

Energiespeicher Beton

K. Kreč

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

2/2016

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Energiespeicher Beton

Forschungsprojekt im Auftrag von:
Vereinigung Österreichischer Zementwerke
und
ZEMENT + BETON Handels- und Werbeges.m.b.H.

Ao. Univ. Prof. i. R. DI Dr. techn. Klaus Kreč
Büro für Bauphysik

Schönberg am Kamp, Juli 2015

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse www.HAUSderZukunft.at Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort des Projektnehmers

die Klimatisierung von Gebäuden mit Hilfe der thermischen Aktivierung von Bauteilen aus Beton steht knapp davor, breiten Einzug in die Baupraxis zu finden. Die Beforschung und Entwicklung dieser Zukunftstechnologie ist weit fortgeschritten, die praktische Umsetzung der Bauteilaktivierung kann auf wissenschaftlich abgesichertem Terrain stattfinden. Nicht Schritt gehalten mit den theoretischen Entwicklungen hat allerdings die Übersetzung und Transformation dieses Wissens in die Baupraxis.

Das gegenständliche Forschungsvorhaben befasst sich mit der Beantwortung einer ganzen Reihe von Detailfragen für ebendiese Überleitung. Bauphysik und Bautechnik werden zusammengeführt, miteinander verknüpft und anhand real vorkommender Anwendungen aufeinander abgestimmt. Großer Wert wurde darauf gelegt, die Auswirkungen der Variation verschiedenster Parameter wie Rohrdurchmesser, Rohrabstand, Lage des Leitungssystems im aktivierten Bauteil aber auch die Auswirkung von Putzen, Deckenverkleidungen oder die Anordnung von Wärmedämmsystemen in kritischen Bereichen plakativ und verständlich sichtbar zu machen.

Der interessierte Fachmann kann sich mit Hilfe dieses Forschungsvorhabens einen guten Überblick über die Wirkungsweise der Bauteilaktivierung in den einzelnen Bauteilen eines Gebäudes verschaffen. Das Wissen um und die Kenntnis dieser bauphysikalischen Grundsätze stellt einen maßgeblichen Baustein zum zielsicheren und richtigen Einsatz der Bauteilaktivierung dar.

Vom gegenständlichen Forschungsvorhaben und auch von anderen Forschungsvorhaben abgeleitet wird derzeit ein Planungsleitfaden für den Baupraktiker erstellt.

Wir hoffen, mit unseren umfangreichen Vorarbeiten wie der Wissensbasis für den Praktiker, dem gegenständlichen Forschungsprojekt Energiespeicher Beton und dem Planungsleitfaden „Heizen und Kühlen mit Beton“ einen wesentlichen Beitrag zur Einführung dieser Zukunftstechnologie geleistet zu haben.

Felix Friembichler

ZEMENT + BETON Handels- und Werbeges.m.b.H.

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung.....	7
II.	Verhalten einer thermisch aktivierten Geschoßdecke.....	7
II.1	Untersuchung des Einflusses der Bewehrung.....	8
II.2	Stationäre Parameterstudien.....	11
II.2.1	Einfluss der Wärmeübergangskoeffizienten.....	11
II.2.2	Einfluss des Rohrabstands.....	13
II.2.3	Einfluss des Rohrdurchmessers.....	19
II.2.4	Einfluss der Lage des Rohrregisters.....	22
II.2.5	Einfluss wärmedämmender Schichten an der Deckenuntersicht.....	25
II.2.6	Wärmeverlust der obersten Geschoßdecke.....	27
II.3	Instationäre Parameterstudien.....	38
II.3.1	Periodisch eingeschwungene Berechnungen.....	38
II.3.1.1	Heizfall.....	38
II.3.1.2	Kühlfall.....	45
II.3.2	Berechnung von Aufheiz- und Abkühlvorgängen.....	51
II.3.2.1	Aufheizvorgänge.....	51
II.3.2.2	Abkühlvorgänge.....	55
III.	Auslegungsberechnungen.....	59
III.1	Eckdaten des Modellraums.....	59
III.1.1	Raumgeometrie.....	59
III.1.2	Bauteillisten.....	60
III.2	Außenklimatische Bedingungen – extreme Verhältnisse.....	63
III.3	Dynamische Heizlastberechnung.....	64
III.4	Ermittlung der Heizflächen.....	69
III.5	Dynamische Kühllastberechnung.....	72
III.6	Ermittlung der Kühlflächen.....	79
IV.	Energiebedarfsberechnungen.....	81
IV.1	Außenklimatische Bedingungen – mittlere Verhältnisse.....	81
IV.2	Berechnung des Heizwärmebedarfs.....	83
IV.3	Berechnung des sensiblen Kühlbedarfs.....	87
V.	Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit.....	91
V.1	Strahlungsfeld im Winter.....	91
V.2	Strahlungsfeld im Sommer.....	96

VI.	Literaturverzeichnis.....	102
VII.	Anhänge	104
VII.1	Auswirkungen einer Verkleidung der Deckenuntersicht.....	104
VII.2	Dynamische Heizlastberechnung für einen Modellraum im EG	107
VII.2.1	Gebäude unterkellert	107
VII.2.1.1	offener Keller.....	107
VII.2.1.2	Sonderfall Tiefgarage	118
VII.2.1.3	geschlossener Keller	127
VII.2.2	Gebäude nicht unterkellert	134
VII.3	Detailuntersuchung: Unterbrechung der Heiz- bzw. Kühlmittelzufuhr	140
VII.3.1	Heizfall	140
VII.3.1.1	Einfluss der Betonüberdeckung.....	149
VII.3.1.2	Einfluss der Plattendicke	157
VII.3.1.3	Auswirkung auf die operative Temperatur	166
VII.3.2	Kühlfall.....	171
VII.3.2.1	Einfluss der Betonüberdeckung.....	179
VII.3.2.2	Einfluss der Plattendicke	188
VII.3.2.3	Auswirkung auf die operative Temperatur	196

I. Einleitung

Unter dem Schlagwort „Energiespeicher Beton“ wird eine großflächige Bauteilaktivierung in Betondecken und/oder Fußböden verstanden, die zu einer deutlichen Reduzierung des Heizenergieaufwands in sehr gut gedämmten Gebäuden führen soll. Hierbei wird zum einen bewusst das hohe Wärmespeichervermögen des Betons ausgenutzt. Zum anderen ermöglicht die Verfügbarkeit sehr großer Heizflächen einen Heizbetrieb mit sehr niedrigen Heizmitteltemperaturen. Dies macht hohe Wirkungsgrade sowohl beim Betrieb von Solarkollektoren als auch bei Wärmepumpenlösungen möglich. Zudem sorgt die niedrige Temperatur der Flächenheizungen für einen hohen Wohnkomfort.

Eine weitere wichtige Eigenschaft thermisch aktivierter Fußböden und/oder Decken ist in deren Kühlpotential zu sehen. Aufgrund der großen aktivierbaren Flächen kann bereits mit relativ hohen Kühlmitteltemperaturen ein sehr wirksamer Kühleffekt erzielt werden. Dies ist zum einen wiederum energiesparend. Zum anderen wird aufgrund der Vermeidung tiefer Oberflächentemperaturen ein hoher Komfort gewährleistet.

Der Möglichkeit, über thermisch aktivierbare Bauteile auch kühlen zu können, kommt vor dem Hintergrund des derzeit ablaufenden Klimawandels besondere Bedeutung zu. Die in die Betonplatte eingelassenen Kühlregister ermöglichen bei Bedarf die energiesparende Bereitstellung von hohen Kühlleistungen. Die Bauteilaktivierung kann somit als Teil zukunftsge-rechter Planung angesehen werden.

Obzwar dieser 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 soll die Funktionsweise thermisch aktivierter Betondecken aus bauphysikalischer Sicht untersucht werden. Die Arbeit soll zum besseren Verständnis der Bauteilaktivierung beitragen und letztendlich Grundlagen für Planungsempfehlungen liefern.

