kühlmitteltemperatur abgesenkt werden, ohne den thermischen Komfort im Raum zu beeinträchtigen. Bei 8-stündiger Beladungsdauer können bis zu 63% jener Wärmemenge dem Raum entzogen werden, die bei durchlaufendem Betrieb der Umwälzpumpe erreichbar sind.
- Bei größer werdender Betonüberdeckung des Rohrregisters sinkt bei gleich gehaltener Heizmitteltemperatur die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke (auch) im Fall nicht durchgehenden Heizbetriebs ab. Damit kann das Heizmittel mit höheren Temperaturen eingespeist werden. Eine größere Betonüberdeckung ist damit bei kurzen Beladungszeiten von Vorteil.

- Auch im Kühlbetrieb erweist sich eine größere Betonüberdeckung im Fall nur kurzer Laufzeiten der Umwälzpumpe als vorteilhaft.
- Die Dicke der thermisch aktivierten Deckenplatte aus Stahlbeton hat sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall bei täglich wiederkehrender Heiz- bzw. Kühlunterbrechungen einen vernachlässigbaren Einfluss auf das thermische Verhalten der Decke.
- Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahlbetons erweist sich die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht einer thermisch aktivierten Decke als nahezu ortsunabhängig. Eine gewisse Welligkeit stellt sich nur während der Beladungszeiten ein. Hierbei liegt der Unterschied zwischen der Oberflächentemperatur direkt unter einem Rohr und jener zwischen jeweils zwei Rohren des Registers bei kleiner Betonüberdeckung (5,0 cm) im Bereich weniger Zehntelgrad. Bei größeren Betonüberdeckungen ist diese Welligkeit auch während der Beladungszeiten nicht mehr auszumachen.
- Im Heizfall steigt die Wärmeabgabeleistung nach Einschalten der Umwälzpumpe bei vorher ausgekühlter Decke stetig an und erreicht nach einem Tag ca. 90% ihres Maximalwerts. Die Betonüberdeckung beeinflusst diesen Anstieg nur wenig und spielt lediglich in den ersten 21 Stunden nach dem Einschaltzeitpunkt eine Rolle. Im Kühlfall steigt die Wärmeaufnahmeleistung der aufgeheizten Decke analog zum Heizfall an und erreicht nach einem Tag ca. 93% ihres Maximalwerts. Auch in diesem Fall erweist sich die Betonüberdeckung als nur wenig wirksamer Parameter.
- Das Auskühlverhalten einer thermisch aktivierten Decke nach endgültiger Abschaltung der Heizmittelzufuhr ist ein im Vergleich zur Aufheizung langsam verlaufender Prozess. Bis die Wärmeabgabeleistung auf 10% ihres Maximalwerts abgesunken ist, vergehen ca. 3 Tage. Nach weiteren 3 Tagen ist die Wärmeabgabeleistung auf 4% ihres ursprünglichen Werts gesunken. Auch im Fall der Kühlung erweist sich das Bild der Aufheizung nach Abschaltung der Kühlmittelzufuhr als analog.
- Aus der Auskühlkurve nach Abschaltung der Heizmittelzufuhr kann auf die Größenordnung der in der Decke gespeicherten Wärmemenge zurückgerechnet werden. Wird dieses Ergebnis durch die Differenz zwischen der Rohrtemperatur und der Solltemperatur im Raum dividiert, so ergibt sich ein Anhaltspunkt für die Wärmekapazität der thermisch aktivierten Decke. Der entsprechende Wert liegt bei einer Plattendicke von 25 cm bei ca. $110 \text{ Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und ist von der Betonüberdeckung – also der Lage des Rohrregisters innerhalb der Deckenplatte – nahezu unabhängig. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Höhenlage des Rohrregisters – ausgedrückt durch die Betonüberdeckung - für die in der Betonplatte gespeicherte Wärmemenge eine nur untergeordnete Rolle spielt. Dieser eher überraschende Effekt ist auf die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahlbetons zurück zu führen.

VI.2 Raumbezogene Betrachtungen

Berechnet wird das thermische Verhalten eines Modellraums, der allein über eine thermisch aktivierte Decke konditioniert wird. Der Modellraum wird dabei derart entworfen, dass sein thermisches Verhalten sowohl unter tiefwinterlichen als auch hochsommerlichen außenklimatischen Bedingungen als kritisch einzustufen ist.

VI.2.1 Auslegung des Rohrregisters

In einem ersten Schritt werden hier die wesentlichen Erkenntnisse der für den Modellraum durchgeführten Heiz- und Kühllastberechnungen präsentiert. Diese Berechnungen sind notwendig, um in der Folge Auslegungsberechnungen in Hinblick auf die erforderlichen Registerflächen durchführen zu können. Die Heiz- und Kühllastberechnungen wurden zwecks Erhöhung der Genauigkeit hier dynamisch, also instationär durchgeführt. Die darauf aufbauenden Berechnungen der erforderlichen Registerflächen sind natürlich stationär, also zeitunabhängig.

Die Berechnungen führen auf folgende Erkenntnisse:

- Die Abhängigkeit sowohl der Heizlast als auch der Kühllast des Modellraums vom Standort des Gebäudes – und damit von den außenklimatischen Verhältnissen – ist wesentlich kleiner als die entsprechende Abhängigkeit von der thermischen Qualität der Gebäudehülle.
- Die thermische Qualität der Gebäudehülle beeinflusst die Heizlast des Modellraums ganz wesentlich. Die Heizlast liegt bei einer gemäß OIB-Richtlinie 6 (10) errichteten Gebäudehülle in etwa dreimal so hoch als bei der Gebäudehülle eines Passivhauses.
- Unter der Voraussetzung, dass die Registerfläche nicht größer als 70% der Deckenfläche sein darf, ergibt sich die Aussage, dass die für die thermische Aktivierung verfügbare Deckenfläche im Fall eines Passivhauses bei weitem ausreicht, um die Heizlast zu decken.

Eine Überdimensionierung der Registerfläche ist in diesem Fall zu empfehlen, da mit einer solchen Maßnahme eine Absenkung der erforderlichen Heizmitteltemperatur bzw. – analog – eine Anhebung der erforderlichen Kühlmitteltemperatur verbunden ist. Die Temperierung der im Rohrregister zirkulierenden Flüssigkeit ist damit mit noch höherer Energieeffizienz möglich.

- Bei einer Gebäudehülle in Niedrigenergiehaus-Standard und einer Lüftung ohne Wärmerückgewinnung ist die Konditionierung mittels einer thermisch aktivierten Decke allein gerade noch möglich. Auch hierbei wird davon ausgegangen, dass nur 70% der Deckenfläche für die thermische Aktivierung zur Verfügung stehen.
- Im Fall einer Gebäudehülle nach der OIB-Richtlinie 6 (10) ist eine Konditionierung des Raums mittels thermischer Aktivierung der Decke alleine nicht möglich. Die aktivierte Deckenfläche vermag in diesem Fall die benötigte Heizleistung im Auslegungsfall nicht bereit zu stellen.
- Für den Sommerfall stellt sich klar heraus, dass die Begrenzung der Überwärmungsneigung des Raums durch gezielte Verschattungsmaßnahmen Vorrang haben muss. Ohne Vorsehen solcher Maßnahmen kann die Sommertauglichkeit durch thermische Aktivierung der Decke nicht gewährleistet werden.

Durch Verwendung von Außenjalousien vor den großen, west gerichteten Fenstertüren sinkt die Kühllast so weit, dass eine Kühlung mittels der thermisch aktivierten Decke in allen Fällen leicht umsetzbar ist.

- Die Auslegung der Registerfläche hat im Fall des untersuchten Modellraums für eine Gebäudehülle in Passivhausqualität unter Zugrundelegung des Sommerfalls zu erfolgen. Bei qualitativ weniger guten Gebäudehüllen ist hingegen die Heizlastberechnung für die Auslegung der Registerflächen heran zu ziehen.

Als Randbedingung für alle oben getroffenen Einschätzungen dient immer die Einhaltung der Forderung, wonach auch im Auslegungsfall der Unterschied zwischen der Oberflächentem-

peratur der thermisch aktivierten Decke und der Solltemperatur im Raum nicht größer als 4,0 K werden darf. Mit Einhaltung dieser Forderung ist die Gewährleistung höchsten thermischen Komforts im Raum verbunden.

Es zeigt sich deutlich, dass die thermische Qualität der Gebäudehülle wesentlichen Einfluss auf die Beantwortung der Frage nach der Möglichkeit einer alleinigen Konditionierung eines Raums über die thermische Aktivierung seiner Decke hat. Für thermisch hochwertige Gebäudehüllen zeigt sich eindeutig, dass die thermische Aktivierung der Decke als alleiniges Instrument zur ganzjährigen Konditionierung eines Raums hervorragend geeignet ist. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass die Hochwertigkeit der Gebäudehülle auch gezielte und hoch wirksame bauliche Maßnahmen zur Begrenzung sommerlicher Überwärmung einschließen muss.

VI.2.2 Thermisches Raumverhalten

In einem zweiten Schritt wird das thermische Raumverhalten im Fall der thermischen Aktivierung von 70% der Deckenfläche untersucht. Im Fokus des Interesses stehen dabei sowohl Aspekte des zu erwartenden Energiebedarfs als auch Aussagen zum thermischen Komfort im Raum. Abgerundet wird diese Thematik durch Beantwortung der Frage nach dem thermischen Raumverhalten bei längerer Unterbrechung der Heiz- oder Kühlmittelzufuhr.

- Ein Vergleich des Energiebedarfs einer rein konvektiv arbeitenden Heizung und Kühlung mit der Heizung und Kühlung mittels thermischer Aktivierung der Deckenfläche führt auf vernachlässigbare Unterschiede.
- Die Tagesschwankung der operativen Temperatur sowohl im Fall der Heizung als auch der Kühlung liegt im Fall der Deckenaktivierung im Bereich weniger Zehntelgrade und kann somit kaum empfunden werden.

Dieses Ergebnis ist insofern bedeutsam und erstaunlich, als angenommen wurde, dass die Rohrtemperatur tageszeitlich konstant ist, somit also keinerlei Regelung stattfindet. Die Einhaltung der gewünschten Temperatur unter solchen Bedingungen ist Ausdruck der ausgezeichneten Selbstregelungsfähigkeit von Flächenheizungen und -kühlungen.

- Der thermische Komfort im Modellraum kann durch Angabe der operativen Temperatur grob beschrieben werden. Weit detailliertere Aussagen werden mittels Berechnung des Strahlungsaustauschs gewonnen. Sowohl im Fall der Heizung als auch der Kühlung zeigt sich für den Fall der thermisch aktivierten Decke, dass die Temperaturverteilung im Aufenthaltsbereich des Modellraums sehr gleichförmig ist. Der Strahlungsaustausch zwischen aktivierter Decke und den inneren Oberflächen der anderen raumbegrenzenden Bauteile verhindert das Auftreten großer Temperaturunterschiede. Diese Ergebnisse zeigen den hohen thermischen Komfort in Räumen mit thermisch aktivierten Decken auf. Insbesondere die Befürchtung, dass bei thermischer Aktivierung der Decke der Fußboden im Winter kalt bleibt, erweist sich als unbegründet.
- Bei Einsatz Erneuerbarer Energien für die Beheizung von Gebäuden stellt sich die Frage, wie sich der thermische Komfort in den Räumen verändert, wenn die Energiequelle über längere Zeit nicht zur Verfügung steht. Anders ausgedrückt stellt sich damit die Frage nach dem Zeitraum ohne Nachheizbedarf für den Fall, dass die Heizmittelzufuhr beendet wird.

Die Beantwortung dieser Frage setzt voraus, dass für den Raum anstelle der Solltemperatur ein Band vom Benutzer akzeptierter Temperaturen tritt. Wird nun angenommen, dass sich die Temperatur im Raum zum Zeitpunkt des Abschaltens der Umwälzpumpe

am oberen Rand des Temperaturbandes befindet, so ergibt sich der gesuchte Zeitraum ohne Nachheizbedarf als Zeitintervall zwischen dem Abschalten der Umwälzpumpe und dem Erreichen der des unteren Rands des Temperaturbandes.

Im Fall der Gebäudehülle in Passivhausqualität zeigt sich für den Modellraum, dass die Zeit ohne Nachheizbedarf sehr stark von der Breite des Temperaturbands abhängt. Der Zeitraum, in dem sich die Raumtemperatur während der Abkühlung innerhalb des Bands akzeptierter Temperaturen liegt, ergibt sich bei einer Bandbreite von 1,0 K zu 75 Stunden und verlängert sich bei einer Bandbreite von 3,0 K bis auf 195 Stunden, also etwas über 8 Tage.

Dieses Ergebnis ist insofern von Bedeutung als sich zeigt, dass bei Passivhäusern mit aktivierten Betondecken auch dann der thermische Komfort in den Räumen gewahrt bleibt, wenn die Verfügbarkeit von Heizwärme über längere Zeit nicht gegeben ist. Dies ist ein Indiz dafür, dass ein solches Gebäude für die Nutzung erneuerbarer Energien ausgezeichnet geeignet ist.

- Im Fall der Kühlung des Modellraums in Passivhausqualität mittels thermisch aktivierter Decke stellt sich die Frage, wie lange es dauert, bis nach Abbruch der Kühlmittelzufuhr der Raum überhitzt. Die Überhitzung wird gemäß ÖNorm B8110-3 (12) als gegeben angesehen, wenn die operative Temperatur im Raum 27 °C übersteigt. Für das Außenklima wird eine lang andauernde Hitzeperiode mit Verhältnissen, die dem Norm-Sommertag entsprechen, angesetzt.

Das Simulationsergebnis zeigt eine stark ausgeprägte Abhängigkeit von Art und Verwendung der Jalousie, die für die Abschattung der West gerichteten Fenstertür und des nach Norden gerichteten Fensters sorgt.

Ohne Jalousieverwendung tritt Überhitzung bereits am 4. Tag nach dem Abschalten der Umwälzpumpe auf. Stehen nur Innenjalousien zur Verfügung und werden diese während der Hitzeperiode konsequent verwendet, so verlängert sich dieser Zeitraum auf ca. eine Woche. Bei ganztägiger Abschattung durch Außenjalousien überhitzt der Raum erst nach 17 Tagen, also nach über 2 Wochen.

Es stellt sich somit heraus, dass bei Reduktion des solaren Eintrags mittels gezielt angesetzter Verschattungsstrategien eine Überwärmung des Raums auch bei lange andauernden Hitzeperioden ohne Zufuhr von Kühlmittel in das Rohrregister vermieden werden kann, wenn vor Beginn der Hitzeperiode mittels Kühlmittelzufuhr die Decke im Kühlmodus betrieben wurde.

Da die Fragestellungen auf instationäre, also zeitabhängige Berechnungsansätze führen, spielt für das thermische Verhalten nicht nur die hohe Wärmeleitfähigkeit, sondern auch das hohe Wärmespeichervermögen der thermisch aktivierten Stahlbetondecke eine tragende Rolle. Wie gezeigt, sorgt dieses hohe Wärmespeichervermögen dafür, dass hoher thermischer Komfort im Raum auch bei sehr unregelmäßiger Zufuhr des Heiz- bzw. Kühlmittels gewahrt bleibt und selbst länger andauernde Unterbrechungen der Heiz- oder Kühlmittelzufuhr kein Problem für die Raumtemperatur darstellen. Diese besondere Eigenschaft von thermisch aktivierten Betondecken kann von haustechnischer Seite her gezielt dafür genutzt werden, Gebäude als Wärmespeicher einzusetzen – siehe (2).

Anhang

Die in Abschnitt V.2.2 präsentierten Ergebnisse von dynamischen Heizlastberechnungen waren auf den in einem Regelgeschoß situierten Modellraum bezogen. Die für die Transmissionswärmeverluste verantwortlichen Außenbauteile sind in diesem Fall die Außenwände sowie das Fenster in der Nordfassade und die Fenstertür in der Westfassade. Liegt der Modellraum hingegen im obersten Geschoß, so kommt die Decke des Modellraums als Außenbauteil dazu. Der zusätzliche Wärmeverlust der thermisch aktivierten Decke nach außen wurde in Abschnitt IV.2 eingehend besprochen, sodass dieser Sonderfall für die Berechnung der vom Heizregister abzugebenden Wärmeleistung bereits ausreichend erfasst ist.

Ein zweiter, als kritisch anzusehender Sonderfall ergibt sich, wenn der Modellraum im Erdgeschoß liegt. In diesem Fall trägt der Wärmeverlust über den Fußboden zu den Transmissionswärmeverlusten des Modellraums bei. Natürlich wird dabei angenommen, dass auch in diesem Fall der Modellraum durch die Decke alleine konditioniert wird. Der Fußboden ist somit unbeheizt. Die Erfassung der Transmissionswärmeverluste über den Fußboden ist im Normalfall nur mittels Wärmebrückenberechnungen mit der erforderlichen Genauigkeit möglich. Anders als bei den mehrdimensionalen Berechnungsmodellen des Berichts handelt es sich dabei aber um unbeheizte Baukonstruktionen. Zum einen bedeutet dies, dass die Behandlung dieser Thematik für die Berechnung der erforderlichen Registerflächen zwar notwendig ist aber nicht im Fokus des Interesses steht. Dies ist auch der Grund für die Verschiebung des Themas in den Anhang. Zum anderen gelten die nachfolgend präsentierten Ergebnisse allgemein und sind somit nicht auf Räume, die mittels Bauteilaktivierung konditioniert sind, beschränkt.

In Hinblick auf die Wärmeverluste über den Fußboden bei Räumen im Erdgeschoß sind vorerst zwei Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall soll der Modellraum gegen einen Keller grenzen, wobei zwischen einem geschlossenen und einem offenen Kellerraum zu unterscheiden ist. Der zweite Fall geht von keiner Unterkellerung aus. Der Modellraum wird somit durch eine Fundamentplatte nach unten hin begrenzt.

Die Berechnungen werden jeweils für den Standort Klagenfurt durchgeführt, wobei zwischen der Ausführung der Gebäudehülle in Niedrigenergiehausqualität und einer in Passivhausqualität unterschieden wird.

A.1 Gebäude unterkellert

Der Fußboden des in Abschnitt V.1 beschriebenen Modellraums soll an einen Keller grenzen. Hierbei werden sowohl der Fall des „offenen“, d. h. eines sehr gut belüfteten Kellers, und der Fall des geschlossenen Kellers untersucht.

A.1.1 offener Keller

Im Fall des offenen Kellers wird die Kellertemperatur mit der Außenlufttemperatur gleichgesetzt (Auslegungstemperatur für Klagenfurt: $-13,5\text{ °C}$). Es ist daher naheliegend, für diesen Fall den Wärmedurchgangskoeffizienten für den Fußboden an jenen der Außenwand anzupassen. Für den Passivhausstandard sollte der Fußbodenaufbau demnach gemäß Tab. 5. 5 einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_f = 0,10\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ erreichen¹². Im Fall des Niedrigenergiehausstandards beträgt der entsprechende Zielwert $U_f = 0,15\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (siehe Tab. 5.4).

¹² Der Index „f“ folgt der in den internationalen Normen festgelegten Konvention, wonach die Wahl der Indices nach dem englischen Begriff – in diesem Fall „floor“ – zu erfolgen hat.