Das Projekt wird in zwei Hauptteile gegliedert. Der erste Teil ist bauteilbezogen und den Auswirkungen von verschiedenen baulichen Maßnahmen auf das Verhalten einer thermisch aktivierten Geschoßdecke gewidmet. Im zweiten Teil wird die Auswirkung einer beheizten bzw. gekühlten Decke auf den darunter liegenden Raum untersucht. Die Fragestellungen reichen hier von technisch notwendigen Informationen wie Heizlast und Aufheizverhalten bis hin zu einer Bewertung der thermischen Raumqualität.

II. Verhalten einer thermisch aktivierten Geschoßdecke

Ziel dieses Teils der Untersuchung ist das Gewinnen von Erkenntnissen über das stationäre und instationäre Verhalten einer thermisch aktivierten Geschoßdecke¹ in Abhängigkeit von verschiedensten Parametern. Von Interesse sind vor allem folgende Einflüsse:

1. Achsabstand der verlegten Rohre,
2. Durchmesser der Rohre,
3. Höhenlage des Rohrregisters,
4. 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

¹ Unter Geschoßdecke wird im Folgenden die Decke zwischen zwei Regelgeschossen verstanden.

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 von den jeweils gewählten Parametern von Interesse. Diese Fragestellung lässt sich nur mit instationären, d. h. zeitabhängigen Berechnungen beantworten, wobei nicht nur die Wärmeabgabe sondern auch die Wärmespeicherung der Betondecke eine Rolle spielt.

II.1 Untersuchung des Einflusses der Bewehrung

Der Einfluss der Bewehrung auf den Wärmedurchgang durch eine Stahlbetonscheibe wird üblicherweise durch Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu erfassen getrachtet. Für unbewehrten Beton hoher Dichte gibt die EN 12524:2000 [1] eine Wärmeleitfähigkeit von $2,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ an. Ist der Beton bewehrt, so ist je nach Grad der Bewehrung dieser Wert auf 2,3 oder 2,5 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ zu erhöhen [1], [2].

Im Fall einer Geschoßdecke ist diese normativ vorgeschlagene Grobnäherung unkritisch, da die Temperaturdifferenz zwischen dem Raum unter und dem Raum oberhalb der Decke zu meist 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. 1 dargestellt.

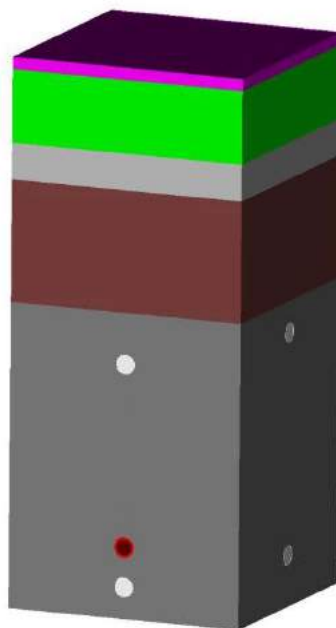
	d [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	c [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
oben				
Bodenbelag (Fliesen)	0,0100	1,000	2000	0,92
Zementestrich	0,0600	1,400	2000	1,13
PE-Folie	0,0002			
Trittschalldämmung	0,0300	0,038	32	1,45
Dampfbremse	0,0004			
Dämmschüttung gebunden	0,1000	0,050	200	1,56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

Tab. 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 wurde. Eine zusätzlich etwaig erforderliche Verteilerbewehrung wurde 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. Abbildung 1 zeigt das Berechnungsmodell.



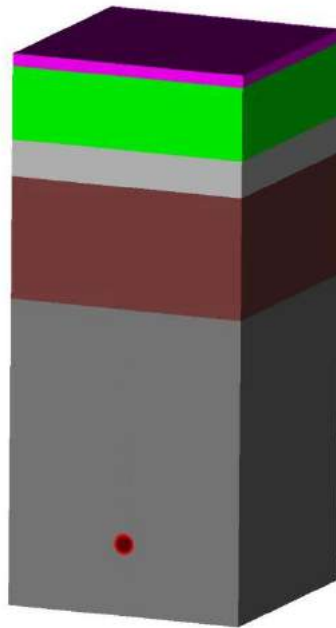
AnTherm V.7.124 2013.09.23 © T.Kornicki www.kornicki.com

Abb. 1: Dreidimensionales Berechnungsmodell der aktivierten Geschoßdecke; kreuzweise verlegte Bewehrung: hellgrau; Heiz-/Kühlrohr: rot; Schichtaufbau gemäß Tab. 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 $L_{r,u} = 0,160494 \text{ WK}^{-1}$. 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 Deckenfläche bezogenen thermischen Leitwert. Wird dieser Wert mit der Differenz zwischen der Temperatur der Fluids 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 Abbildung 2 gezeigten Berechnungsmodells durchgeführt. Dieses Be-

rechnungsmodell entspricht überwiegend jenem der Abbildung 1. Lediglich die Bewehrung wird entfernt bzw. deren thermischer Einfluss vernachlässigt. Als Parameter dieser Untersuchung tritt die Wärmeleitfähigkeit des Betons auf.



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

Abb. 2: Dreidimensionales Berechnungsmodell der aktivierten Geschoßdecke; Ersatzmodell ohne Bewehrung

Als Ergebnis der Untersuchung sind in folgender Tabelle 2 die für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Stahlbetons errechneten thermischen Leitwerte $L_{r,u}$ aufgelistet.

λ_{STB} [$Wm^{-1}K^{-1}$]	$L_{r,u}$ [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. 2: Gegenüberstellung der für verschiedene Wärmeleitfähigkeits-Werte des Stahlbetons λ_{STB} berechneten thermischen Leitwerte $L_{r,u}$ (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 Tabelle 2 angegebenen Abweichungen vom Referenz-Wert $L_{r,u} = 0,1605 \text{ WK}^{-1}$ (100%) sind für den untersuchten Bereich von Wärmeleitfähigkeits-Werten zwischen 2,0 und 2,5 $Wm^{-1}K^{-1}$ erstaunlich gering.

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 $\lambda_{\text{STB}} = 2,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 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 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.

II.2 Stationäre Parameterstudien

In diesem Kapitel 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 hier stationär, also zeitunabhängig durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen somit die Eigenschaften thermisch aktivierter Geschoßdecken für den Fall, dass sowohl die Raumlufttemperaturen als auch die Temperaturen des Heiz- bzw. Kühlfluids 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 II.3 präsentiert.

II.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 einen durch den Strahlungsaustausch zwischen der Deckenoberfläche und den inneren Oberflächen aller anderen raumbegrenzenden Bauteile sowie dem Mobiliar verursacht. Zum anderen stellt sich ein Wärmestrom von der Decke zur Raumluft aufgrund konvektiver Vorgänge ein.

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 Tabelle 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 [3]
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. 3: Für die Parameterstudien verwendete Wärmeübergangskoeffizienten

Bei einer gekühlten Decke wird z. B. gemäß Tab. 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 thermischen Leitwerte zu quantifizieren, wurde der thermische Leitwert zwischen Heizrohr und dem unter der Geschoßdecke

liegendem Raum für drei verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten berechnet. Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis dieser Vergleichsrechnung.

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

Tab. 4: Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten im Rohr α_{Rohr} auf den thermischen Leitwert $L_{r,u}$ 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 Leitwert $L_{r,u}$ nur wenig verändert wird. Es wird daher bei allen folgenden Parameterstudien der Wärmeübergangskoeffizient im Rohr auf $500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ gesetzt.

II.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 II.1 abgeleiteten thermischen Ersatzmodells. Deckenaufbau und Rohreigenschaften entsprechen den in Abschnitt II.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.

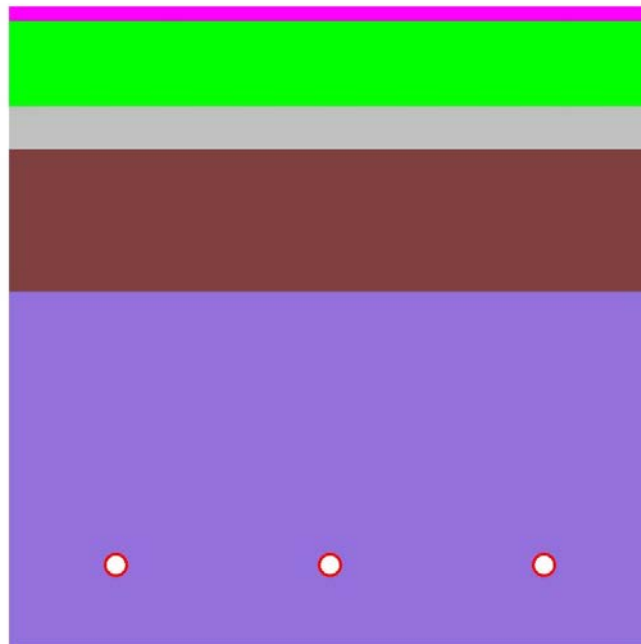
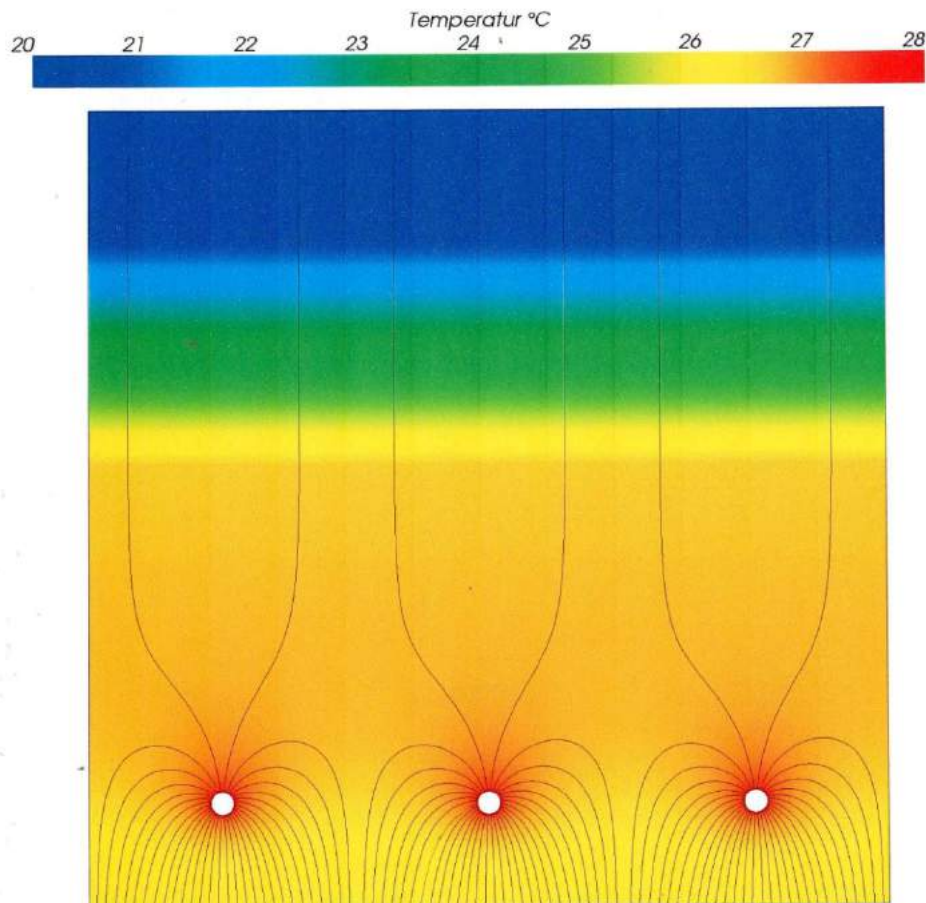


Abb. 3: Zweidimensionales Berechnungsmodell; **Ausschnitt: 3 Rohre;** Deckenaufbau nach Tab. 1; Rohre 17 x 2,0; Achsabstand der Rohre: 150 mm; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenuntersicht

Neben den eigentlich interessierenden numerischen Ergebnissen können die Temperaturverteilung in der Decke, aber auch der Wärmefluss durch die Decke visualisiert werden. Als Beispiel zeigt folgende Abbildung für das in Abb. 3 gezeigte Berechnungsmodell ein Falschfarbenbild der aktivierten Geschoßdecke mit eingezeichneten Wärmestromlinien im Falle der Beheizung. Die Temperatur des Heizmediums wurde hierbei mit konstant 28 °C angesetzt; die Lufttemperatur sowohl im Raum unter als auch im Raum oberhalb der Geschoßdecke wurde auf konstant 20 °C gehalten.



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

Abb. 4: Darstellung der Temperaturverteilung und des Wärmestroms; **Heizfall:** Heizmitteltemperatur 28 °C; Raumlufttemperaturen 20 °C ; **Ausschnitt: 3 Rohre;** Rohr-Außendurchmesser: 17 mm; Achsabstand der Rohre: 150 mm; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenunter-sicht

Wärmestrom zwischen je 2 Stromlinien: $0,2 \text{ Wm}^{-1}$

Die Falschfarbendarstellung zeigt, dass die Oberflächentemperatur der Deckenunter-sicht bei ca. 26 °C liegt. Eine genauere Analyse zeigt, dass sie zwischen 25,6 und 25,7 °C schwankt. Die Oberflächentemperatur des Fußbodens 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 erkennt man somit unmittelbar, 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 abgegebenen 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.