Die Wärmedämmung wird als EPS-Schicht an der Untersicht der Kellerdecke angebracht und soll – wie die Dämmung der Außenwand - eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ aufweisen. Der Schichtaufbau der Kellerdecke im Passivhaus-Standard ergibt sich aus Tab. 4.1 wie folgt.

	d [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	c [$\text{kJkg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
oben				
Bodenbelag (Fliesen)	0,0100	1,000	2000	0,92
Zementestrich	0,0600	1,400	2000	1,13
PE-Folie	0,0002			
Trittschalldämmung	0,0300	0,038	32	1,45
Dampfbremse	0,0004			
Dämmschüttung gebunden	0,1000	0,050	200	1,56
Stahlbetondecke	0,2500	2,000	2400	1,00
Dämmschicht EPS	0,2000	0,031	15	1,40
unten				

Tab. A.1: Schichtaufbau der Kellerdecke (Passivhaus-Standard)

Mit der Dämmschicht von 20 cm Dicke erreicht die Kellerdecke den angestrebten U-Wert von $U_f = 0,10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Im Fall des Niedrigenergie-Standards ($U_f = 0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) ist die für einen U-Wert von $U_f = 0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ erforderliche Dämmschicht mit 10 cm nur halb so dick.

Im Fall der Dämmung der Untersicht der Kellerdecke ergibt sich die Frage, wie die Innenseite der Kellerwand gedämmt ist. Im Folgenden soll angenommen werden, dass die Innenseite der Kellerwand ungedämmt bleibt. Dies stellt den schlechtesten Fall („worst case“) dar und führt letztendlich zu einer Obergrenze der erforderlichen Heizflächen.

Anmerkung: Es wird hier ausdrücklich betont, dass die hier angenommene Ausführung des Anschlusses der Kellerdecke an die Außenwand keine Planungsempfehlung darstellt!

Natürlich muss der Einfluss der zwischen Kellerraum und Modellraum im EG entstehenden Wärmebrücke analysiert und deren Auswirkung auf die Transmissionswärmeverluste in der dynamischen Heizlastberechnung berücksichtigt werden. Hierzu ist eine zweidimensionale Wärmebrückenberechnung notwendig.

Es wird angenommen, dass der Anschluss der Kellerdecke an die Außenwand oberhalb des Erdbodenniveaus liegt, und die Dämmung der Außenwand in Bezug auf ihre Dicke unverändert bleibt.

Anmerkung: Liegt die Kellerdecke in der unmittelbaren Nähe der Erdoberfläche, so ist diese Annahme nicht erfüllt. Durch den Wärmedurchlasswiderstand des in diesem Fall hinzukommenden Erdreichs wird der Wärmeverlust des Modellraums nach außen jedoch reduziert. Es ist damit davon auszugehen, dass unter der getroffenen Annahme höhere Wärmeverluste auftreten als beim Fußboden des Modellraums in Erdbodenniveau. Der Ansatz liegt somit „auf der sicheren Seite“.

Das Berechnungsmodell der Wärmebrückenberechnung ist für den Fall des Passivhauses (20 cm dicke Dämmung der Deckenuntersicht) in folgender Abbildung dargestellt.

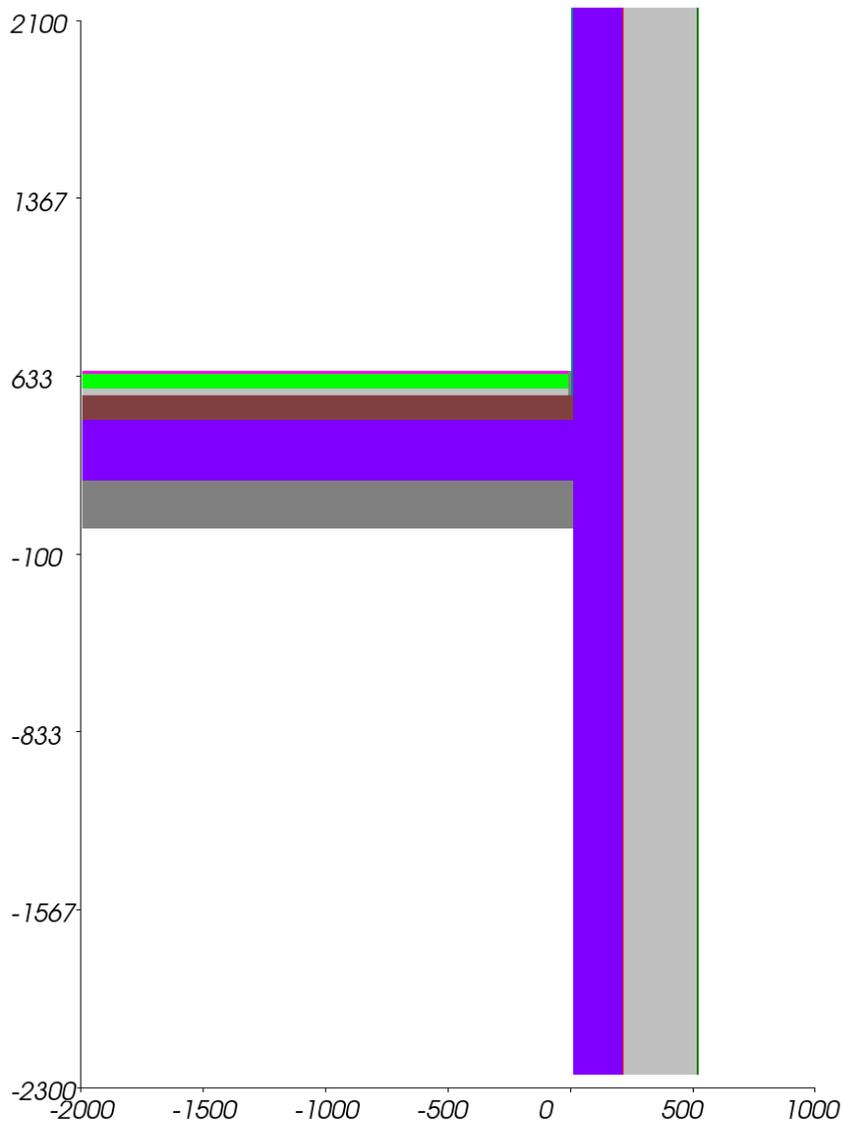


Abb. A.1: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller: Berechnungsmodell für den Anschluss Kellertreue - Außenwand

In Hinblick auf den sich einstellenden Wärmestrom zwischen Modellraum, außen und dem (auf Außenlufttemperatur befindlichen) offenen Kellerraum lässt sich das Berechnungsergebnis prägnant in Form einer Darstellung der Wärmestromlinien zeigen – siehe die folgende Abbildung.

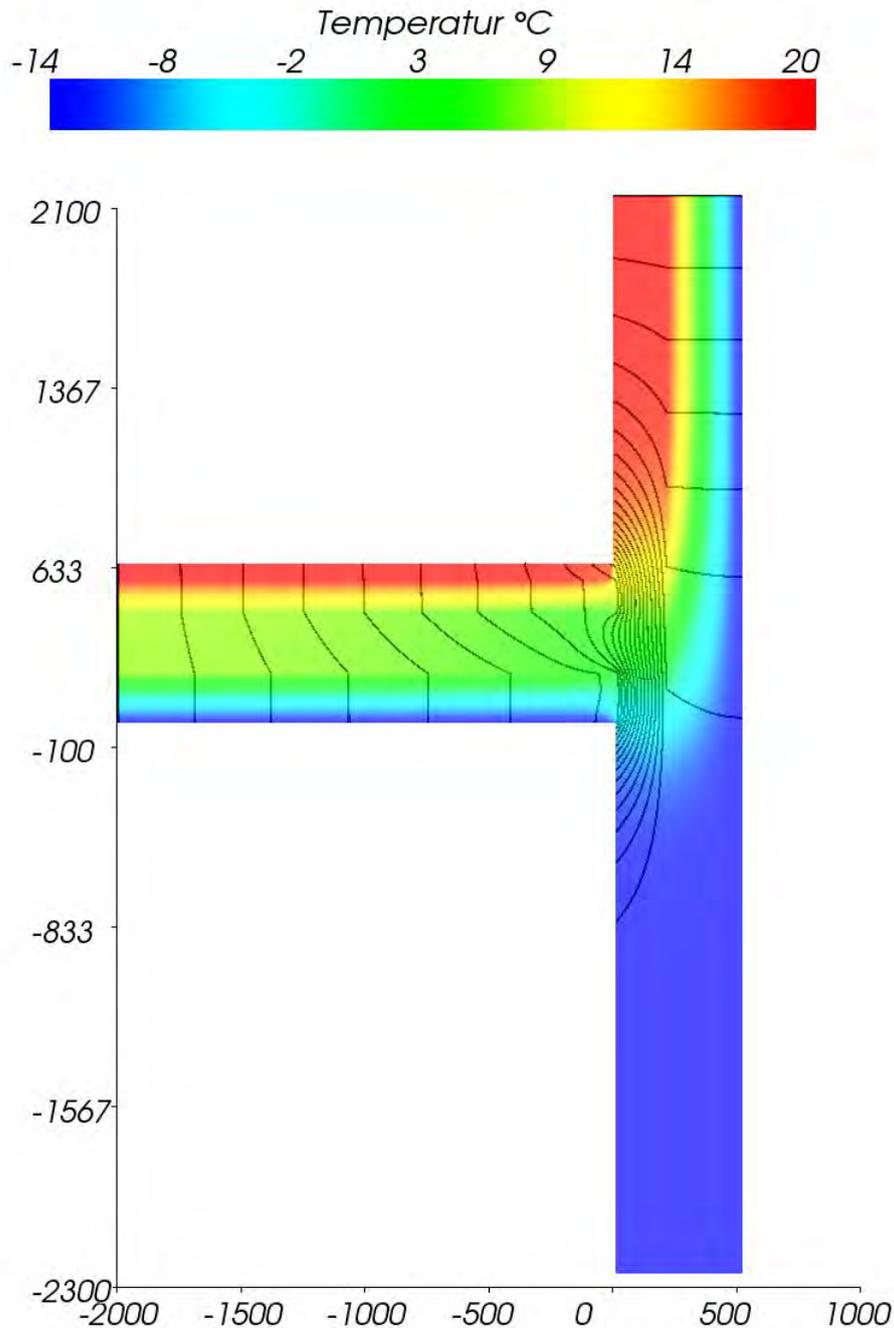


Abb. A.2: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller:

Darstellung der Wärmestromlinien;

Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$

Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $-13,5^\circ\text{C}$,
Außenluft $-13,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Wärmestromlinien zeigen eine ausgeprägte Wärmebrücke zwischen offenem Keller („unten“) und Modellraum im EG („oben“). Die Wirkung der Wärmebrücke auf den Wärmedurchgang wird gerne in Form eines „ ψ -Werts“ beschrieben. Für den in Abb. A.2 gezeigten Fall ergibt sich $\psi = +0,321 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Unter der Annahme, dass die Kellerwand an der Innenseite mit 5 cm Dämmstoff ($\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) gedämmt wird (siehe Abb. A.3), verringert

sich der ψ -Wert auf $\psi = +0,181 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und wird damit fast halbiert. Es zeigt sich somit, dass eine Dämmung der Innenseite der Kellerwand auch mit kleinen Dämmstoffdicken Sinn macht.

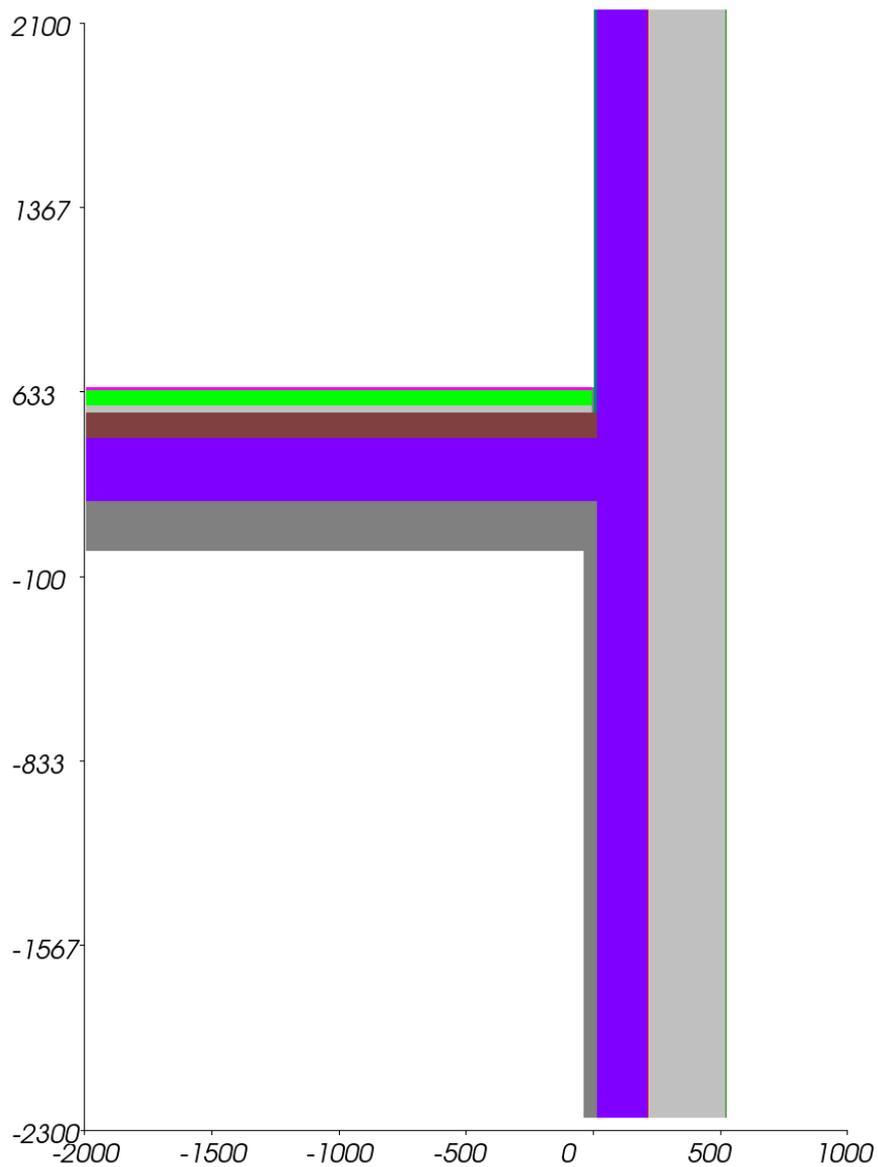


Abb. A.3: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller:
 Berechnungsmodell für den Anschluss Kellerdecke – Außenwand;
Variante 1: 5 cm Innendämmung der Kellerwand

Das Bild der Wärmestromlinien der nächsten Abbildung zeigt die Wirksamkeit der Innendämmung der Kellerwand.

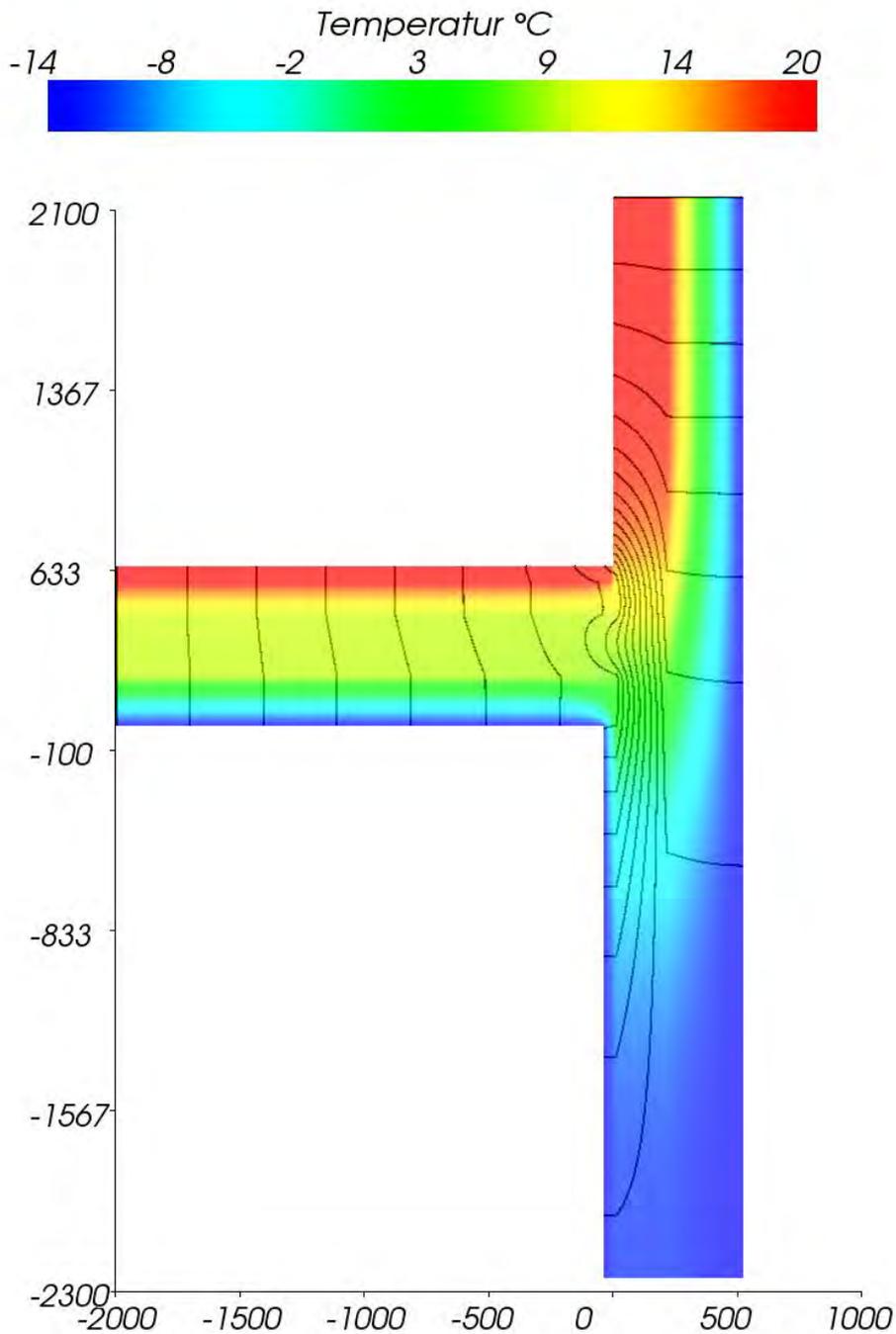


Abb. A.4: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller, Variante 1:
 Darstellung der Wärmestromlinien;
 Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$
 Variante 1: 5 cm dicke Innendämmung der Kellerwand
 Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $-13,5^\circ\text{C}$,
 Außenluft $-13,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Im Vergleich zu Abb. A.2 zeigt sich, dass die Zahl der Wärmestromlinien zwischen EG und KG kleiner geworden ist und damit der Abfluss der Wärme vom Erdgeschoss zum offenen Keller wirksam reduziert wurde.

Im Fall des Niedrigenergie-Standards – also bei Halbierung der Dämmstoffdicke an der Untersicht der Kellerdecke auf 10 cm - ändert sich das Bild der Wärmestromlinien im Fall des Verzichts auf die Innendämmung der Kellerwand wie folgt.