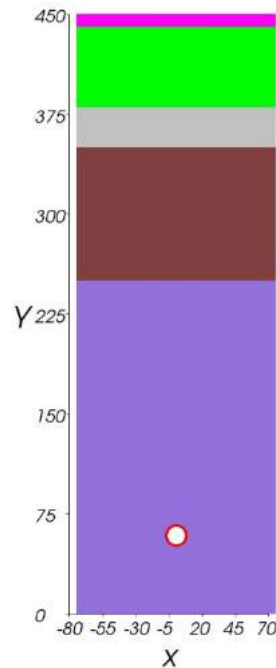


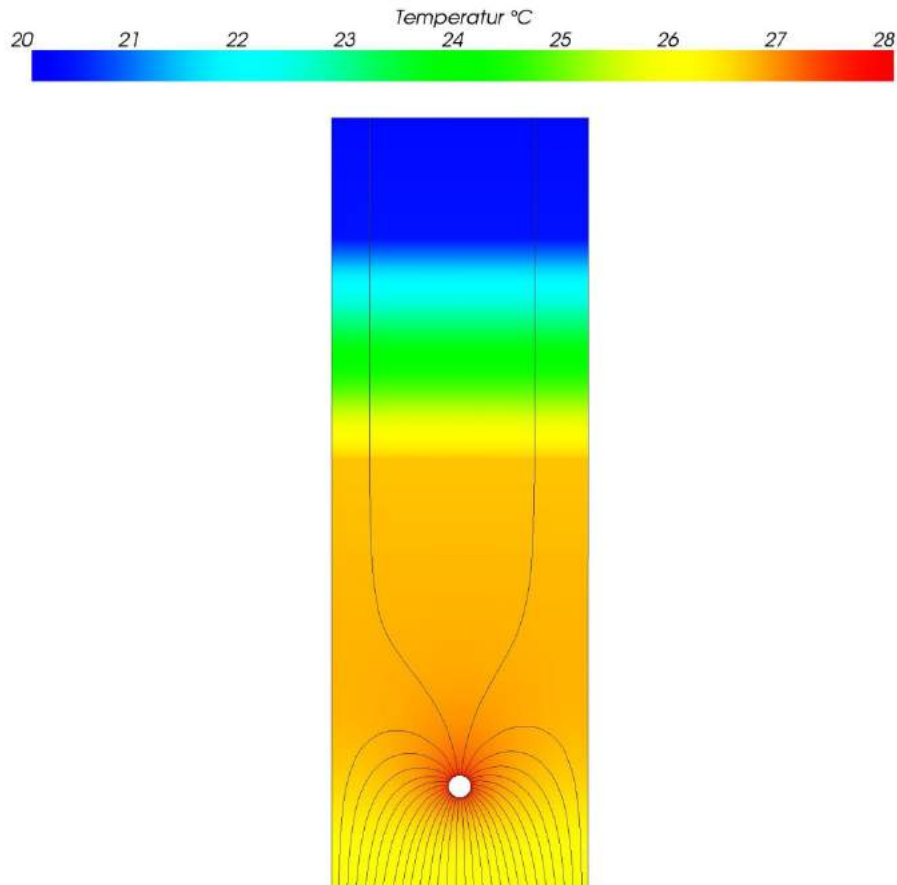
Abb. 5: Zweidimensionales Berechnungsmodell; **Ausschnitt: 1 Rohr;** Deckenaufbau nach Tab. 1; Rohre 17 x 2,0; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenuntersicht; Breite des Berechnungsausschnitts: 150 mm

Die Breite des in Abb. 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 Geschoßdecke läuft somit auf eine mehrfache Berechnung des in Abb. 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. 5 gezeigte Berechnungsmodell zeigt Abbildung 6.

Als für die Fragestellung relevantes Ergebnis wird der längenbezogene thermische Leitwert $L_{r,u}$ 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:

$$q = \frac{L_{r,u}}{b} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) = \Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) \quad . \quad (1)$$

Natürlich gilt Gleichung (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 $L_{r,u}$ und damit auch $\Lambda_{r,u}$ aufgrund der anders anzusetzenden Wärmeübergangskoeffizienten (siehe Tab. 3) für den Heiz- und den Kühlfall deutlich unterschiedliche Werte annehmen.



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

Abb. 6: Darstellung der Temperaturverteilung und des Wärmestroms; **Heizfall:** Heizmitteltemperatur 28 °C; Raumlufttemperaturen 20 °C ; **Ausschnitt: 1 Rohr;** Rohr-Außendurchmesser: 17 mm; Achsabstand der Rohre: 150 mm; Lage des Rohrregisters: 50 mm über Deckenunter-sicht

Wärmestrom zwischen je 2 Stromlinien: $0,2 \text{ Wm}^{-1}$

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 5 dargestellt.

b [m]	$L_{r,u}$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\Lambda_{r,u}$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	
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. 5: 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]	$L_{r,u}$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\Lambda_{r,u}$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	
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. 6: 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. 5 und 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.

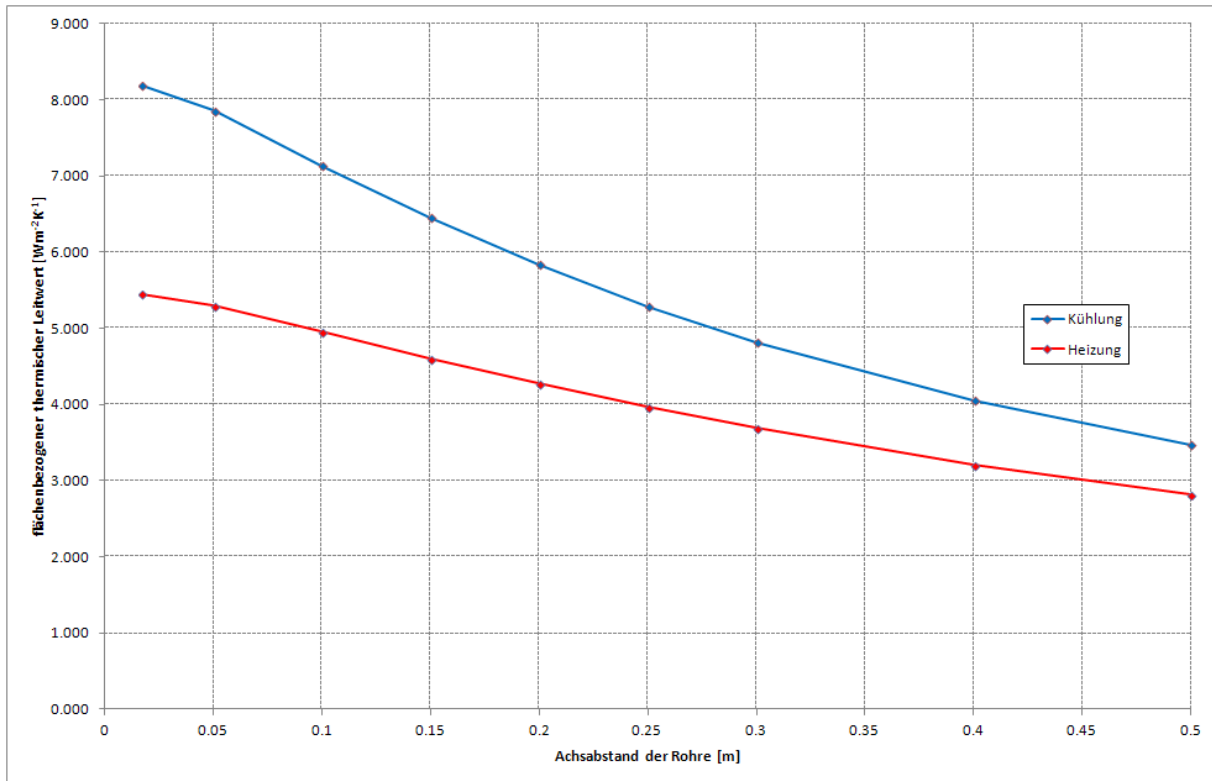


Abb. 7: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Achsabstand der Rohre

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. 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

$$\Lambda_{r,u} = a \cdot d^2 + b \cdot d + c \quad (2)$$

approximiert werden können. d bezeichnet in Gleichung (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 $d \geq 0,05\text{m}$) rückgerechnet werden. Die folgende Tabelle zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 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. 7: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (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

$$\bar{\Theta}_{s,u} = \Theta_u + \frac{\Lambda_{r,u}}{\alpha_{s,u}} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) \quad (3)$$

Gemäß Tabelle 3 ist der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{s,u}$ im Fall der Beheizung mit $6,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, im Fall der Kühlung mit $10,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ anzusetzen. Gleichung (3) erlaubt somit unter Zugriff auf Gleichung (2) und die in Tabelle 7 aufgelisteten Regressionskoeffizienten die Berechnung der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht.

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 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.

II.2.3 Einfluss des Rohrdurchmessers

Die bisherigen Berechnungen wurden für Rohre der Dimension $17 \times 2,0^2$ 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 $14 \times 1,5$ und $20 \times 2,0$ für alle in Betracht gezogenen Rohrabstände. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist für den Heiz- und den Kühlfall in Abbildungen 8 und 9 dargestellt.

² Gemäß DIN 16893:2000 [18] bezeichnet der erste Wert (17) den Außendurchmesser des Rohrs in Millimetern, während der zweite Wert (2,0) die Wanddicke des Rohrs in Millimetern kennzeichnet.

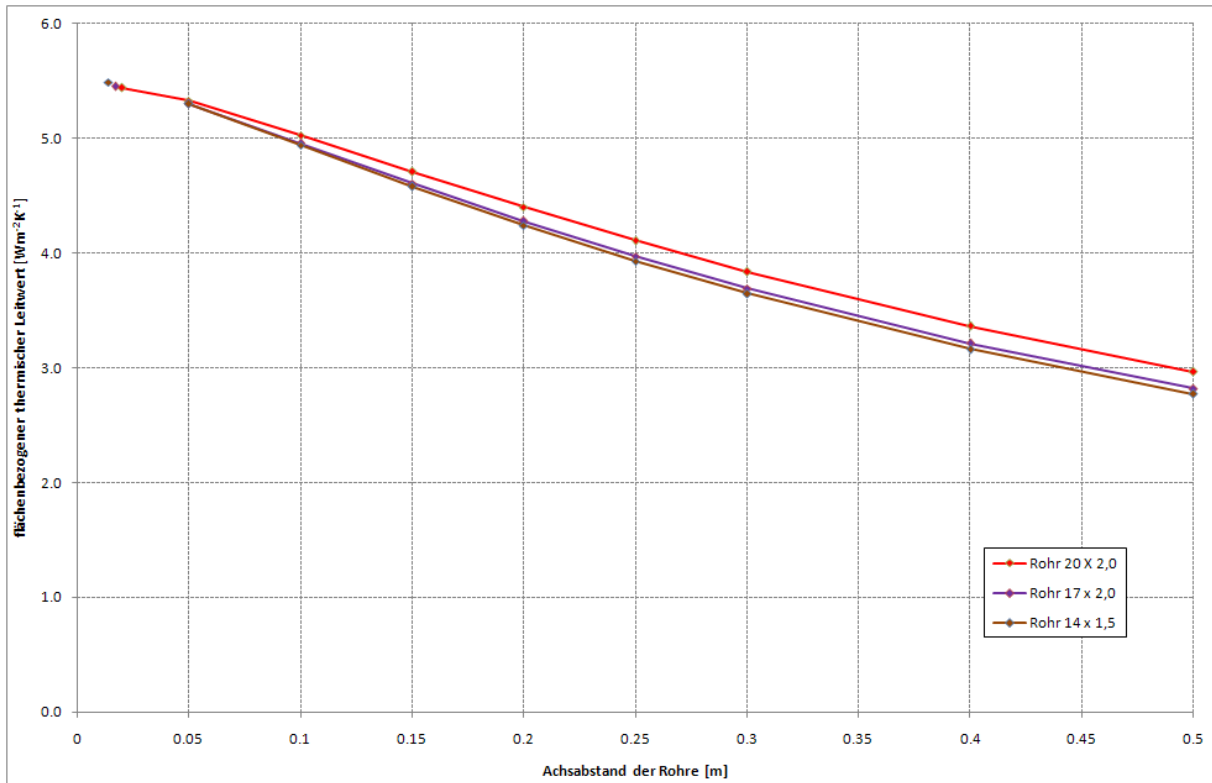


Abb. 8: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Achsabstand der Rohre und von der Rohrdimension

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 8 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 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. 8: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

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

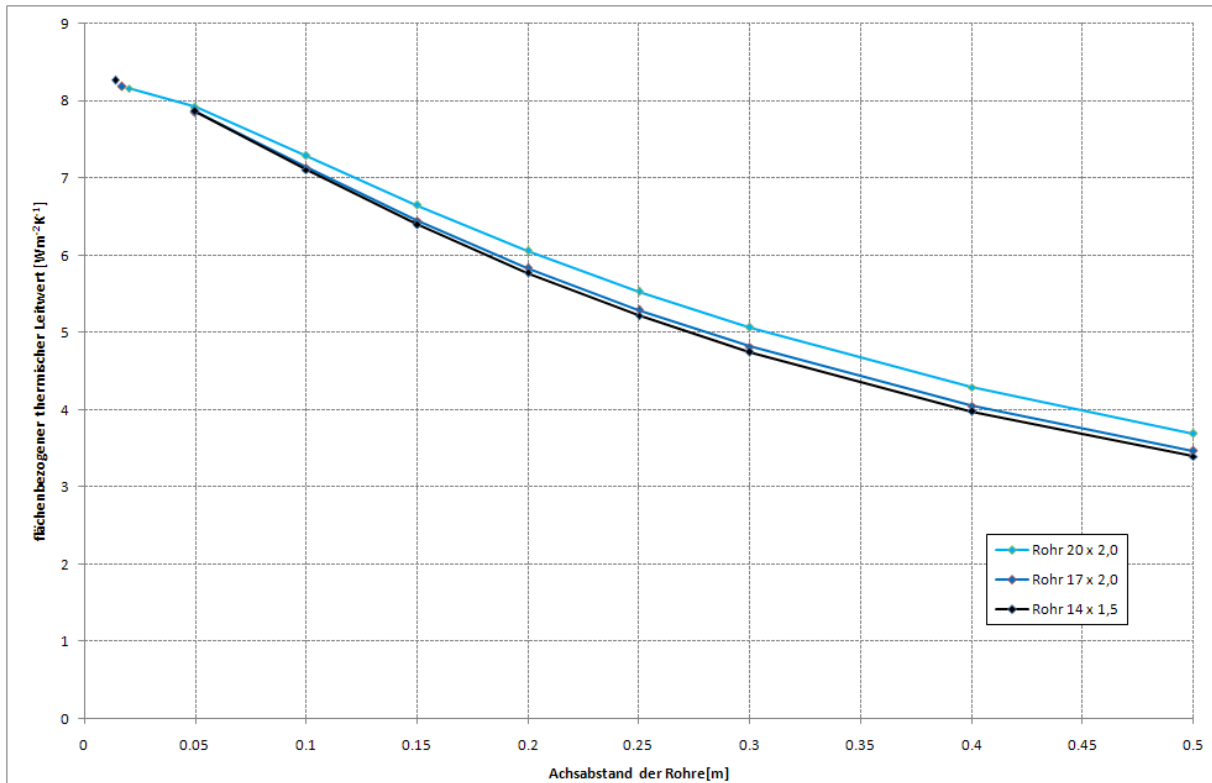


Abb. 9: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Achsabstand der Rohre und von der Rohrdimension

Die folgende Tabelle 9 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 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. 9: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

Conclusio:

- Die Rohre 17 x 2,0 und 14 x 1,5 führen auf fast gleiche flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistungen.
- Die Verwendung des Rohres 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.

II.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.

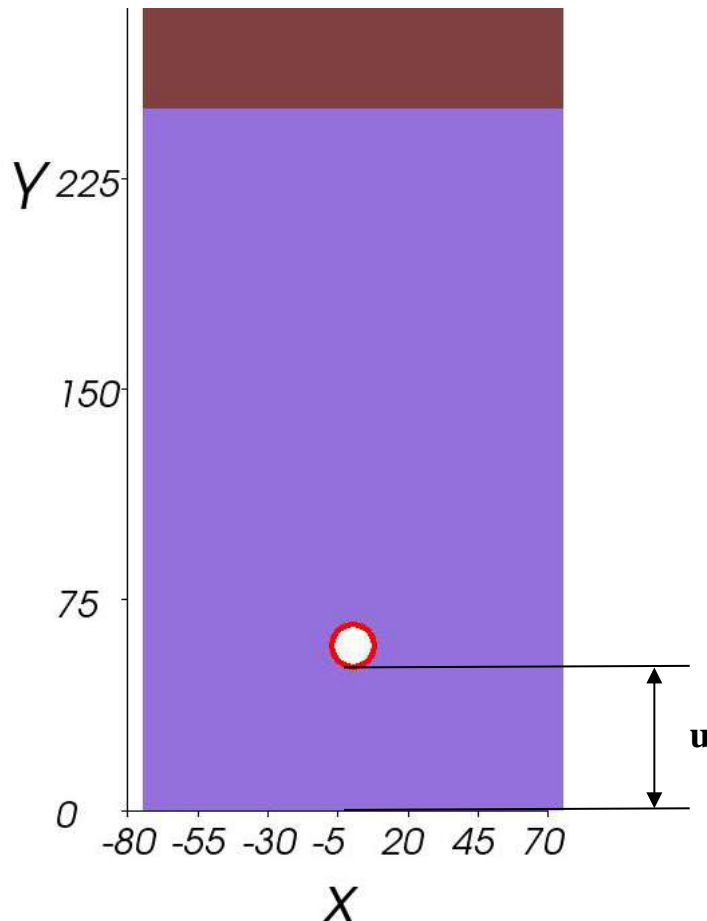


Abb. 10: Ausschnitt aus dem Berechnungsmodell: 250 mm dicke Deckenplatte mit Teilen der Dämmschüttung; Rohr 17 x 2,0, Breite des Berechnungsausschnitts (Achsabstand der Rohre): 150 mm; **Überdeckung u :** 50 mm

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 100 mm und 150 mm für alle in Betracht gezogenen Rohrabstände wiederholt. Das Ergebnis dieser Parameterstudien zeigt für den Heizfall die folgende Abbildung.