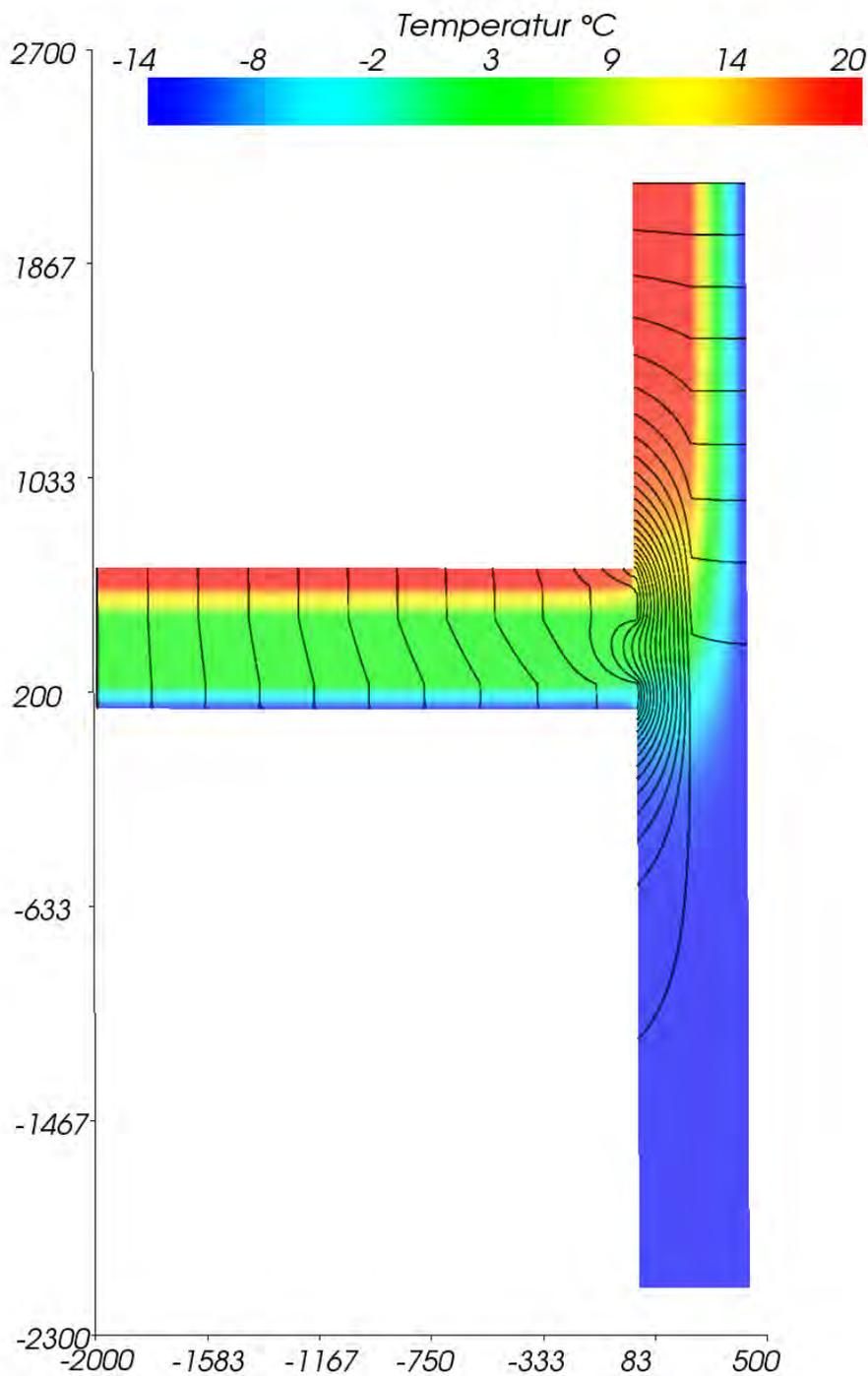


Abb. A.5: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, offener Keller:
 Darstellung der Wärmestromlinien;
 Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$
 Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $-13,5^\circ\text{C}$,
 Außenluft $-13,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Wärmebrücke zeigt sich in diesem Fall noch etwas ausgeprägter. Der ψ -Wert zeigt sich mit $\psi = +0,308 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ allerdings nur wenig verändert.

Bezüglich der Temperatur in der Kante zwischen Fußboden und Außenwand des Modellraums zeigt sich, dass auch ohne innenseitige Dämmung der Kellerwand keine zu tiefen Temperaturen auftreten. Im Fall der Passivhausqualität liegt der Temperaturgewichtungsfaktor mit $f_{Rsi}^* = 0,78$ auch im Fall der Kellerwand ohne Innendämmung (V0) weit über der von der ÖNorm B8110-2 (23) gesetzten Untergrenze von 0,71. Auch im Fall der Niedrigenergiehausqualität (V0) ist der Bauteilanschluss mit $f_{Rsi}^* = 0,74$ in Hinblick auf die Oberflächentemperaturen noch normgemäß.

Die Auswirkung der Wärmebrücke zwischen Kellerraum und Modellraum zeigt sich erst dann deutlich, wenn der thermische Leitwert der Kellerdecke dem durch die Wärmebrücke verursachten Leitwertzuschlag gegenübergestellt wird. Im Fall des Passivhaus-Standards beträgt der Leitwert der Kellerdecke d. h. des Fußbodens des Modellraums

$$L_f = U_f \cdot A_f = 0,10 \cdot 43,343 = 4,334 \text{ WK}^{-1} \quad , \quad \langle A.1 \rangle$$

wobei nach Norm die Flächenermittlung unter Zugrundelegung von Außenabmessungen zu erfolgen hat.

Der Leitwertzuschlag für die Wärmebrücke zwischen Modellraum und offenem Keller ergibt sich als Produkt von ψ -Wert und zugehöriger Länge¹³ zu

$$\Delta L = \psi \cdot l = 0,321 \cdot 13,167 = 4,227 \text{ WK}^{-1} \quad . \quad \langle A.2 \rangle$$

Für den Modellraum zeigt sich somit, dass sich die Wärmeverluste zum offenen Keller in etwa verdoppeln, wenn die Auswirkung der Wärmebrücke zwischen Modellraum und Keller ignoriert wird (siehe Abb. A.1). Wie oben gezeigt, lässt sich der ψ -Wert – und damit der zusätzliche Wärmeverlust über die Wärmebrücke - durch eine 5 cm dicke Wärmedämmschicht auf der Innenseite der Kellerwand fast halbieren.

In der dynamischen Heizlastberechnung muss der Einfluss der Wärmebrücke zwischen Modellraum und Kellerraum natürlich berücksichtigt werden. Um den Einfluss dieser Wärmebrücke auf die Heizlast darzustellen, werden im Folgenden jeweils der Fall der Kellerwand ohne Innendämmung (V0) dem Fall der mit 5 cm innen vollflächig gedämmten Kellerwand (V1) gegenübergestellt. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der dynamischen Heizlastberechnung für eine Gebäudehülle in Passivhausqualität.

¹³ Die Länge ergibt sich als Summe von Länge und Breite des rechteckigen Grundrisses, wobei der Modellierung Außenabmessungen zugrunde zu legen sind. Für die Innenwände werden Achsmaße herangezogen.

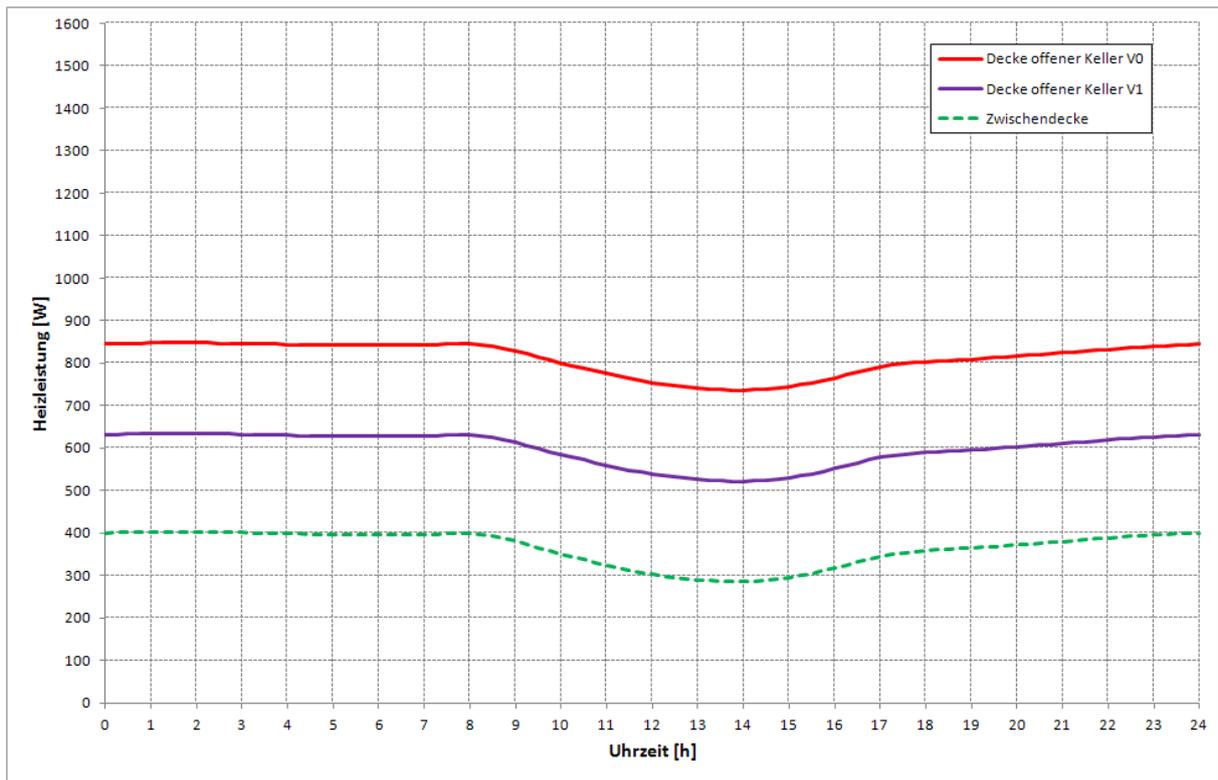


Abb. A.6: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt; **Passivhausniveau**; Modellraum über offenem Keller
V0 ... keine Innendämmung der Kellerwand
V1 ... Kellerwand mit 5 cm innen liegender Wärmedämmung

Im Vergleich zum Modellraum im Regelgeschoß (gestrichelte Linie in Abb. A.6) erhöht sich die erforderliche Heizleistung für den Modellraum über einem offenen Kellergeschoß erheblich. Auffallend ist, dass die Innendämmung der Kellerwand (V1) die erforderliche Heizleistung stark beeinflusst. Bereits eine Dämmschicht von 5 cm Dicke führt zu einer ca. 25%igen Reduktion der Heizlast.

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der dynamischen Heizlastberechnung für den Fall der Gebäudehülle in Niedrigenergiehaus-Niveau.

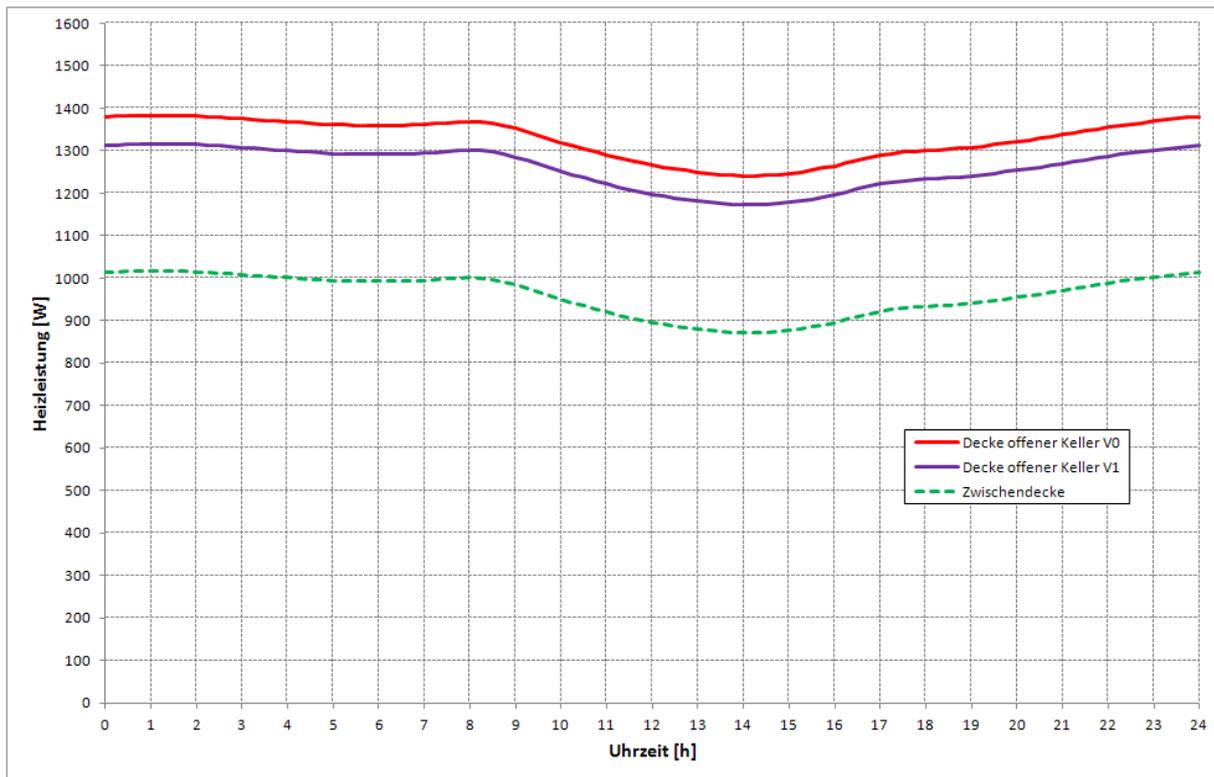


Abb. A.7: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt; **Niedrigenergiehausniveau**; Modellraum über offenem Keller
 V0 ... keine Innendämmung der Kellerwand
 V1 ... Kellerwand mit 5 cm innen liegender Wärmedämmung

Auch hier zeigt sich eine deutliche Erhöhung der erforderlichen Heizleistungen für den Fall des im Erdgeschoß über einem offenen Kellerraum befindlichen Modellraums. Aufgrund der im Vergleich zum Passivhaus höheren Wärmeverluste wirkt sich die Innendämmung der Kellerwand (V1) mit einer Reduktion der Heizlast von 5% deutlich weniger stark aus.

Die gesuchte Heizlast ist mit dem Maximum des berechneten Tagesverlaufs der am Auslegungstag benötigten Heizleistung gegeben. Die folgende Tabelle zeigt die berechneten Heizlasten in Abhängigkeit von der thermischen Qualität der Gebäudehülle und der Lage des Modellraums. Zudem wird zwischen dem Fall der innen nicht gedämmten Kellerwand (V0) und der mit 5 cm innen gedämmten Kellerwand (V1) unterschieden.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus
Modellraum im Regelgeschoß	403,3	1016,9
Modellraum über offenem Keller V0	848,1	1383,8
Modellraum über offenem Keller V1	634,4	1316,3

Tab. A.2: Für den Modellraum berechnete Heizlasten in Watt; Standort Klagenfurt

Für die Berechnung der erforderlichen Registerflächen werden die Annahmen des Abschnitts V.2.2.1 übernommen. Die Solltemperatur im Modellraum wird mit $\Theta_u = 20 \text{ °C}$, die maximal erreichbare Heizmitteltemperatur mit $\Theta_r = 30 \text{ °C}$ angesetzt.

In Hinblick auf das Rohrregister wird angenommen, dass der Achsabstand der Rohre 15 cm, der Außendurchmesser des Rohrs 17 mm (Rohr 17 x 2,0) und die Betonüberdeckung 50 mm beträgt. Unter diesen Annahmen ergibt sich der flächenbezogene Leitwert zwischen Rohrre-

gister und Modellraum mittels Zugriff auf die Regressionskoeffizienten der Tab. 4.7 zu $\Lambda_{r,u} = 4,5267 \cdot 0,15^2 - 8,0363 \cdot 0,15 + 5,7018 = 4,5982 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Die folgende Tab. A.3 zeigt die unter den skizzierten Berechnungsannahmen errechneten Registerflächen.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus
Modellraum im Regelgeschoß	8,77	22,12
Modellraum über offenem Keller V0	18,44	30,10
Modellraum über offenem Keller V1	13,80	28,63

Tab. A.3: Für den Modellraum aus der Heizlast errechnete Registerflächen in m^2

Es zeigt sich, dass der Modellraum bei passivhaustauglicher Gebäudehülle ohne weiteres allein über die Decke beheizt werden kann, auch wenn er im Erdgeschoß über einem offenen Keller liegt. Ein Verzicht auf die Innendämmung der Kellerwand schlägt sich in diesem Fall in einer um ca. 5 m^2 größeren Registerfläche nieder. Natürlich sollte bei der Passivhausplanung die Auswirkung der Wärmebrücke zwischen Erdgeschoß und Kellerraum durch geeignete Planungsmaßnahmen klein gehalten werden. Eine Ausführung des Bauteilanschlusses gemäß Variante 0 sollte jedenfalls vermieden werden.

Wie nicht anders zu erwarten, übersteigt im Fall einer Gebäudehülle in Niedrigenergiehausqualität die für den Modellraum im Erdgeschoß unter den getroffenen Annahmen errechnete Registerfläche den angesetzten Maximalwert von $24,5 \text{ m}^2$ deutlich.

Bei Verkleinerung des Rohrabstands auf 10 cm steigt der Wert des flächenbezogenen Leitwerts auf $\Lambda_{r,u} = 4,9434 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Bei innen gedämmter Kellerwand ergibt sich in diesem Fall eine erforderliche Registerfläche von $26,63 \text{ m}^2$. Die Verringerung des Rohrabstands allein stellt somit keine Lösung dar.

Bereits eine Erhöhung der maximalen Heizmitteltemperatur auf $31 \text{ }^\circ\text{C}$ genügt, um bei 10 cm Rohrabstand mit einer Registerfläche von $24,21 \text{ m}^2$ die Heizlast zu decken. Bleibt der Achsabstand der Rohre hingegen bei 15 cm , so ist eine Erhöhung der Heizmitteltemperatur auf $32 \text{ }^\circ\text{C}$ notwendig (Registerfläche: $23,86 \text{ m}^2$). In allen Fällen wird hierbei davon ausgegangen, dass die Kellerwand innen vollflächig 5 cm dick gedämmt ist (V1).

Conclusio:

Für die Ermittlung der Registerflächen im Fall der Lage des Modellraums über einem offenen Keller wurde angenommen, dass die Deckenuntersicht der Kellerdecke (und damit des Fußbodens des Modellraums) im Fall des Passivhauses mit einer 20 cm dicken Dämmplatte wärmegeklämt wird. Für den Fall des Niedrigenergiehauses wird angenommen, dass die Dämmplatte mit 10 cm nur noch halb so dick ist. Unter diesen Annahmen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Bei einer Gebäudehülle in Passivhausqualität sind die erforderlichen Registerflächen weitaus kleiner als die mit $24,5 \text{ m}^2$ angesetzte Obergrenze. Der Modellraum im EG kann somit problemlos allein über die Decke beheizt werden.
- Eine an der Kellerwand innen aufgebraachte Dämmschicht von 5 cm Dicke vermag die erforderliche Registerfläche um ca. 5 m^2 zu verkleinern und ist damit unbedingt zu empfehlen.

- Im Fall der Gebäudehülle in Niedrigenergiehausqualität sind die erforderlichen Registerflächen größer als die mit $24,5 \text{ m}^2$ angesetzte Obergrenze. Der Modellraum im EG kann in diesem Fall nur dann allein über die Decke beheizt werden, wenn die maximale Heizmitteltemperatur auf 32 °C erhöht wird.
- Bei Niedrigenergiehausqualität bewirkt das Aufbringen einer 5 cm dicken Wärmedämmschicht eine Verkleinerung der erforderlichen Registerfläche um ca. $1,5 \text{ m}^2$.

A.1.2 Sonderfall: Tiefgarage

Insbesondere im Spezialfall des als Tiefgarage genutzten offenen Kellerraums stellt sich aus Platzgründen die Frage, ob es unbedingt notwendig ist, die Innendämmung der Außenwand bis zum Kellerboden – d. h. vollflächig – aufzubringen. Zudem interessiert die Auswirkung einer Veränderung der Dicke der an die Außenwand innenseitig aufgetragenen Wärmedämmung auf die Wärmeverluste zur Tiefgarage.