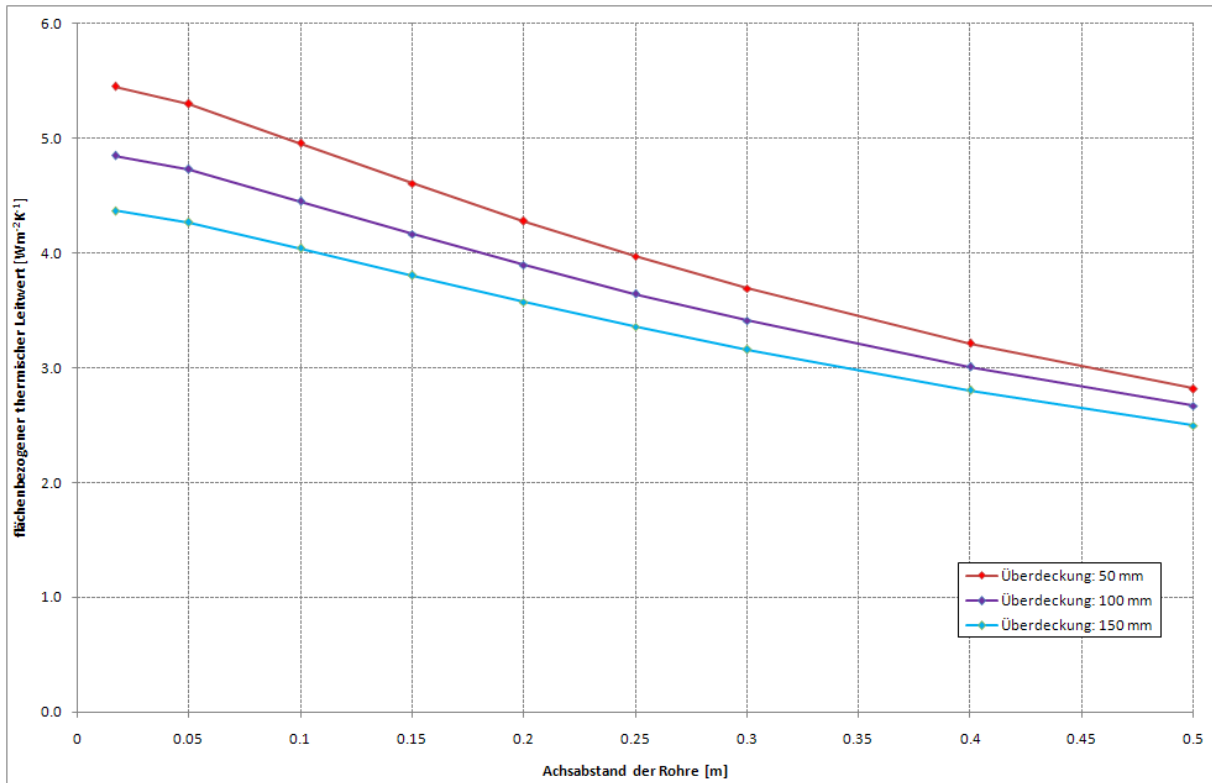


Abb. 11: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ von der Lage des Rohrregisters in der Decke

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 10 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 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. 10: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

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

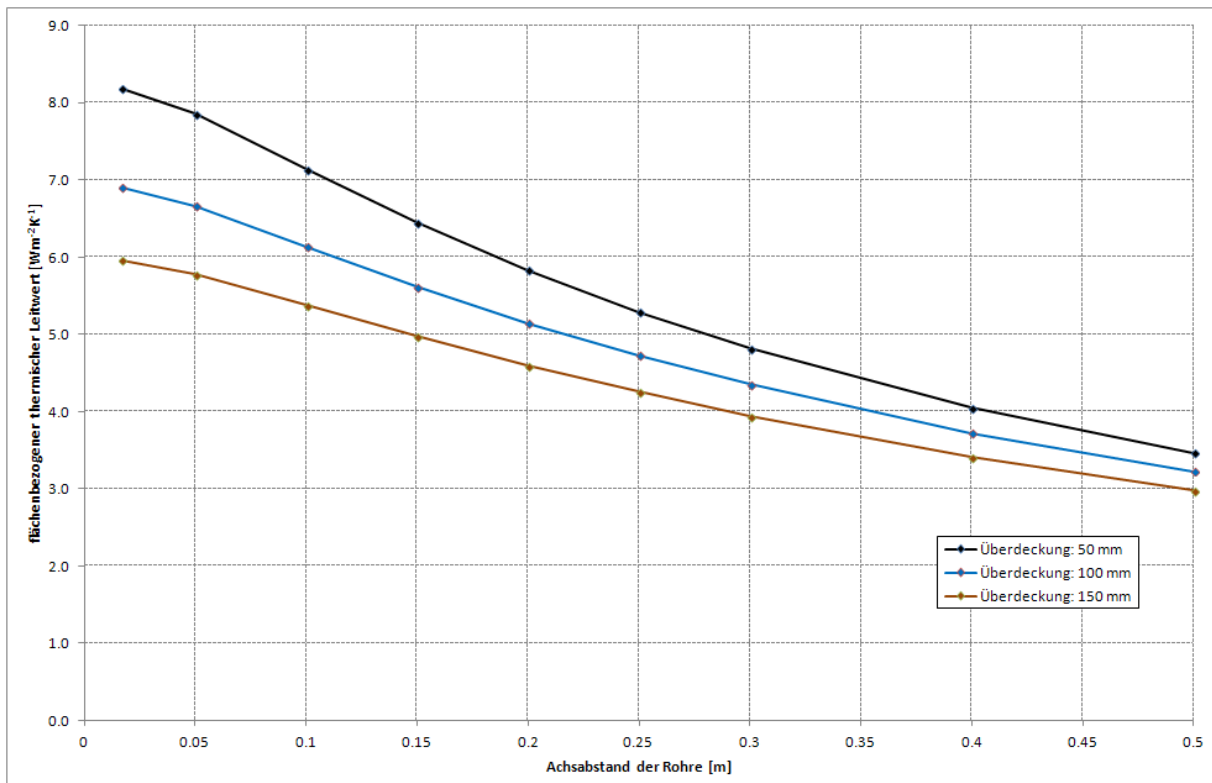


Abb. 12: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ von der Lage des Rohrregisters in der Decke

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 Tabelle 11 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 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. 11: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (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.

II.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 eine Verspachtelung der Deckenuntersicht mit einem Innenputz auf die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung der Decke hat.

Um den Einfluss der Verspachtelung der Deckenuntersicht auf die Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung zu untersuchen, wird der in Tab. 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 [2] 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.

Die Untersuchung wird für ein Register von Rohren mit 17 mm Außendurchmesser und mit einer Betonüberdeckung von 50 mm (siehe Abb. 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 gegenüber gestellt.