Diese Fragen können mittels Parameterstudien beantwortet werden. Zum einen wird dabei angenommen, dass eine Platte aus Wärmedämmstoff an der Innenseite der Außenwand angebracht wird. Als Parameter dieser Studie geht die Höhe h der Dämmstoffplatte, gemessen von der Unterseite der Dämmung der Kellerdecke, ein. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch drei Berechnungsmodelle für ein Gebäude in Passivhausqualität. Die Dicke der Innendämmung der Kellerwand wurde hierbei mit 10 cm angenommen.

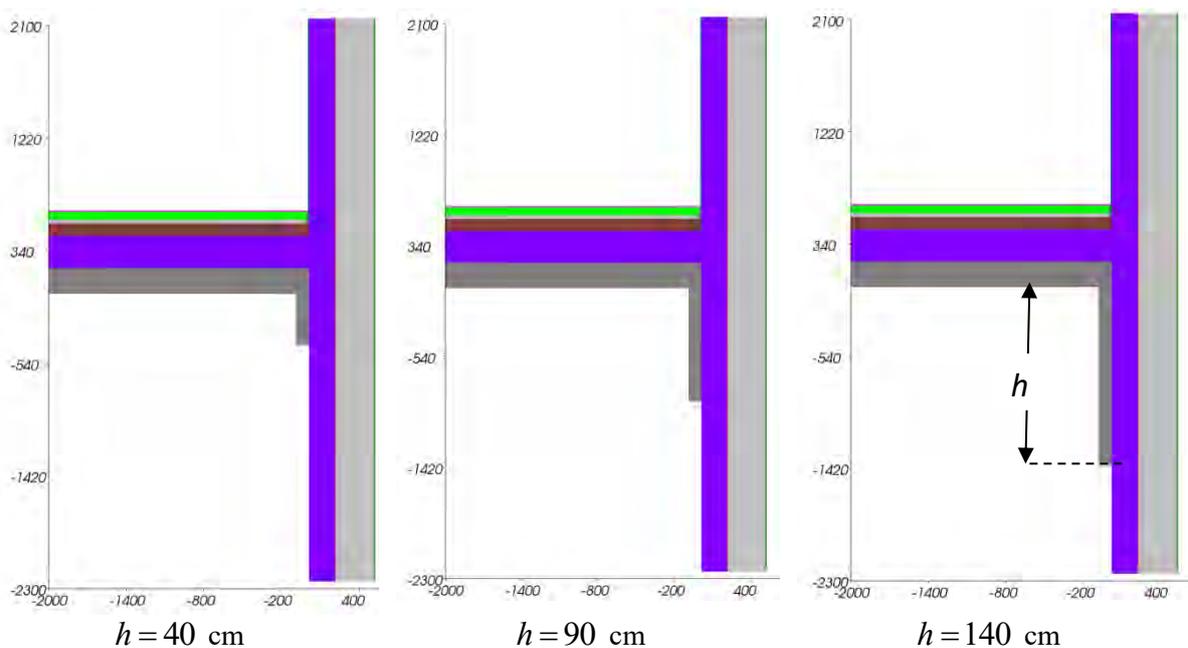


Abb. A.8: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage;
Berechnungsmodelle für verschiedene Höhen der innen liegenden Dämmstoffplatte

Neben der Höhe der Dämmstoffplatte wird im Zuge der Parameterstudie auch die Dicke der Dämmstoffplatte variiert (5 cm , 10 cm und 15 cm). Als Dämmstoff wird – wie bisher - EPS mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ angenommen. Der Aufbau der Kellerdecke stimmt mit jenem von Tab. A.1 überein.

Die folgende Abbildung zeigt als Ergebnis der Parameterstudien die Abhängigkeit des ψ -Werts für die Wärmebrücke zwischen EG und Tiefgarage in Abhängigkeit von der Höhe h der Dämmstoffplatte einerseits und der Dicke der Dämmstoffplatte andererseits.

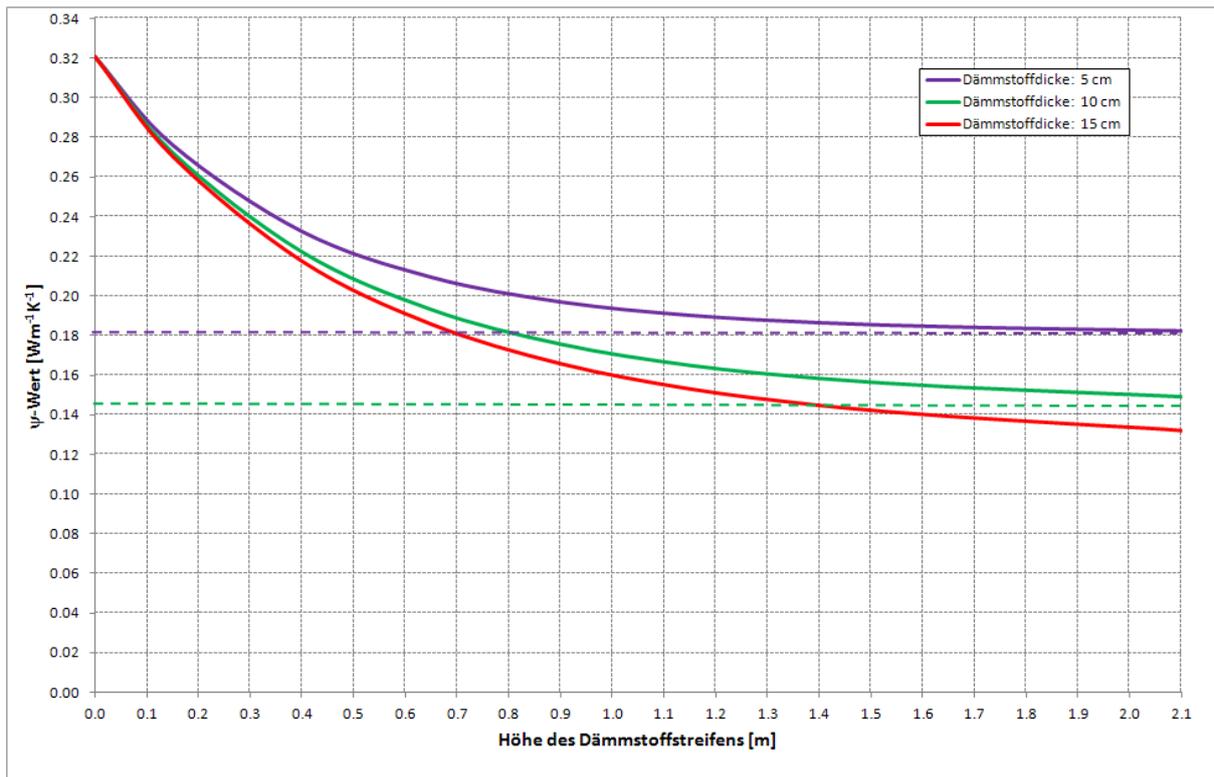


Abb. A.9: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage;
Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der innenseitig auf die Kellerwand
aufgebrachten Dämmstoffplatte

Die berechneten Kurven zeigen bei kleinen Höhen der Dämmstoffplatte eine deutlich größere Steigung als bei großen Höhen. Dies zeigt, dass eine gute Dämmung im oberen Bereich der Kellerwand wesentlich wichtiger und wirksamer ist als das Herunterziehen der Innendämmung in die weiter unten liegenden Bereiche der Kellerwand.

Als ein weiteres wichtiges Ergebnis stellt sich heraus, dass die bisher untersuchte vollflächige Innendämmung der Kellerwand mit Dämmplatten von 5 cm Dicke (lila, strichlierte Linie) die gleiche Wirkung hat wie Dämmstoffplatten von 10 cm Dicke und einer Höhe von nur 81 cm – siehe den Schnittpunkt zwischen grüner, durchgezogener und lila, strichlierter Linie.

Eine weitere Erhöhung der Dämmstoffdicke auf 15 cm bringt hingegen vergleichsweise wenig: Um die gleiche Wirkung wie die vollflächige, 5 cm dicke Dämmung zu erreichen, kann die Höhe der 15 cm dicken Dämmstoffplatte zwar auf 70 cm verkleinert werden. Im Vergleich zu einer vollflächigen, 10 cm dicken Dämmung (grüne, strichlierte Linie) müsste die 15 cm dicke Dämmstoffplatte aber doch 1,4 m hoch sein.

Der Leitwertzuschlag ΔL ergibt sich immer als Produkt von ψ -Wert und zugehöriger Länge – siehe z. B. Gleichung <A.2>. Im hier betrachteten Fall des Anschlusses zwischen Außen- bzw. Kellerwand und Kellerdecke ist diese zugehörige Länge der Umfang (Perimeter) des Gebäudes, ermittelt unter Verwendung von Außenabmessungen. Da sich diese Länge bei den hier betrachteten Varianten in Hinblick auf die Innendämmung der Kellerwand nicht ändert, ist in diesem speziellen Fall die Reduktion des ψ -Werts mit der Reduktion des Wärmeverlusts äquivalent. Es macht somit Sinn, ψ -Werte direkt zu vergleichen – siehe die folgende Tabelle.

	ψ -Wert [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	
Kellerwand ungedämmt	0,321	100%
Innendämmung, 5 cm dick, 90 cm hoch	0,197	61,4
Vollflächige Innendämmung 5 cm dick	0,181	56,4
Innendämmung, 10 cm dick, 90 cm hoch	0,176	54,8
Vollflächige Innendämmung 10 cm dick	0,144	44,8
Innendämmung, 15 cm dick, 90 cm hoch	0,166	51,7
Vollflächige Innendämmung 15 cm dick	0,122	38,1

Tab. A.4: Vergleich der errechneten ψ -Werte; **Passivhausniveau**

Die Durchführung der entsprechenden Parameterstudie für ein Gebäude in Niedrigenergiehaus-Niveau unterscheidet sich von der soeben gezeigten Parameterstudie nur dadurch, dass die Kellerdecke unterseitig mit 10 cm Dämmstoff ($\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) gedämmt ist und die Dämmstoffdicke der Außenwand von 30 cm auf 20 cm reduziert wird. In Hinblick auf die Dicke des innenseitig an der Kellerwand angebrachten Dämmstoffstreifens wird diese nur zwischen 5 und 10 cm in drei Schritten (5, 7, und 10 cm) variiert. Das Ergebnis dieser Parameterstudie zeigt die folgende Abbildung.

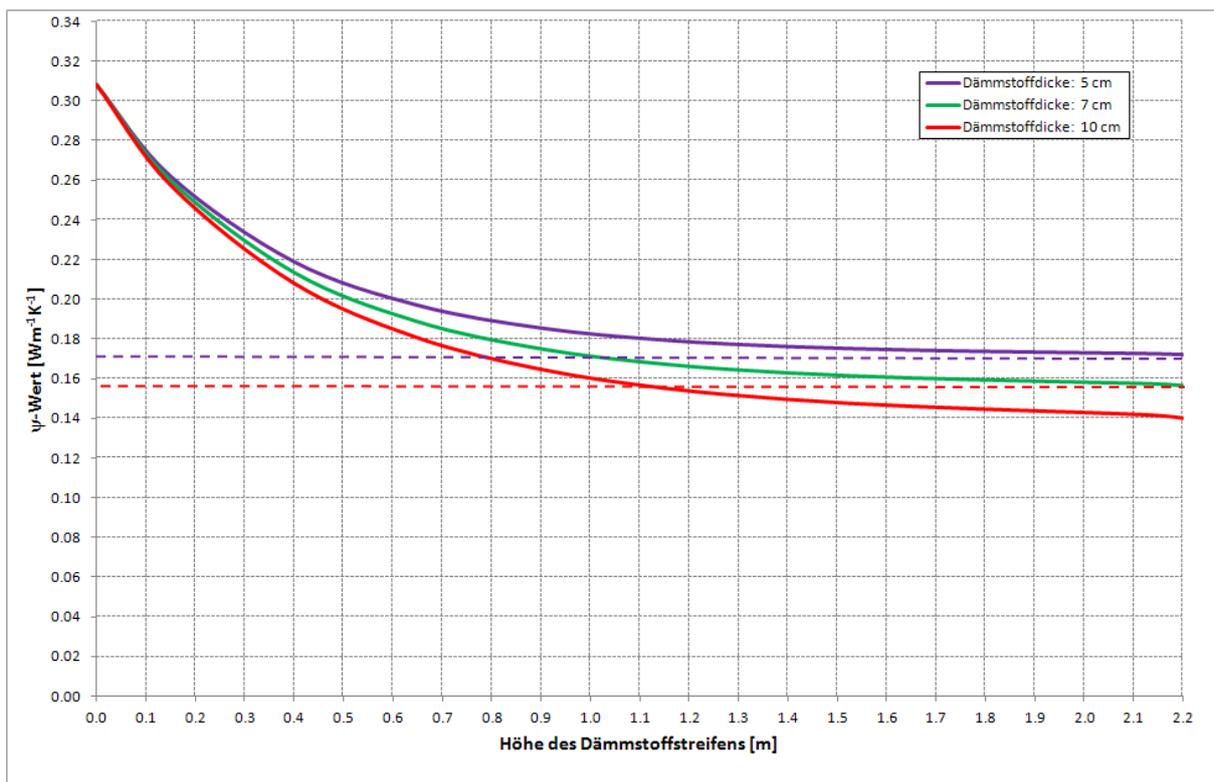


Abb. A.10: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, offener Keller / Tiefgarage; Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der innenseitig auf die Kellerwand aufgetragenen Dämmstoffplatte

Es zeigt sich, dass die Dämmwirkung einer 5 cm dicken, vollflächig angebrachten Innendämmung (siehe die strichlierte lila Linie) bei Erhöhung der Dämmstoffdicke auf 7 cm (rote Linie) bereits durch einen 101 cm hohen Dämmstoffstreifen erreicht wird. Bei Erhöhung der

Dämmstoff-Dicke auf 10 cm (grüne Linie) kann die Höhe dieses Dämmstoffstreifens bei gleicher Dämmwirkung auf ca. 75 cm reduziert werden.

In der folgenden Tabelle sind die errechneten ψ -Werte für verschiedene Szenarien in Hinblick auf die Innendämmung der Kellerwand aufgelistet.

	ψ -Wert [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	
Kellerwand ungedämmt	0,308	100%
Innendämmung, 5 cm dick, 90 cm hoch	0,185	60,2
Vollflächige Innendämmung 5 cm dick	0,171	55,6
Innendämmung, 7 cm dick, 90 cm hoch	0,175	56,8
Vollflächige Innendämmung 7 cm dick	0,155	50,4
Innendämmung, 10 cm dick, 90 cm hoch	0,165	53,5
Vollflächige Innendämmung 10 cm dick	0,138	44,8

Tab. A. 5: Vergleich der errechneten ψ -Werte; **Niedrigenergiehausniveau**

Aus statischen Gründen sind in Tiefgaragen auch Säulen oder Innenwände in Form von Betonscheiben vorhanden. Sowohl die Säulen als auch die Innenwände durchstoßen die Wärmedämmung an der Unterseite der Kellerdecke und führen als Wärmebrücken zu erhöhten Wärmeverlusten. Aufgrund ihrer Längserstreckung werden im Normalfall die Innenwände in Hinblick auf den erhöhten Wärmeverlust des Erdgeschoßes an die Tiefgarage eine größere Rolle spielen als vereinzelt vorkommende Säulen. Im Folgenden werden daher ψ -Werte für die Innenwände mittels zweidimensionaler Modellierung berechnet. Die folgende Abbildung zeigt einen Vertikalschnitt durch den Anschluss einer 20 cm dicken Betonscheibe an die Kellerdecke für den Fall des Passivhauses.

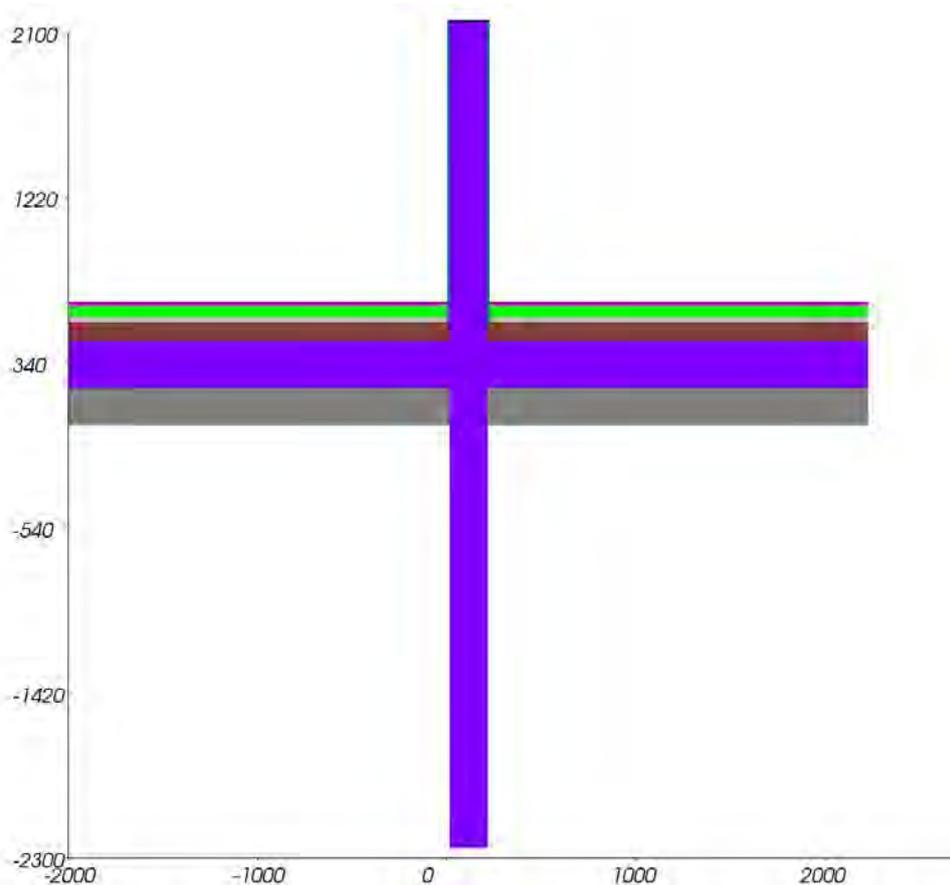


Abb. A.11: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage:
 Berechnungsmodell für den Anschluss Kellerdecke – Innenwand

Im Vergleich zum bisher untersuchten Fall des Anschlusses der Kellerdecke an die Außen- und die Kellerwand wird im Fall der Innenwand die Betonscheibe an beiden Seiten von der Luft in der Tiefgarage umspült. Natürlich wird auch hier an der Annahme festgehalten, dass aufgrund des sehr hohen Lüftungserfordernisses die Temperatur in der Tiefgarage mit der Außenlufttemperatur gleichgesetzt wird. Die folgende Abbildung zeigt als Ergebnis der zweidimensionalen Berechnung ein Falschfarbenbild mit eingezeichneten Wärmestromlinien für das in Abb. A.11 gezeigte Modell.

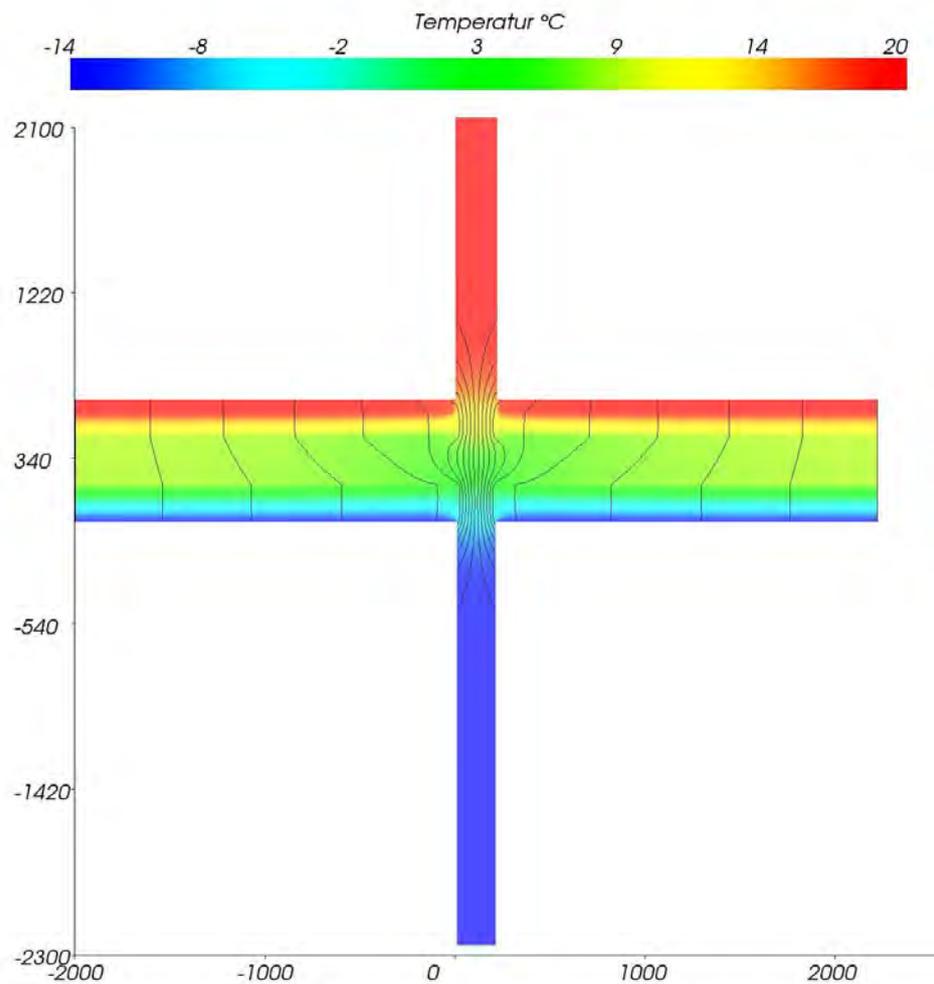


Abb. A.12: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage:

Darstellung der Temperaturverteilung und der Wärmestromlinien;

Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,5 \text{ Wm}^{-1}$

Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $-13,5^\circ\text{C}$

Die ausgeprägte Wärmebrücke führt zu einem stark erhöhten Wärmeabfluss vom Erdgeschoß in die Tiefgarage. Obzwar sich der untersuchte Bauteilanschluss in Hinblick auf die Oberflächentemperaturen im Erdgeschoß mit $f_{\text{Rsi}}^* = 0,81$ als unkritisch und der ÖNorm B8110-2 entsprechend erweist, ist es angezeigt zu untersuchen, wie gut sich der Wärmeabfluss zur Tiefgarage mittels Wärmedämm-Maßnahmen reduzieren lässt.

Ohne Dämmung der Innenwand beträgt der ψ -Wert $0,505 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und ist damit wesentlich größer als jener für den Anschluss der Kellerwand an die Kellerdecke ($\psi = 0,321 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist allerdings zu beachten, dass der Leitwertzuschlag immer das Produkt von ψ -Wert und zugehöriger Länge ist. Diese Länge wird immer senkrecht zum Schnitt, für den gerechnet wurde, gemessen und ist damit mit der Längserstreckung der Innenwand identisch.

Ähnlich wie beim Anschluss der Kellerdecke an Keller- und Außenwand werden auch für den Fall der Innenwand Parameterstudien mit der Höhe und der Dicke der Dämmstoffplatte als Parameter durchgeführt. Natürlich wird hierbei angenommen, dass die Dämmstoffplatte an beiden Seiten der Betonscheibe angebracht wird – siehe die folgende Abbildung.

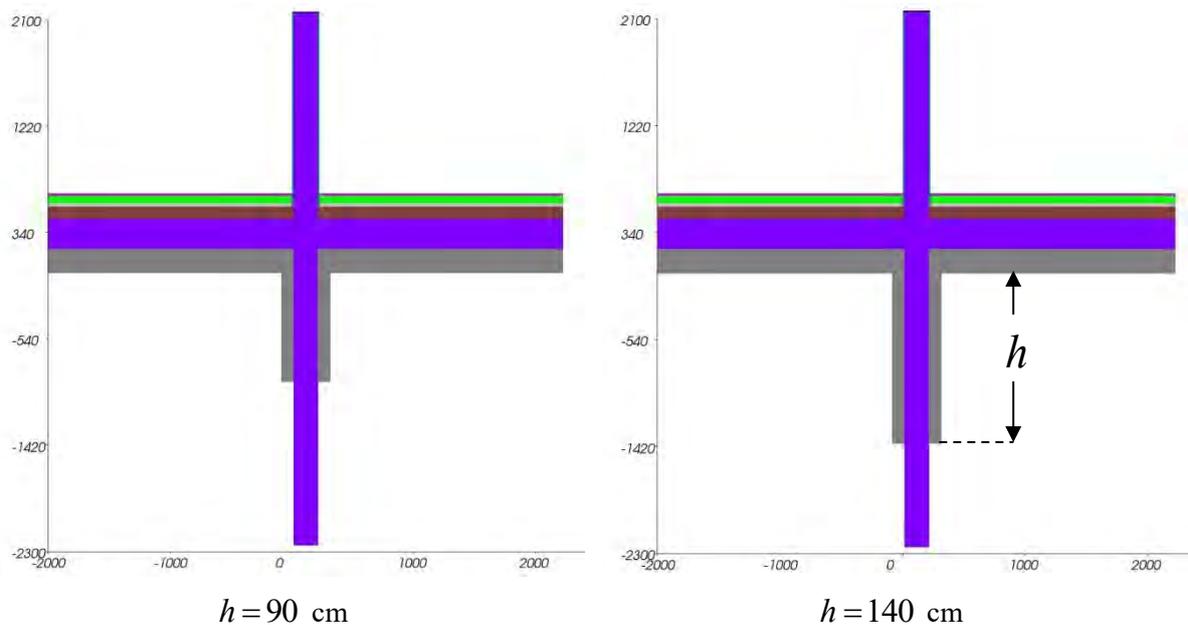


Abb. A.13: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage / Innenwand:
Berechnungsmodelle für verschiedene Höhen der beiden Dämmstoffplatten

Für das Gebäude mit Passivhausqualität wird – wie beim Anschluss der Kellerwand an die Kellerdecke – die Dicke der beiderseitig an die Innenwand angebrachten Dämmstoffplatten variiert (5, 10 und 15 cm). Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse dieser Parameterstudien in Form eines Diagramms.

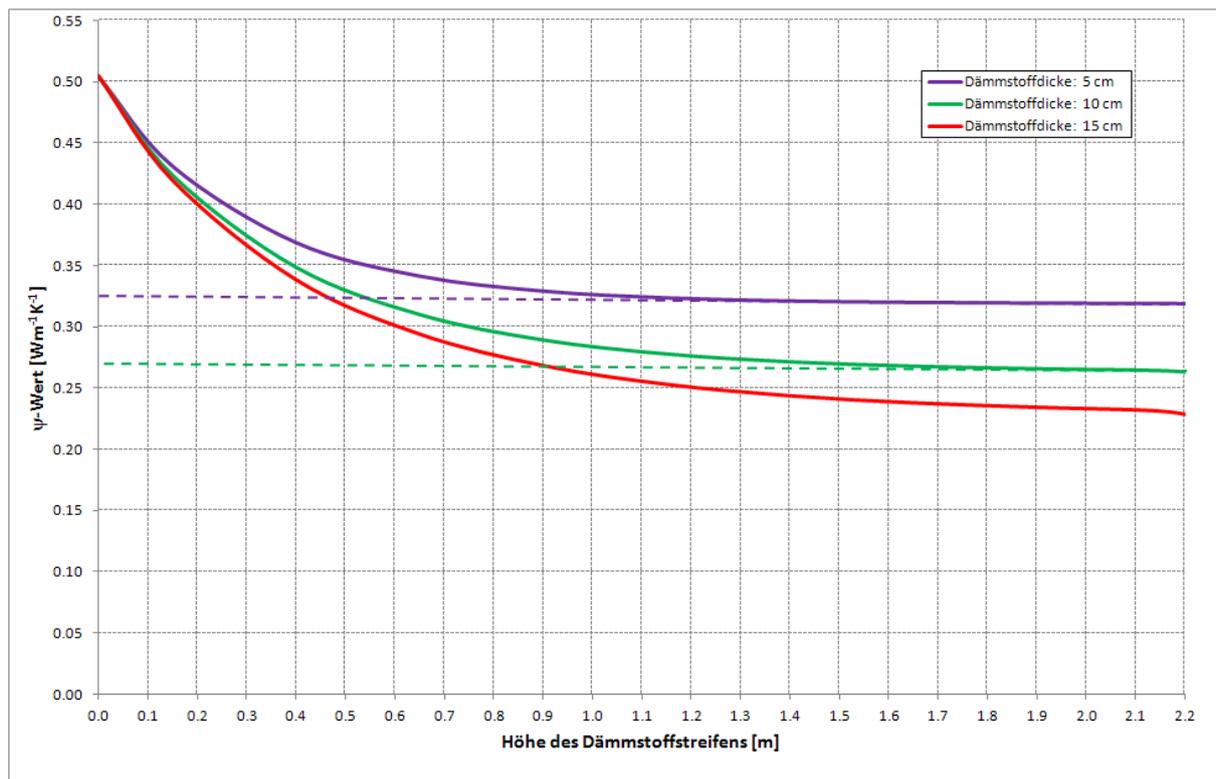


Abb. A.14: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage / Innenwand:
 Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der innenseitig auf die Innenwand beiderseitig aufgetragenen Dämmstoffplatte

Auffallend ist, dass bei kleiner Dämmstoffdicke (5 cm; lila Linie) der ψ -Wert sich bei Höhen größer als 1,2 m nicht mehr verändert. Es ist damit nur aufwändig, aber ohne jede Wirkung, wenn die Betonscheibe z. B. vollflächig gedämmt wird. Bei ansteigender Dämmstoffdicke tritt dieser Effekt erst bei größeren Höhen der Dämmstoffplatten auf.

Bei Vergrößerung der Dicke der Dämmstoffplatten von 5 cm auf 10 cm ist bereits eine Plattenhöhe von 55 cm ausreichend, um den Effekt einer vollflächigen, 5 cm dicken Dämmung zu erreichen. Bei einer Dämmstoffdicke von 15 cm kann die Plattenhöhe sogar auf 45 cm reduziert werden.

Der Fall eines Gebäudes in Niedrigenergiebauweise unterscheidet sich vom soeben diskutierten Fall des Passivhauses nur insofern als die Deckenunterseite der Tiefgarage mit Dämmstoff von nur 10 cm Dicke (Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) wärmege-dämmt ist. In der Parameterstudie wird in diesem Fall – analog zur Untersuchung des Anschlusses der Kellerdecke an die Außenwand – die Dicke des beiderseitig an der Innenwand angebrachten Dämmstoffstreifens zwischen 5 und 10 cm variiert (5, 7 und 10 cm). Als Ergebnis dieser Parameterstudie zeigt die folgende Abbildung die Abhängigkeit des ψ -Werts von der Höhe h des Dämmstoffstreifens.

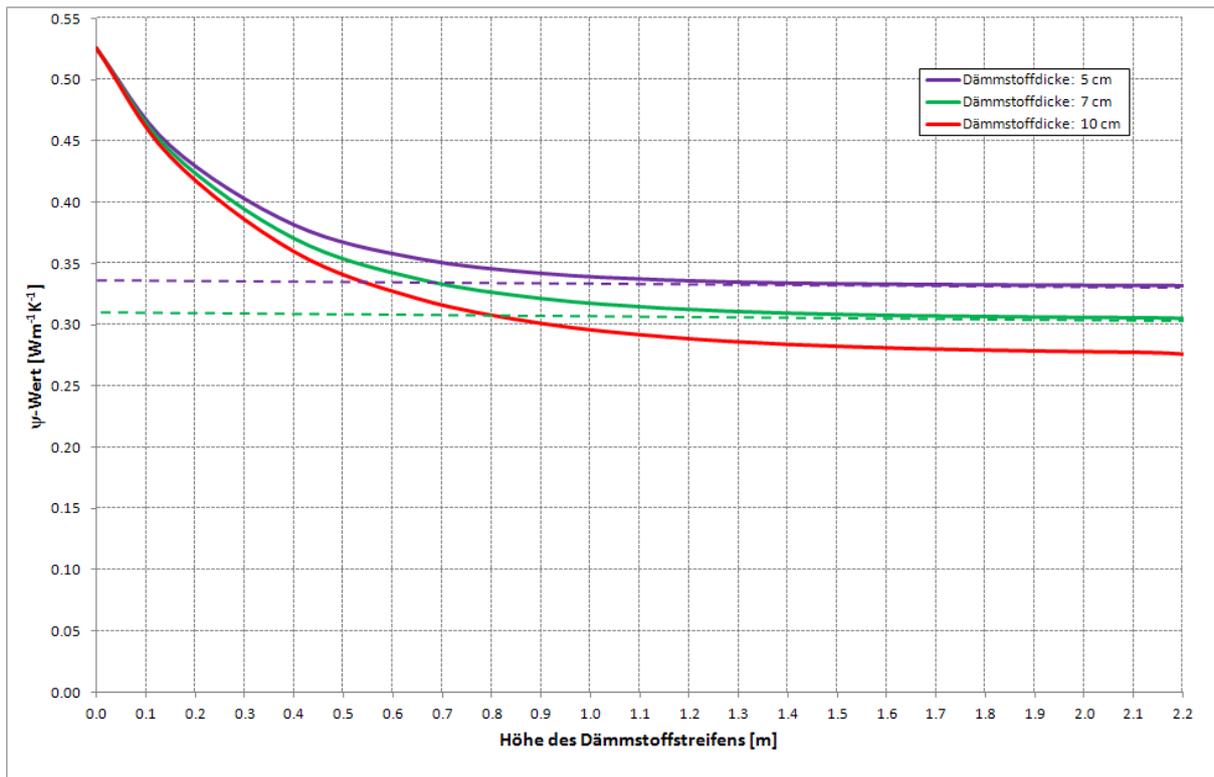


Abb. A.15: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, offener Keller / Tiefgarage / Innenwand: Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der auf die Innenwand beiderseitig aufgetragenen Dämmstoffplatte

Auch hier zeigt sich deutlich, dass bei einer Dämmstoffdicke von 5 cm (lila Linie) eine Vergrößerung der Höhe des Dämmstoffstreifens über 1,2 m fast keine Auswirkung auf den Wärmeabfluss vom EG in die Tiefgarage mehr hat. Insbesondere eine vollflächige Dämmung der Innenwand erweist sich somit als weder wirkungs- noch sinnvoll.

Abb. A.15 zeigt zudem, dass bereits die kleine Erhöhung der Dämmstoffdicke von 5 cm auf 7 cm eine deutliche Reduzierung der Höhe des Dämmstoffstreifens bei gleichbleibender Dämmwirkung erlaubt. Im Vergleich zur vollflächigen Dämmung (gleichbedeutend mit einer Höhe des Dämmstoffstreifens von 1,2 m) bei 5 cm Dämmstoffdicke kann für eine Dämmstoffplatte mit 7 cm Dicke deren Höhe auf 70 cm reduziert werden. Bei einer Dämmstoffdicke von 10 cm führt eine Reduktion der Plattenhöhe auf 50 cm auf einen nur unwesentlich höheren Wärmeverlust.

Die Wirkung einer vollflächigen Dämmung mit 7 cm Plattendicke (grüne, gestrichelte Linie) lässt sich gemäß Abb. A.15 auch mit einer Schicht von 80 cm Höhe erreichen, wenn die Dämmstoffdicke auf 10 cm erhöht wird.

Conclusio:

Für den Fall von über einer Tiefgarage situierten Erdgeschoßwohnungen wurden Spezialuntersuchungen über die Anforderungen an die an Außen- und Innenwänden in der Tiefgarage anzubringende Innendämmung durchgeführt. Insbesondere interessiert in diesem Zusammenhang die Frage, ob eine vollflächige - also bis zum Kellerfußboden hinab reichende - innen liegende Dämmschicht vermieden werden kann. Die zur Beantwortung dieser Frage durchgeführten Parameterstudien führen auf folgende Ergebnisse:

- Die Vergrößerung der Höhe eines an die Dämmung der Decke anschließenden Dämmstoffstreifens ist bei kleinen Werten – d. h. Dämmstoffstreifen, die bereits in der oberen Hälfte der Tiefgarage enden – wesentlich wirkungsvoller als bei größeren Höhen. Insbesondere die vollflächige Innendämmung der Außen- und Innenwände der Tiefgarage erweist sich als wenig sinnvoll.
- Durch Erhöhung der Dämmstoffdicke ist es möglich, bereits bei relativ kleinen Höhen von im oberen Raumdrittel situierten Dämmstoffstreifen die gleiche Dämmwirkung zu erreichen, wie für eine dünnere, vollflächig verlegte Innendämmung.
- Im Fall des Anschlusses der Außenwand an die Decke der Tiefgarage ist die in Abschnitt A.1.1 errechnete Wirkung einer 5 cm dicken vollflächigen Innendämmung auch dann zu erreichen, wenn im Fall der Passivhausqualität die Außenwand mit einem 10 cm dicken und ca. 80 cm hohen Dämmstoffstreifen, der an die Dämmung der Decke anschließt, innen wärmegeklämt wird. Bei Erhöhung der Dämmstoffdicke auf 15 cm genügt dafür sogar eine Streifenhöhe von nur 70 cm.

Die analogen Berechnungen für ein Gebäude in Niedrigenergiehausqualität führen auf eine erforderliche Streifenhöhe von ca. 1,0 m bei einer Dämmstoffdicke von 7 cm bzw. auf eine Streifenhöhe von ca. 75 cm bei einer Dämmstoffdicke von 10 cm.

- Die Berechnungen in Hinblick auf die Dämmerefordernisse von Innenwänden führen zur Aussage, dass bei Passivhausqualität ein 55 cm hoher und 10 cm dicker, an die Dämmung der Decke anschließender Dämmstoffstreifen beiderseits der Innenwand die gleiche Dämmwirkung aufweist als eine beiderseitig an der Innenwand bis zum Fußboden gezogene, 5 cm dicke Dämmstoffschicht. Eine weitere Erhöhung der Dämmstoffdicke auf 15 cm erlaubt die Reduktion der Streifenhöhe auf ca. 45 cm.

Die analogen Berechnungen für ein Gebäude in Niedrigenergiehausqualität führen auf eine erforderliche Streifenhöhe von 70 cm bei einer Dämmstoffdicke von 7 cm bzw. auf eine Streifenhöhe von ca. 55 cm bei einer Dämmstoffdicke von 10 cm.

A.1.3 geschlossener Keller

Liegt der Modellraum über einem geschlossenen Keller, so ist der einzige Unterschied zum soeben behandelten Fall des offenen Kellers in der höheren Kellertemperatur gegeben. Die Frage, wie hoch die Kellertemperatur liegt, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Die Lufttemperatur im unbeheizten Keller hängt von verschiedensten Faktoren, wie z. B. der Kellergeometrie, der Wärmedämmung von Kellerwänden, Kellerboden und Kellerdecke, des Luftwechsels im Keller, etc. ab.