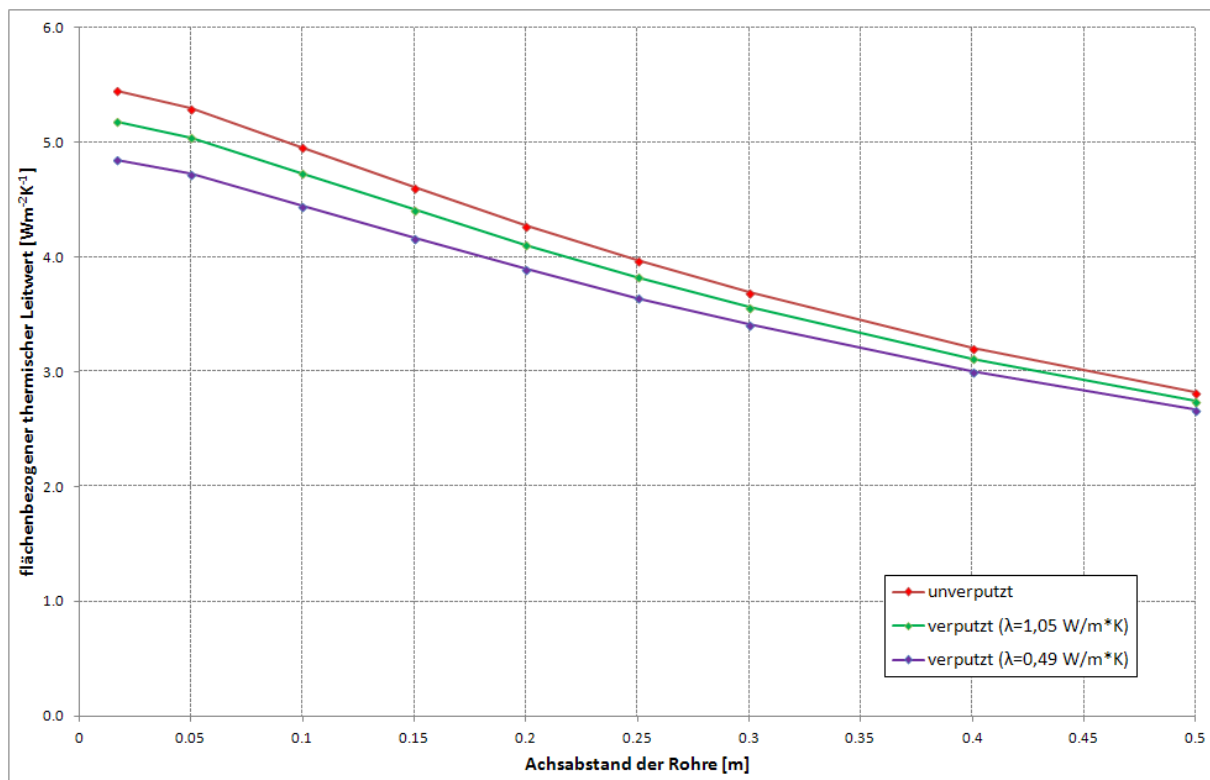


Abb. 13: Heizfall: Vergleich der flächenbezogenen thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ zwischen unverputzter und verputzter Geschoßdecke

Die folgende Tabelle 12 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 13 dargestellten Verläufe.

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

Tab. 12: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

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

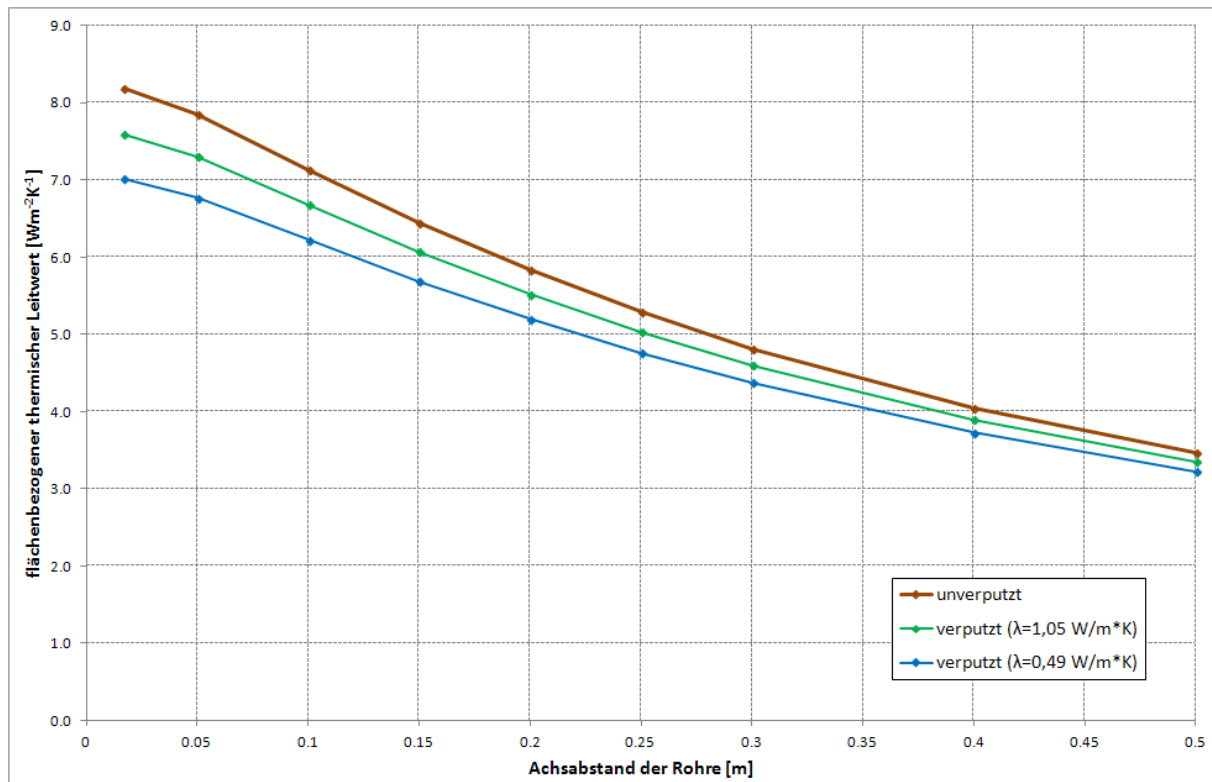


Abb. 14: Kühlfall: Vergleich der flächenbezogenen thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ zwischen unverputzter und verputzter Geschoßdecke

Die folgende Tabelle 13 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 14 dargestellten Verläufe.

	a [$\text{Wm}^{-4}\text{K}^{-1}$]	b [$\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	c [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
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

Tab. 13: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

Sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlfall zeigt sich, dass 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.

Die Auswirkung der Putzschicht 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 8% reduziert. Bei 50 cm Rohrabstand reduziert sich die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung hingegen nur um 5%. Im Fall der Kühlung ist dieser Effekt deutlicher spürbar. 14% Reduktion bei 5 cm Rohrabstand stehen hier 7% bei 50 cm Rohrabstand gegenüber.

Zudem zeigt sich, dass die Wahl des Putzmaterials in Hinblick auf dessen Wärmeleitfähigkeit die Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme deutlich beeinflusst.

Conclusio:

- Im Fall der Aufbringung einer Putzschicht an der Deckenuntersicht sinkt die flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung des Rohrregisters.
- Die Reduktion der flächenbezogenen Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung ist bei kleinen Rohrabständen ausgeprägter als bei großen.
- Als Planungsempfehlung ergibt sich hieraus, 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.