Um dennoch einen begründbaren Ansatz für die Kellertemperatur zu finden, wird auf die ÖNorm B8110-6 (24) zurückgegriffen. In Tabelle 4 dieser Norm werden sog. „Temperaturkorrekturfaktoren“ für die vereinfachte Berechnung des Transmissionsleitwerts festgelegt und mit $f_{i,h}$ bezeichnet. Im Fall eines gedämmten Kellers¹⁴ ist der Korrekturfaktor für die Temperaturdifferenz mit $f_{i,h} = 0,5$ festgesetzt.

Die von der ÖNorm B8110-6 (24) angenommene Lufttemperatur im Keller Θ_k errechnet sich gemäß

$$\Theta_k = \Theta_i - f_{i,h} \cdot (\Theta_i - \Theta_e) \quad . \quad (A.3)$$

¹⁴ Nach ÖNorm B8110-6 [20] ist ein Keller dann als gedämmt anzusehen, wenn die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) von Kellerwänden und Kellerboden kleiner als $0,35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ sind.

Für die für den Standort Klagenfurt verwendete Auslegungstemperatur von $\Theta_e = -13,5 \text{ °C}$ ergibt sich bei einer Solltemperatur im Modellraum von $\Theta_i = 20,0 \text{ °C}$ somit eine Kellertemperatur von $\Theta_k = +3,25 \text{ °C}$.

Natürlich erscheint es nicht sinnvoll, bei einem geschlossenen, gedämmten Keller die Dicke der Dämmung an der Untersicht der Kellerdecke gleich anzusetzen, wie im Fall des offenen Kellers. Naheliegender ist es zu fordern, dass die Wärmeverluste durch die Kellerdecke – ein-dimensional gerechnet – nicht größer sein sollen als im Fall des offenen Kellers. Da sich die Temperaturdifferenz gemäß ÖNorm B8110-6 (24) im Fall des geschlossenen, gedämmten Kellers im Vergleich zum offenen Keller halbiert, kann der Wärmedurchgangskoeffizient der Kellerdecke doppelt so hoch angesetzt werden wie im Fall des offenen Kellers, um den gleichen Wärmeverlust durch die Kellerdecke zu erhalten.

Im Fall eines Gebäudes in Passivhaus-Qualität ist ein Wärmedurchgangskoeffizient der Kellerdecke von $U = 0,20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ bereits mit einer Dämmstoff-Dicke von 5 cm zu erreichen, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs mit $\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ angesetzt wird. Der für ein Gebäude in Niedrigenergiehaus-Qualität erforderliche U-Wert der Kellerdecke von $0,30 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ist allerdings bereits ohne Dämmschicht auf der Untersicht der Kellerdecke erreicht.

Da es nicht sinnvoll erscheint, die Untersicht der Decke ungedämmt zu lassen, wird angenommen, dass im Fall des Niedrigenergiegebäudes die Untersicht der Decke mit 5 cm Wärmedämmung ($\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) gedämmt wird. Der U-Wert der Kellerdecke liegt damit bei $0,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Dies bedeutet, dass der Wärmeverlust durch die Kellerdecke im Fall des geschlossenen Kellers auf 2/3 des Wärmeverlusts zum offenen Keller reduziert wird. Wird dieser Ansatz für das Passivhaus übernommen, so ergibt sich ein geforderter U-Wert von $0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, was einer Dämmstoffdicke von 10 cm entspricht.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen anhand der Wärmestromlinien den Wärmeverlust des Modellraums an den geschlossenen, gedämmten Kellerraum für den Passivhaus-Standard und den Niedrigenergie-Standard im Fall der innen nicht gedämmten Kellerwand (V0).

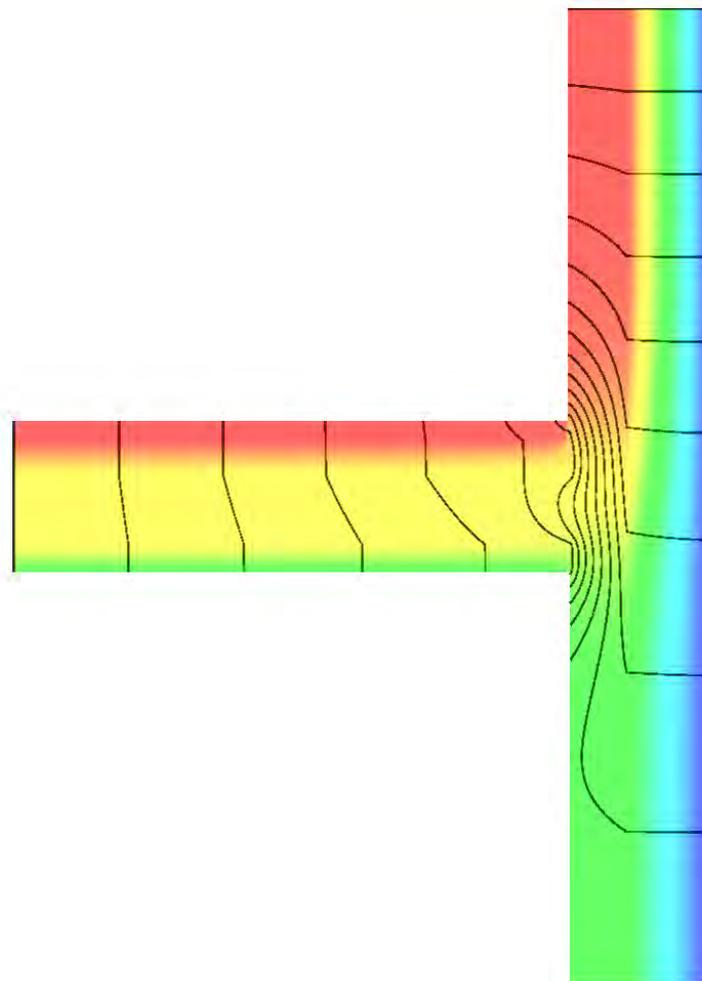
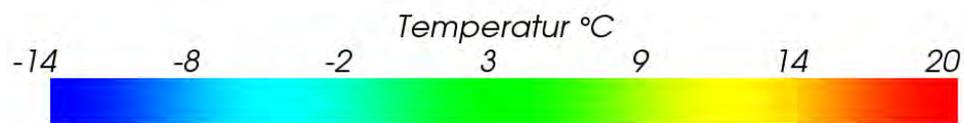


Abb. A.16: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, geschlossener Keller, Variante 0:
 Darstellung der Wärmestromlinien;
 Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$
 Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum 20 °C , Kellerraum $+3,25 \text{ °C}$,
 Außenluft $-13,5 \text{ °C}$

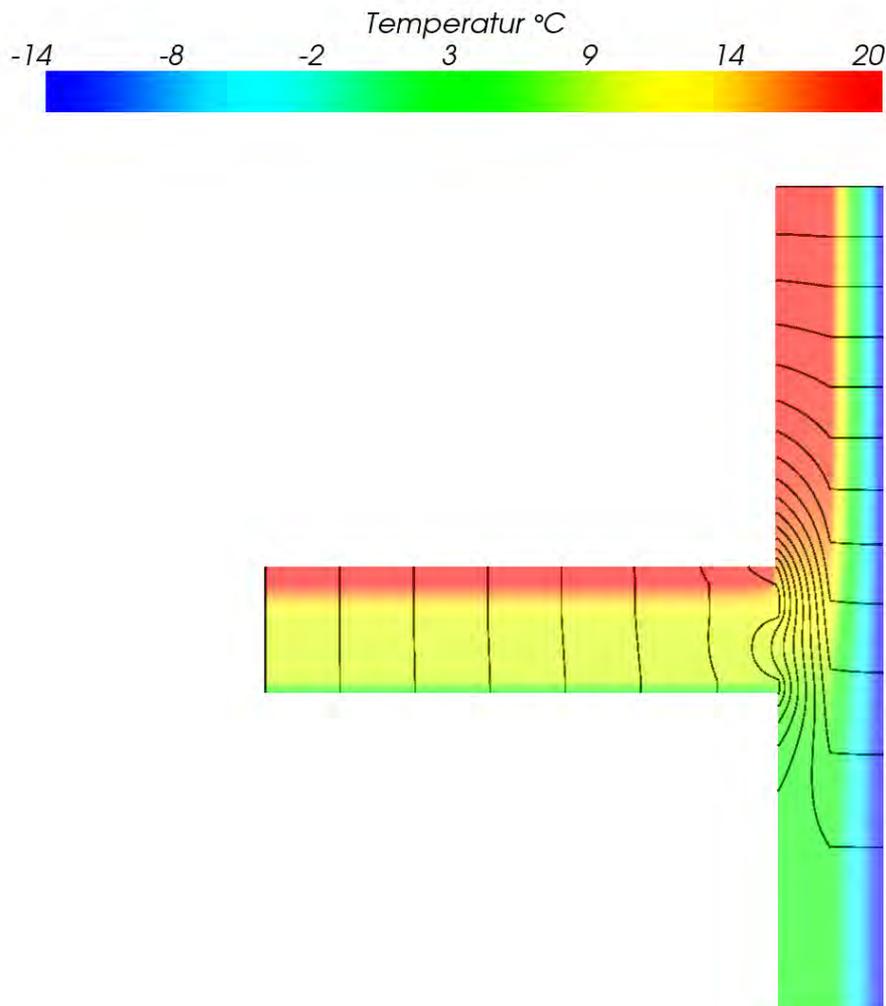


Abb. A.17: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, geschlossener Keller; Var. 0:
 Darstellung der Wärmestromlinien;
 Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$
 Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $+3,25^\circ\text{C}$,
 Außenluft $-13,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Im hier vorliegenden Fall des unbeheizten, geschlossenen Kellers treten drei Räume auf, deren Temperaturen unterschiedlich sind (Modellraum EG, Keller, „außen“). Die indirekte Methode der EN ISO 10211 (25) - d. h. das Rechnen mit ψ -Werten – ist für solche Fälle insofern ungeeignet, als die ψ -Werte nicht mehr temperaturunabhängig sind, sondern von den Annahmen zur Kellertemperatur abhängen.

Für den Vergleich der Varianten V0 (keine Innendämmung der Kellerwand) und V1 (5 cm Innendämmung der Kellerwand) werden daher keine ψ -Werte verwendet, sondern unmittelbar die Wärmeverlustleistungen errechnet. Für den in AnTherm modellierten Ausschnitt aus der Hülle des Modellraums (siehe z. B. Abb. A.1 und Abb. A.3) werden als Berechnungsergebnisse u. a. der längenbezogene thermische Leitwert zwischen Modellraum und außen $L_{i,e}$ und jener zwischen Modellraum und Keller $L_{i,k}$ erhalten. Diese Leitwerte sind von den gewählten Lufttemperaturen unabhängig. Die gesuchte, längenbezogene Wärmeverlustleistung des Modellraums Φ kann nun wie folgt für beliebig gewählte Temperaturkombinationen errechnet werden:

$$\Phi = L_{i,e} \cdot (\Theta_i - \Theta_e) + L_{i,k} \cdot (\Theta_i - \Theta_k) \quad . \quad \langle A.3 \rangle$$

Die folgende Tabelle zeigt die für das Einsetzen in Gleichung <A.3> benötigten, von AnTherm (26) berechneten längenbezogenen, thermischen Leitwerte.

	$L_{i,e}$ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	$L_{i,k}$ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Passivhaus V0	0,179	0,731
Passivhaus V1	0,220	0,538
Niedrigenergiehaus V0	0,258	0,841
Niedrigenergiehaus V1	0,310	0,650

Tab. A.6: Von Programmpaket AnTherm (26) errechnete längenbezogene thermische Leitwerte

Mit einer Solltemperatur für den Modellraum von $\Theta_i = 20$ °C, einer Außenlufttemperatur von $\Theta_e = -13,5$ °C und der angenommenen Lufttemperatur für den unbeheizten Keller von $\Theta_K = +3,25$ °C ergeben sich damit folgende längenbezogene Wärmeverlustleistungen.

	Φ [Wm ⁻¹]	
Passivhaus V0	18,2	100%
Passivhaus V1	16,4	90%
Niedrigenergiehaus V0	22,7	100%
Niedrigenergiehaus V1	21,3	94%

Tab. A.7: Längenbezogene Wärmeverlustleistungen des modellierten Ausschnitts der Hülle des Modellraums

Es zeigt sich, dass das Vorsehen einer Innendämmung an der Kellerwand auch bei einem geschlossenen Keller Sinn macht. Die Reduktion der Wärmeverluste im Vergleich zum Fall der innen nicht gedämmten Kellerwand ist zwar nicht mehr so groß wie beim offenen Keller, jedoch nicht vernachlässigbar.

In den folgenden dynamischen Heizlastberechnungen werden die mittels AnTherm (26) analysierten Wärmebrückeneffekte natürlich berücksichtigt. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der dynamischen Heizlastberechnungen für den Fall des Modellraums über dem geschlossenen Keller. Natürlich wird auch hier wieder zwischen dem Fall der innen nicht gedämmten Kellerwand (V0) und jenem mit 5 cm Innendämmung der Kellerwand (V1) unterschieden.

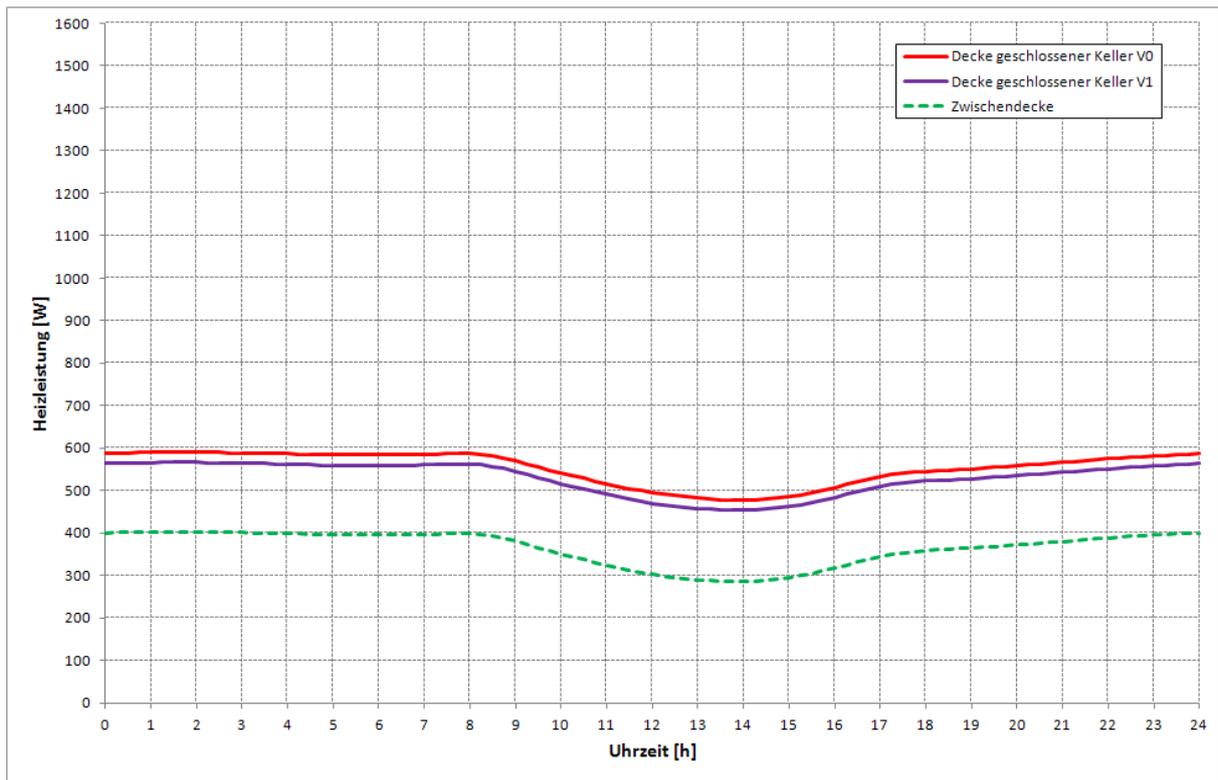


Abb. A.18: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Passivhausniveau**; Modellraum über geschlossenem Keller

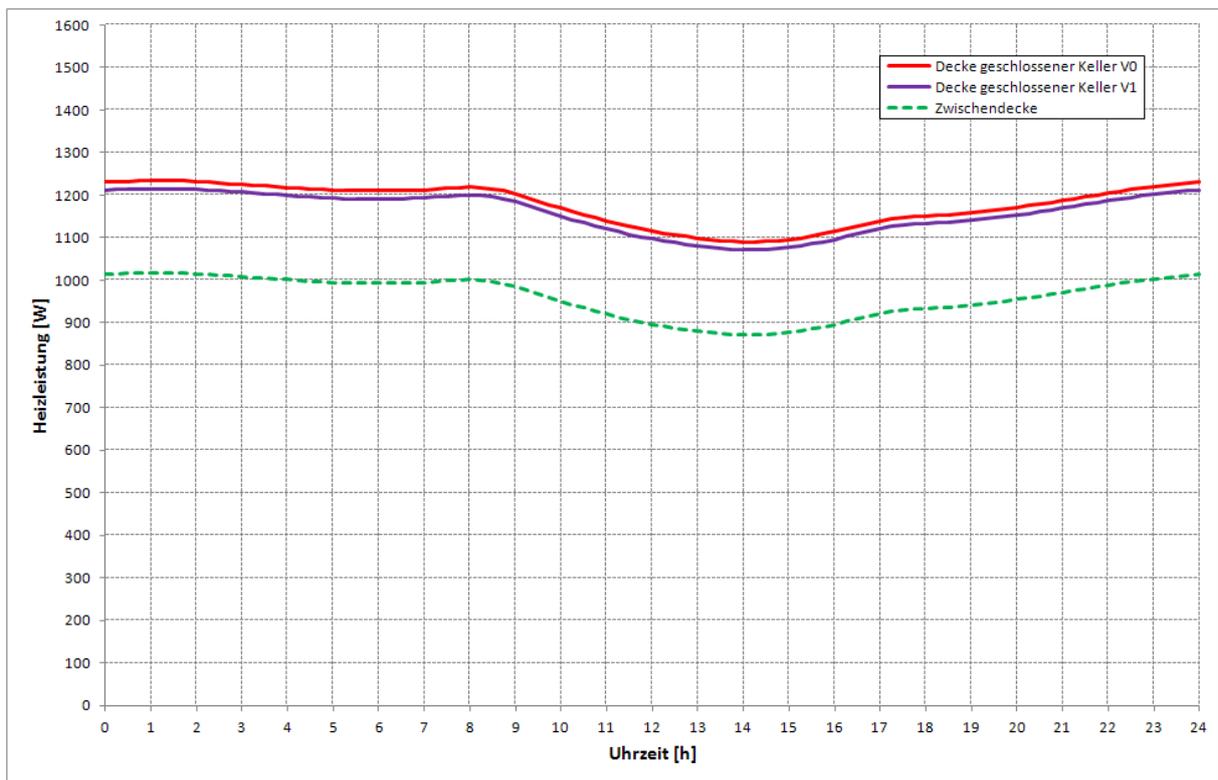


Abb. A.19: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Niedrigenergiehausniveau**; Modellraum über geschlossenem Keller
V0 ... keine Innendämmung der Kellerwand
V1 ... Kellerwand mit 5 cm innen liegender Wärmedämmung

Wie zu sehen, zeigt sich die Auswirkung der Innendämmung der Kellerwand (V1) auf die erforderliche Heizleistung im Fall des geschlossenen, gedämmten Kellers nicht mehr so deutlich, wie beim offenen Keller.

Die gesuchte Heizlast ist mit dem Maximum des berechneten Tagesverlaufs der am Auslegungstag benötigten Heizleistung gegeben. Die folgende Tabelle zeigt die berechneten Heizlasten in Abhängigkeit von der thermischen Qualität der Gebäudehülle und der Lage des Modellraums. Zudem wird zwischen dem Fall der innen nicht gedämmten Kellerwand (V0) und der mit 5 cm innen gedämmten Kellerwand (V1) unterschieden.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus
Modellraum im Regelgeschoß	403,3	1016,9
Modellraum über geschlossenem Keller V0	590,4	1233,9
Modellraum über geschlossenem Keller V1	566,4	1215,6

Tab. A.8: Modellraum über geschlossenem Keller; für den Modellraum berechnete Heizlasten in Watt; Standort Klagenfurt

Für die Berechnung der erforderlichen Registerflächen werden die für den Fall des offenen Kellers getroffenen Annahmen in Hinblick auf die maximal erreichbare Heizmitteltemperatur ($\Theta_r = 30 \text{ °C}$) und die Parameter des Heizregisters $\Lambda_{r,u} = 4,5982 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ übernommen.

Die folgende Tab. A.9 zeigt die unter diesen Berechnungsannahmen errechneten Registerflächen.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus
Modellraum im Regelgeschoß	8,77	22,12
Modellraum über geschlossenem Keller V0	12,84	26,83
Modellraum über geschlossenem Keller V1	12,32	26,44

Tab. A.9: Modellraum über geschlossenem Keller; für den Modellraum aus der Heizlast errechnete Registerflächen in m^2

Es zeigt sich, dass die erforderlichen Registerflächen im Fall der Lage des Modellraums über dem geschlossenen Keller unter den getroffenen Annahmen kleiner sind als jene für den Fall der Lage über dem offenen Keller.

Dennoch stellt sich – wie auch im Fall der Lage über dem offenen Keller - heraus, dass für ein Gebäude in Niedrigenergiehausqualität die festgelegte Obergrenze für die Registerfläche ($24,5 \text{ m}^2$) überschritten wird. Dieses Problem kann jedoch auch hier leicht behoben werden, indem die maximale Heizmitteltemperatur auf 31 °C erhöht wird.

Im Gegensatz zum Fall des Modellraums über einem offenen Keller schlägt sich die Auswirkung einer Innendämmung der Kellerwand auf die notwendige Registerfläche in einer Verkleinerung dieser Fläche um nur maximal ca. $0,5 \text{ m}^2$ nieder.

Conclusio:

Für die Ermittlung der Registerflächen im Fall der Lage des Modellraums über einem geschlossenen, gedämmten Keller wurde angenommen, dass die Deckenuntersicht der Kellerdecke (und damit des Fußbodens des Modellraums) im Fall des Passivhauses mit einer 10 cm dicken Dämmplatte wärmegeklämt wird. Für den Fall des Niedrigenergiehauses wird ange-

nommen, dass die Dämmplatte mit 5 cm nur noch halb so dick ist. Unter diesen Annahmen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Bei einer Gebäudehülle in Passivhausqualität sind die erforderlichen Registerflächen in etwa halb so groß wie die mit 24,5 m² angesetzte Obergrenze. Der Modellraum im EG kann somit problemlos allein über die Decke beheizt werden.
- Eine an der Kellerwand innen aufgebraachte Dämmschicht von 5 cm Dicke vermag die erforderliche Registerfläche um lediglich ca. 0,5 m² zu verkleinern. Diese Maßnahme muss damit nicht unbedingt umgesetzt werden.
- Im Fall der Gebäudehülle in Niedrigenergiehausqualität sind die erforderlichen Registerflächen knapp größer als die mit 24,5 m² angesetzte Obergrenze. Der Modellraum im EG kann in diesem Fall nur dann allein über die Decke beheizt werden, wenn die maximale Heizmitteltemperatur auf 31 °C erhöht wird.
- Bei Niedrigenergiehausqualität bewirkt das Aufbringen einer 5 cm dicken Wärmedämmschicht eine Verkleinerung der erforderlichen Registerfläche um lediglich ca. 0,4 m². Diese Maßnahme muss damit nicht unbedingt umgesetzt werden.

A.2 Gebäude nicht unterkellert

Ist das Gebäude nicht unterkellert, so grenzt der Fußboden des Modellraums direkt an den Erdboden. Für die Ausführung der Fundamentplatte im Fall der Passivhausqualität wird in loser Anlehnung auf die im Passivhaus-Bauteilkatalog (27) gezeigten Konstruktionen angenommen, dass die Fundamentplatte unterseitig vollflächig mit einer Dämmschicht von 16 cm Dicke zum Erdboden hin abgedämmt ist. Als dafür geeigneter Dämmstoff wird hierbei XPS G30 angesetzt. Die Fundamentplatte hat damit den in folgender Tabelle angeführten Schichtaufbau.

	d [m]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρ [kgm ⁻³]	c [kJkg ⁻¹ K ⁻¹]
oben				
Bodenbelag (Fliesen)	0,0100	1,000	2000	0,92
Zementestrich	0,0600	1,400	2000	1,13
PE-Folie	0,0002			
Trittschalldämmung	0,0300	0,038	32	1,45
Dampfbremse	0,0004			
Dämmschüttung gebunden	0,1000	0,050	200	1,56
Bodenplatte Stahlbeton	0,3000	2,300	2400	1,00
Dämmschicht XPS G30	0,1600	0,038	32	1,45
Rollierung	0,1500	0,700	1800	1,00
unten				

Tab. A.10: Schichtaufbau der Fundamentplatte (Passivhaus-Standard)

Im Fall des Niedrigenergiestandards wird die Dicke der Dämmschicht unter der Bodenplatte auf 10 cm reduziert.

Bezüglich des Anschlusses der Außenwand an die Fundamentplatte wird davon ausgegangen, dass im Sockelbereich eine 20 cm dicke Perimeterdämmung vorgesehen ist und die Stirnseite der Fundamentplatte ebenso mit einer 20 cm dicken Dämmschicht zum Erdboden hin abge-

dämmt ist. Der in folgender Abbildung dargestellte Vertikalschnitt durch den Modellraum zeigt exemplarisch die Art des modellierten Aufbaus.

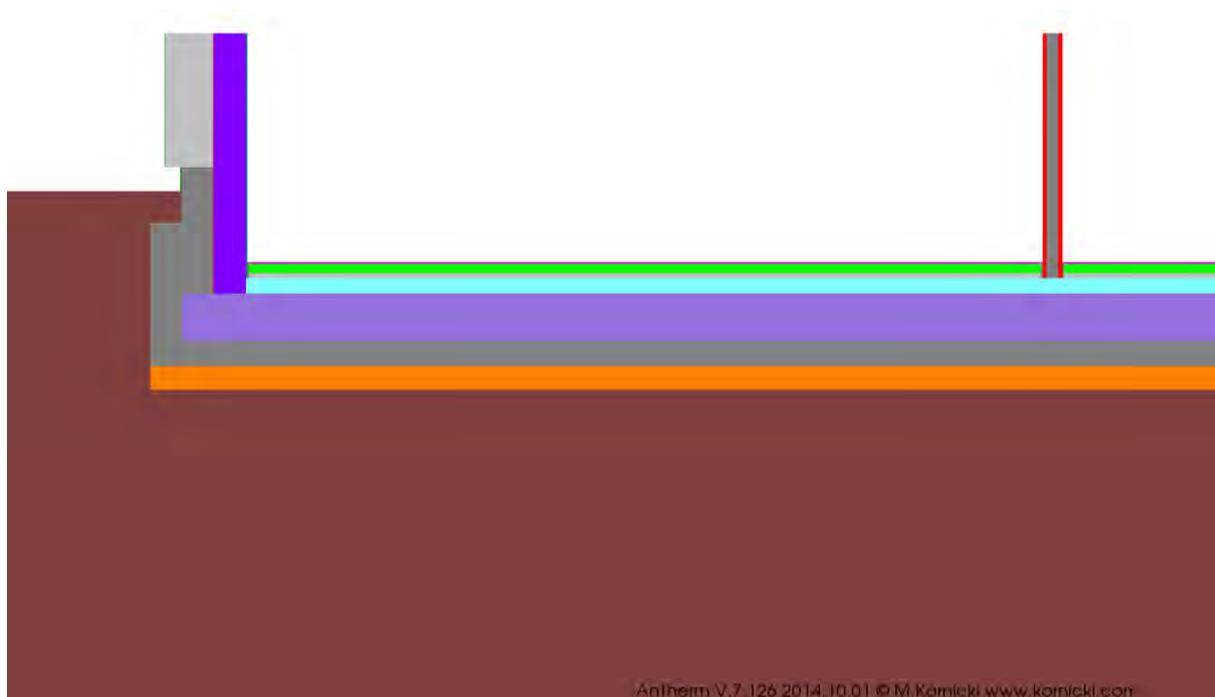


Abb. A.20: Ausschnitt aus dem mit Programm AnTherm (26) erzeugten Berechnungsmodell; Vertikalschnitt durch die Fundamentplatte in Ost-West-Richtung

Das Berechnungsmodell für den Niedrigenergiestandard unterscheidet sich neben der auf 10 cm reduzierten Schichtdicke der Dämmung unter der Fundamentplatte durch eine Verkleinerung der Dicke von Perimeter- und Stirnseitendämmung auf 14 cm.

Die Berechnung der Wärmeverlustleistung vom Modellraum über die Fundamentplatte und das Erdreich nach außen verlangt nach einer mehrdimensionalen Modellierung. Im Spezialfall des betrachteten Modellraums in der Gebäudekante reicht auch die üblicherweise angewandte zweidimensionale Beschreibung des Wärmestroms nicht aus, da die Wärmeströme von der durch Außenwände und Fundamentplatte gebildeten Ecke nur dreidimensional mit der erforderlichen Genauigkeit berechnet werden können.

Da die Wärme vom Modellraum nach außen zudem durch weite Bereiche des umgebenden Erdreichs strömt, kann auch mit zeitunabhängigen Berechnungsansätzen nicht das Auslangen gefunden werden. Die sehr hohe Wärmespeicherfähigkeit des Erdreichs kann nicht vernachlässigt werden und zwingt zu einer instationären, also zeitabhängigen Berechnung. Eine eingehendere Diskussion dieser Problematik ist im Buch „Wärmeverluste von erdberührten Bauteilen“ (28) nachzulesen.

Die folgende Abbildung zeigt die dreidimensionale Modellierung des Modellraums inklusive Nebenräume. Die Abmessungen in Hinblick auf die zu berücksichtigenden Erdbodenbereiche wurden hierbei der ÖNorm EN ISO 10211 (25) entsprechend gewählt.

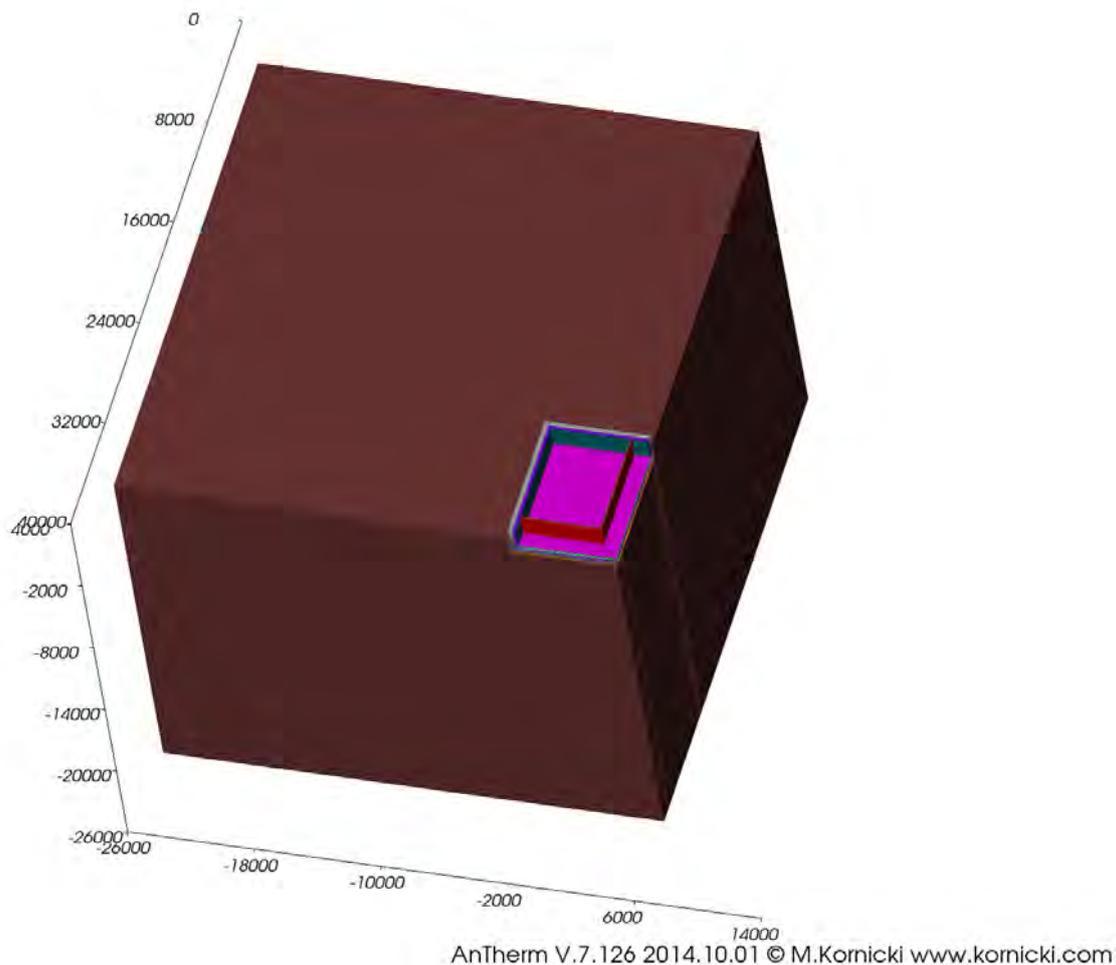


Abb. A.21: Dreidimensionales, mit Programm AnTherm (26) erzeugtes Berechnungsmodell:
Modellraum in der Gebäudekante, EG; Maße in mm

Für die dreidimensionale, instationäre Durchrechnung wird als Randbedingung ein geglätteter Jahresgang der Außenlufttemperatur für den Standort Klagenfurt angesetzt. Die Monatsmittelwerte zur Konstruktion dieses Jahresgangs werden dem Klimadatenrechner (20) entnommen und der Jahresverlauf mittels Fourier-Kontinuierung (29) rechnerisch ermittelt.

Die Temperatur im Modellraum und den benachbarten Räumen wird vereinfachend mit 20 °C jahreszeitlich konstant angenommen.

Der Berechnungsgang erfolgt zweistufig. In einem ersten Schritt werden unter Verwendung von Programmpaket AnTherm (26) die Matrizen harmonischer thermischer Leitwerte errechnet. Hierbei erweist es sich als ausreichend, mit 6 Harmonischen zu rechnen. Im zweiten Schritt wird mit Programmpaket THESIM (30) mittels dreidimensionaler, instationärer Simulation der Jahresverlauf der Wärmeverlustleistung des Modellraums über die Fundamentplatte erhalten. Die folgende Abbildung zeigt die derart errechneten Jahresverläufe für das Gebäude in Passivhaus- und in Niedrigenergiehausqualität.

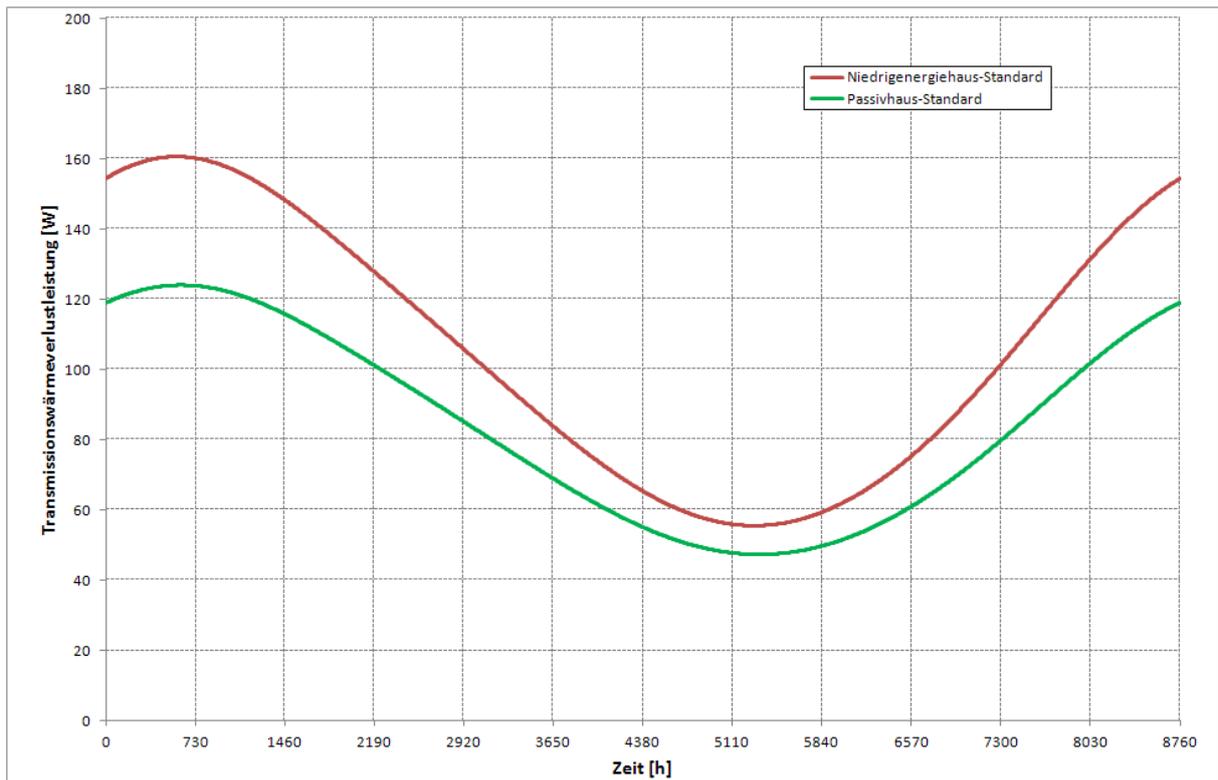


Abb. A.22: Mit AnTherm (26) und THESIM (30) errechnete Jahresverläufe der Wärmeverlustleistung

Es zeigt sich, dass sowohl im Fall des Passivhauses als auch im Fall des Niedrigenergiehauses ganzjährig Wärme über die Fundamentplatte abfließt. Das Maximum der Wärmeverlustleistung stellt sich in beiden Fällen Ende Januar ein.

Die dynamische Heizlastberechnung wird – wie bisher – für einen extrem kalten Tag mit einem Tagesmittelwert von $-13,5\text{ °C}$ durchgeführt. Für die Wärmeverlustleistung über die Fundamentplatte wird der Monatsmittelwert für Januar, wie er aus Abb. A.22 ablesbar ist, eingesetzt. Mit diesem Berechnungsansatz wird berücksichtigt, dass aufgrund der sehr großen Wärmespeicherfähigkeit des Erdreichs der Einfluss von Temperaturextremen auf den Wärmefluss durch das Erdreich vernachlässigbar ist.

Die nächsten beiden Abbildungen zeigen das Ergebnis der dynamischen Heizlastberechnungen.

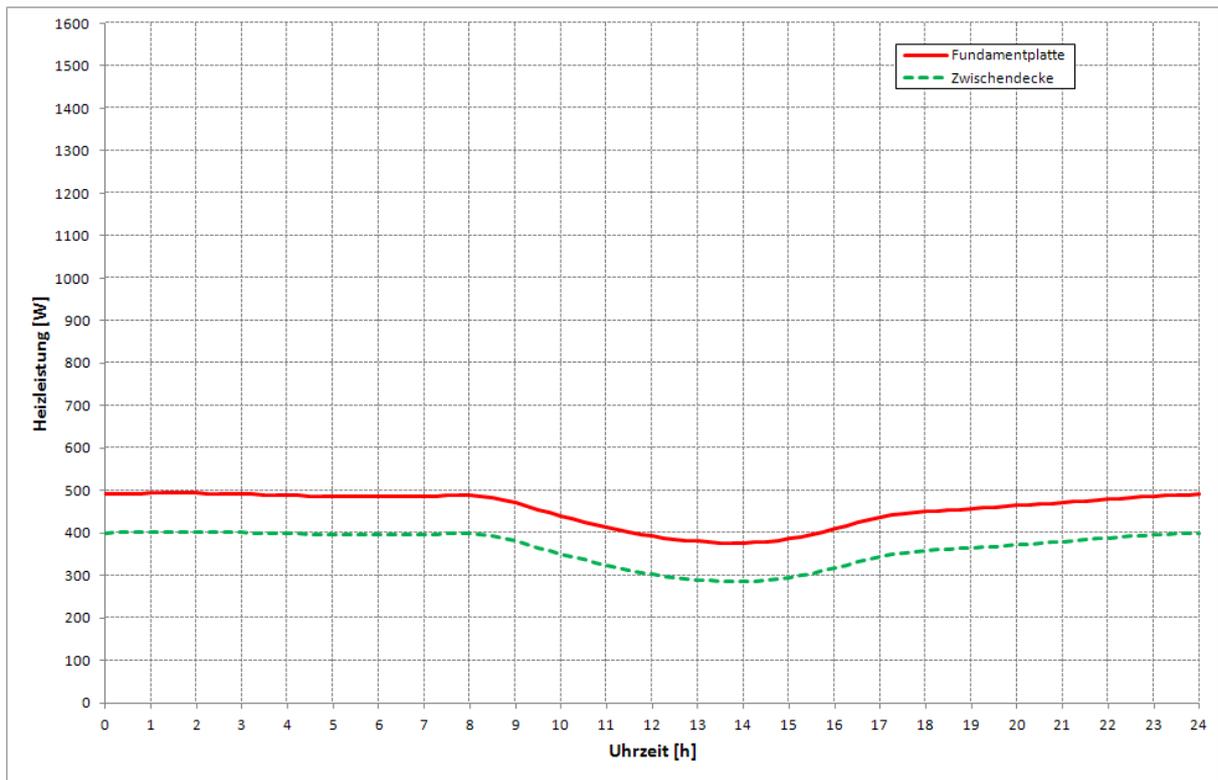


Abb. A.23: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Passivhausniveau**; Modellraum über Fundamentplatte

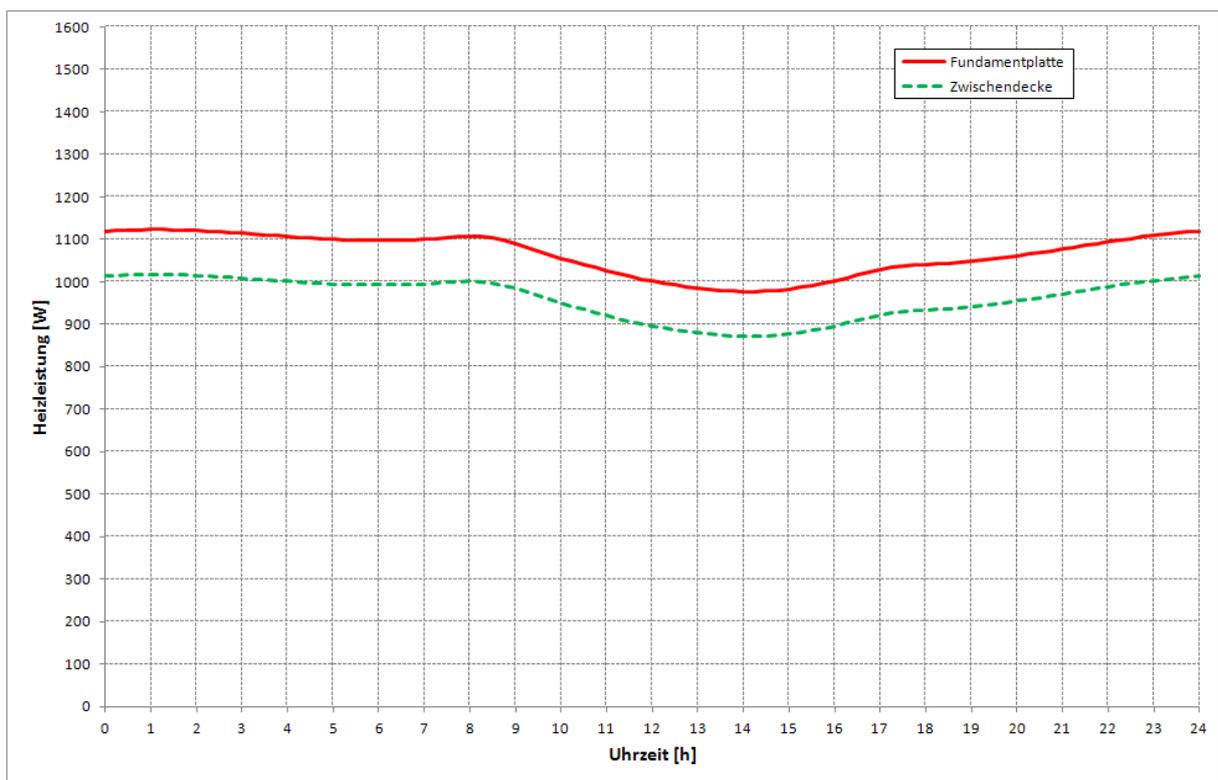


Abb. A.24: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Niedrigenergiehausniveau**; Modellraum über Fundamentplatte

Es zeigt sich deutlich, dass unter den getroffenen Annahmen in Hinblick auf die Wärmedämmung der Fundamentplatte, die Perimeterdämmung, sowie die stirnseitige Dämmung der Fundamentplatte der Wärmeabfluss über den Erdboden erfolgreich klein gehalten wird. Dies zeigen auch die in der nächsten Tabelle ausgewiesenen Heizlast-Werte.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus
Modellraum im Regelgeschoß	403,3	1016,9
Modellraum über Fundamentplatte	566,4	1123,0

Tab. A.11: Modellraum über Fundamentplatte; für den Modellraum berechnete Heizlasten in Watt; Standort Klagenfurt

Für die Berechnung der erforderlichen Registerflächen werden die für den Fall des offenen Kellers getroffenen Annahmen in Hinblick auf die maximal erreichbare Heizmitteltemperatur ($\Theta_r = 30 \text{ °C}$) und die Parameter des Heizregisters $\Lambda_{r,u} = 4,5982 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ übernommen.

Die folgende Tab. A.12 zeigt die unter diesen Berechnungsannahmen errechneten Registerflächen.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus
Modellraum im Regelgeschoß	8,77	22,12
Modellraum über Fundamentplatte	12,32	24,42

Tab. A.12: Modellraum über Fundamentplatte; für den Modellraum aus der Heizlast errechnete Registerflächen in m^2

Unter den getroffenen Annahmen zeigt sich, dass der Modellraum im EG mit gut gedämmter Fundamentplatte sowohl beim Passivhaus als auch beim Niedrigenergiehaus allein durch die Decke beheizt werden kann.

Conclusio:

Für die Ermittlung der Registerflächen im Fall der Lage des Modellraums im EG mit Fundamentplatte wurde angenommen, dass die Fundamentplatte im Fall des Passivhauses mit einer 16 cm dicken Dämmplatte an ihrer Unterseite wärmegeklämmt wird. Für den Fall des Niedrigenergiehauses wird angenommen, dass diese Dämmplatte 10 cm dick ist. Die vertikale Perimeterdämmung wird bei Passivhausausführung 20 cm dick, bei Niedrigenergieausführung 14 cm dick angesetzt. Zusätzlich wird auch die Stirnseite der Fundamentplatte gut wärmegeklämmt (Passivhaus: 20 cm Dämmung; Niedrigenergiehaus: 14 cm Dämmung). Unter diesen Annahmen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Bei einer Gebäudehülle in Passivhausqualität ist die erforderliche Registerfläche mit $12,3 \text{ m}^2$ in etwa halb so groß wie die mit $24,5 \text{ m}^2$ angesetzte Obergrenze. Der Modellraum im EG kann somit problemlos allein über die Decke beheizt werden.
- Bei einer Gebäudehülle in Niedrigenergiehausqualität liegt die erforderliche Registerfläche mit $24,4 \text{ m}^2$ knapp unter der angesetzten Obergrenze. Der Modellraum im EG kann somit auch im Fall des Niedrigenergiehauses allein über die Decke beheizt werden.

Literaturverzeichnis

1. **Kreč, K.**, Forschungsprojekt Energiespeicher Beton - Endbericht, Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, *Berichte aus der Energie- und Umweltforschung* 2/2016, Wien, 2016.
2. **Friembichler, F., Handler, S., Kreč, K. & Kuster, H.**, Thermische Bauteilaktivierung, *Berichte aus der Energie- und Umweltforschung* 9/2016, Wien, 2016.
3. **Koch, H. A. & Pechinger, U.**, Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Sonnen- und Wärmestrahlungseinflüssen auf Gebäudeoberflächen, *Gesundheits-Ingenieur*, Bd. 98, Heft 10, S. 265-280, 1977.
4. Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren, *ÖNorm EN ISO 6946*, 2008.
5. Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-Thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren, Ausgabe April 2008, *ÖNorm EN ISO 13786*, 2008.
6. Baustoffe und -produkte Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften, Tabellierte Bemessungswerte, *ÖNorm EN 12524*, 2000.
7. Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte, *ÖNORM B8110-7*, 2013.
8. Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden - Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühlleistung, *ÖNorm EN 1264-5*, 2009.
9. **Kreč, K.**, Zur Wärmespeicherung in Baukonstruktionen. *Gesundheits-Ingenieur*, Bd. 114, Heft 1, 11-18, 1993.
10. Energieeinsparung und Wärmeschutz, *OIB-Richtlinie 6*, Österreichisches Institut für Bauforschung, 2015.
11. GEBA V8.0, Programmpaket zur Berechnung des thermischen Verhaltens von Räumen, Raumgruppen und Gebäuden, © *K. Kreč*, 2015.
12. Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung. *ÖNorm B8110-3*, 2012.
13. EXCEL-Tool zur Berechnung der Außenlufttemperatur mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen, *OIB*, Österreichisches Institut für Bauforschung, 2007.
14. EXCEL-Tool zur Berechnung der Normaußentemperatur, *OIB*, Österreichisches Institut für Bauforschung, 2009.
15. **Heindl, W., Sigmund, A. & Kreč, K.**, Klimadatenkatalog, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, Bde a, b, c, Wien, 1984.
16. PHPP: Passivhaus Projektierungspaket - Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Passivhausinstitut Dr. Wolfgang Feist, Darmstadt, 2004.
17. Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, *ÖNorm H7500*, 2006.
18. Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile, Ausgabe März 2011, *ÖNorm B8110-5*, 2011.

19. **Kreč, K. & Nackler, J. N.**, Programmpaket OEKLIM - Klimadaten für das Bauwesen, im Auftrag der MA39 der Stadt Wien, 2012.
20. **Kreč, K. & Nackler, J. N.**, Klimadatenrechner, im Auftrag des BMWFJ, 2012.
21. PHPP: Passivhaus Projektierungspaket, Version 9.2., Passivhausinstitut, Darmstadt, 2015.
22. INTEMP, Programmpaket zur instationären thermischen Simulation von Räumen, Raumgruppen und kleineren Gebäuden, © *P.G. Gilli*, 1978.
23. Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz, *ÖNorm B8110-2*, 2003.
24. Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf, *ÖNorm B8110-6*, 2010.
25. Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen, *ÖNorm EN ISO 10211*, 2008.
26. AnTherm, Programm zur Analyse des thermischen Verhaltens von Bauteilen mit Wärmebrücken, © *M. Kornicki*, 2014.
27. *IBO* - Passivhaus-Bauteilkatalog - Ökologisch bewertete Konstruktionen, 3. Auflage, Springer-Verlag Wien-New York, ISBN 978-3-211-29763-2, 2009.
28. **Nackler, J. N. & Kreč, K.** Wärmeverluste von erdberührten Bauteile - Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren, AV Akademiker-Verlag, ISBN-13: 978-3639470536, 2014.
29. **Heindl, W. & Kreč, K.**, Interpolation und Kontinuierisierung, Forschungsbericht im Auftrag des BMWF, 1985.
30. THESIM V3.0 - Programmpaket zur dreidimensionalen Simulation des thermischen Verhaltens von Einzelräumen, © *K. Kreč*, 2014.
31. Rohre aus vernetztem Polyethylen hoher Dichte (PE-X) - Maße, *DIN 16893*, 2000.
32. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik -Allgemeine Kriterien und Validierungsvorgaben, Ausgabe August 2012, *ÖNorm EN ISO 13791*, 2012.
33. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik -Vereinfachtes Berechnungsverfahren, Ausgabe August 2012, *ÖNorm EN ISO 13792*, 2012.

Index

- Abkühlverhalten 116
Abkühlvorgänge 111
Abkühlzeit 117
absolute Temperatur 14
Absorptionszahl 15, 17
Achsabstand 32
Albedo 177
Anfangsbedingung 19
anisotroper Körper 11
Aufheizverhalten 116
Aufheizvorgänge 111
Aufheizzeit 111
Auskühldauer 173
Auskühlung 176
Auskühlverhalten 92
Außenjalousie 180, 181
Außenlufttemperatur 130
Außenraum 11
bauphysikalische Wärmelehre 7
bauteilbezogene Betrachtungsweise 133
Bauteilfläche 12
Beladungszeit 47, 50, 52, 66, 92, 97
Berechnungsausschnitt 31, 32
Bestrahlungsstärke 14, 15, 171
Betonüberdeckung 46, 60, 66, 68, 73, 78, 94, 97, 114
Bewehrung 22
Bewehrungsplan 25
Deckenuntersicht 34, 44, 51, 92, 98
Deckenverkleidung 40
Durchfluss 111
dynamische Heizlastberechnung 142
eindimensionale Wärmeleitung 12, 13, 19
Einlaufzeit 19
Einschaltzeitpunkt 121
Einstrahlzahl 18
Emissionszahl 15
Energiebedarf 158
Energiebedarfsberechnung 158
erneuerbare Energie 5
flächenbezogene Wärmeabgabeleistung 31, 33
flächenbezogener thermischer Leitwert 26, 44
Flächenheizung 5
Fundamentplatte 226, 231
Gebäudestandort 133
geometrische Reihe 16
Geschoßdecke 21
Gipskartonplatte 40
harmonische thermische Leitwerte 19
Heizbetrieb 8
Heizlastberechnung 139
Heizmitteltemperatur 43, 44, 45, 49, 52, 67
Heizungsunterbrechung 51, 54, 66, 115
Heizwärmebedarf 160
Heizwärmebedarfsberechnung 158
homogene Schicht 12
Innenjalousie 180
instationär 18, 47
instationärer Vorgang 8
isotherm 15
isotroper Körper 11
Jalousiebenutzung 180
Kälte 8
Kerntemperaturfühler 102, 110
Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz 15
Klimadaten 158
Konditionierung 133
Konvektion 7, 8, 9, 46
konvektive Beheizung 161
konvektiver Wärmeaustausch 26
Konvektorheizung 158
Kugelthermometer 187
Kühlbedarf 166, 167
Kühlfläche 156
Kühllast 157
Kühllastberechnung 139, 149, 156
Kühlmitteltemperatur 55, 57, 59, 67, 72, 73, 83, 157, 181
Kühlmittelzufuhr 67, 176
Kühlregister 73
Kühlungsunterbrechung 54, 59, 72, 91
längenbezogener thermischer Leitwert 26, 31
Leichtputz 43
Leitwertzuschlag 211
Linke'scher Trübungsfaktor 171, 177
Lüftungsleitwert 10
Massendichte 9, 11, 18
metallische Oberfläche 15
mittlere Oberflächentemperatur 34
Modellraum 133, 134
Nachheizbedarf 175, 176
Nachtstrom 48
Niedrigenergiehaus-Standard 138
Norm-Sommertag 140, 153, 176
Oberflächentemperatur 44, 51, 92, 102
oberste Decke 21, 122, 132

operative Temperatur 162
 Passivhaus-Standard 139
 Periodenlänge 20
 periodisch eingeschwungen 19
 Periodizität 19
 Photovoltaik 48
 Planungsempfehlungen 133
 Plattendicke 74, 78, 82, 83, 91
 plattenförmiger Bauteil 12
 Pumpenabschaltung 49
 Pumpenstillstand 57
 Randbedingung 12, 19, 21
 Raumakustik 133
 raumbezogene Betrachtungsweise 133
 Raumheizlast 145
 Raumnutzung 164, 169
 Regelgeschoß 22, 135
 Registerfläche 146
 Regression 33
 Reitz'scher Diffusstrahlungsfaktor 171, 177
 Rohrdimension 34, 35, 36
 Rohrregister 20, 22, 133
 Rohrtemperatur 13, 14, 19, 44, 148, 157
 Rücklauftemperatur 44
 schwarzer Körper 14
 Selbstregelungseffekt 163, 167
 sensible Kühllast 155, 157, 164
 sensible Kühlleistung 153, 157
 sensibler Kühlbedarf 164, 167
 Sensor 103, 105
 SI-Einheit 7
 sinusförmig 19
 Solarglas 139, 157
 Solltemperatur 44, 169
 Sommertauglichkeit 150
 spezifische Wärme 8, 11
 spezifische Wärmekapazität 9, 18
 Spreizung 14
 stationärer Fall 46
 stationäres Temperaturfeld 8
 Stefan-Boltzmann'sches Gesetz 15
 Strahlungsaustausch 16, 17, 25, 181, 186, 187, 190
 Strahlungsaustauschkonstante 16
 Strahlungsfeld 181
 Strahlungsheizung 5
 Strahlungskonstante 14, 16
 Strahlungslufttemperatur 11, 128, 130
 Strahlungstag 149, 177
 Tagesperiode 47
 Temperatur 7
 Temperaturband 170, 176
 Temperaturgefälle 11
 Temperatursensor 104
 thermische Behaglichkeit 133
 thermische Qualität 186, 191
 thermischer Leitwert 12, 23
 Thermometer 7
 Tiefgarage 210
 Überdeckung 37
 Umwälzpumpe 20, 48, 102, 111, 114, 116, 121
 U-Wert 12, 13
 verputzte Decke 40
 Verschattungsmaßnahme 157
 Vorlauftemperatur 44
 Wärme 7
 Wärmeabgabe 111
 Wärmeabgabeleistung 21, 40
 Wärmeaufnahme 111
 Wärmeaufnahmeleistung 21, 40, 117
 Wärmebilanz 45
 Wärmebilanzgleichung 18
 Wärmebrückenberechnung 12, 13, 14
 Wärmedurchgangskoeffizient 12, 13
 Wärmedurchgangswiderstand 13
 Wärmedurchlasswiderstand 12
 Wärmekapazität 8
 Wärmeleitfähigkeit 11, 40
 Wärmeleitung 7, 8, 11
 Wärmemenge 7
 Wärmequelle 7
 Wärmeschutzglas 17
 Wärmespeicherfähigkeit 47
 Wärmespeicherung 21
 Wärmestrahlung 7, 8, 16
 Wärmestrom 8
 Wärmestromdichte 11, 44
 Wärmetauschereffekt 14
 Wärmeübergangskoeffizient 26, 34, 44
 Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung 16
 Wärmeübergangswiderstand 13
 Wasserwert 10
 Welligkeit 44, 57, 97, 102
 Windstrom 48, 92
 wirksame Wärmekapazität 19
 Zeitschrittverfahren 19
 zukunftsgerichte Planung 5