II.2.6 Wärmeverlust der obersten Geschoßdecke

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 Wärmemenge kommt entweder dem unbeheizten Dachraum zu oder geht direkt nach außen verloren. Da dieser Effekt bei der Auslegung der Bauteilaktivierung berücksichtigt werden muss, soll 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. 14 erreicht einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,19 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und entspricht damit den heute aktuellen Vorgaben der OIB-Richtlinie 6 [7] ($U \leq 0,20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Dächer mit deutlich weniger Wärmedämmung sind im Neubau somit nicht mehr zulässig.

	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	0,1800	0,036	25	1,40
Dampfsperrbahn	0,0040			
Stahlbetondecke	0,2500	2,200	2400	1,00
unten				

Tab. 14: Schichtaufbau der obersten Geschoßdecke;
Aufbau nach OIB-Richtlinie 6; $U = 0,19 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

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

In der folgenden Tabelle 16 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			
Filterfließ	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. 16: Schichtaufbau der obersten Geschoßdecke;
Passivhausstandard; $U = 0,11 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Den folgenden Parameterstudien werden die in den Tabellen 14, 15 und 16 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. 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 Tabellen 14 bis 16 gezeigten, thermisch aktivierten Deckenaufbauten jenen der bisher untersuchten Geschoßdecke gegenüber gestellt.

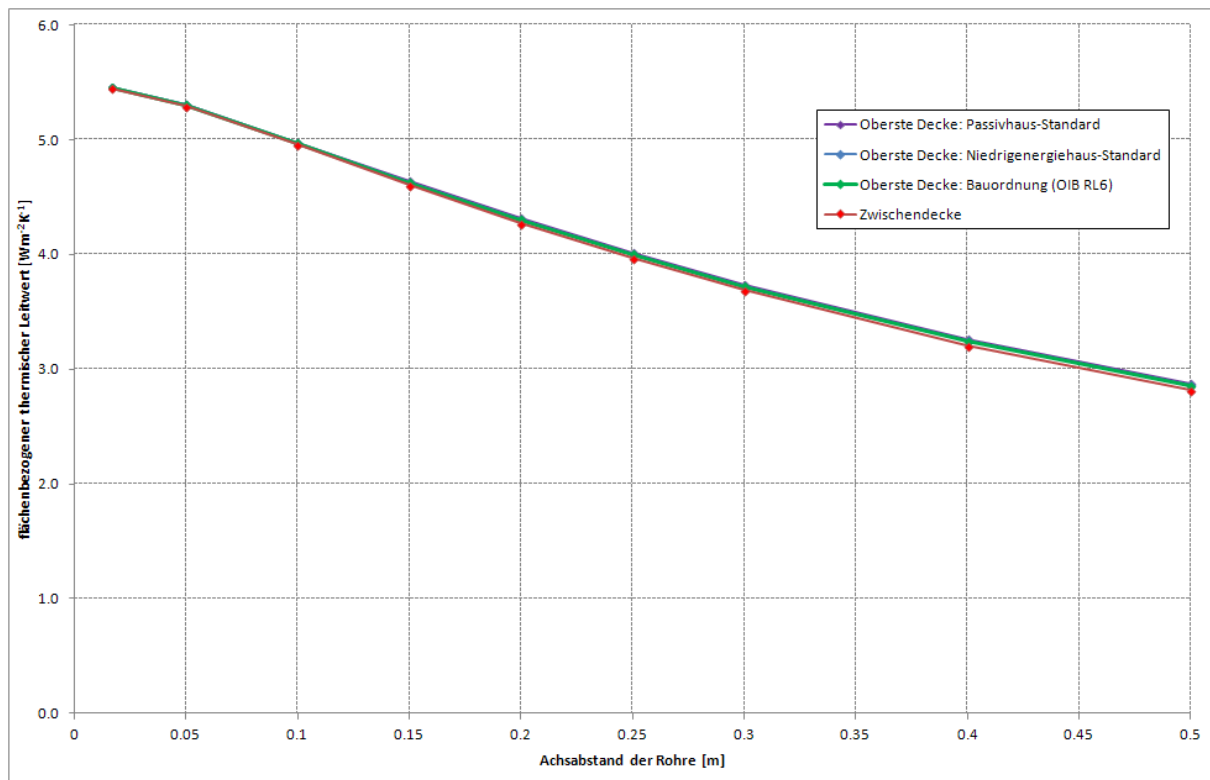


Abb. 15: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tabelle 17 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 15 dargestellten Verläufe.

	a [$\text{Wm}^{-4}\text{K}^{-1}$]	b [$\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	c [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
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. 17: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

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

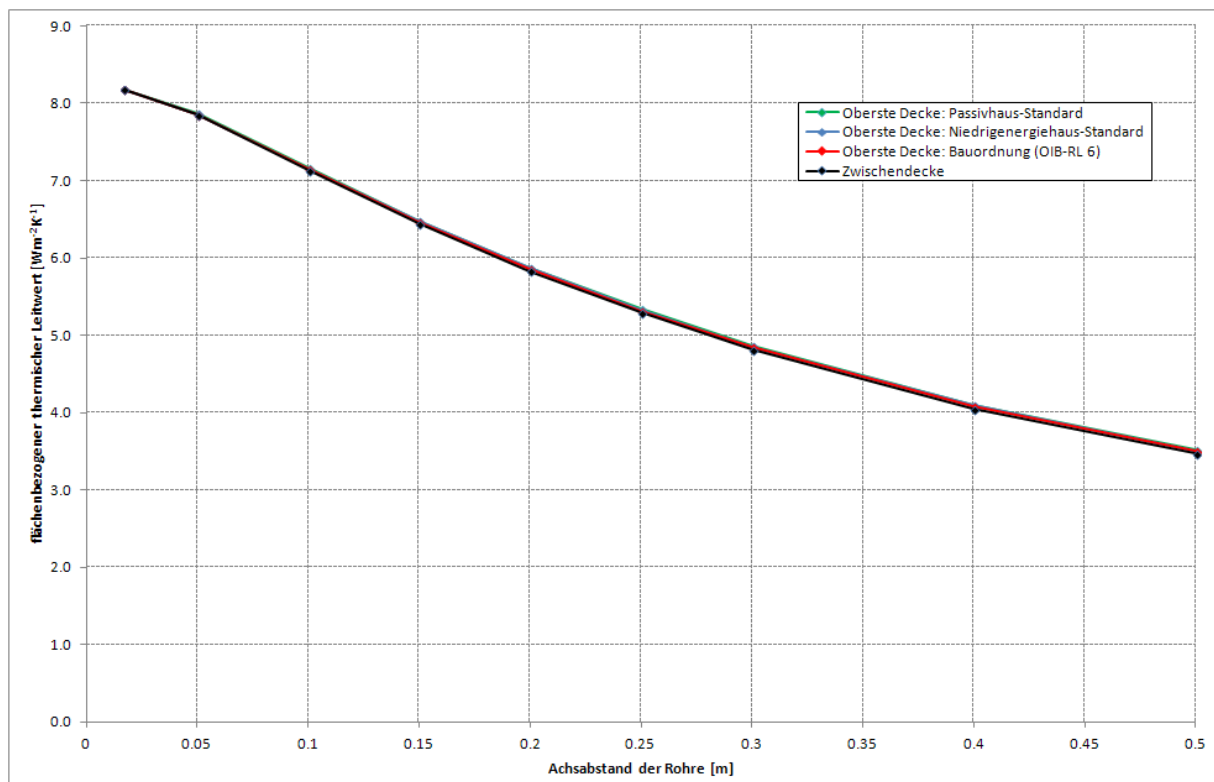


Abb. 16: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tabelle 18 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 16 dargestellten Verläufe.

	a [$\text{Wm}^{-4}\text{K}^{-1}$]	b [$\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	c [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
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. 18: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (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 (1) gemäß

$$q_{\text{tot}} = q_u + q_o = \Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) + \Lambda_{r,o} \cdot (\Theta_r - \Theta_o) \quad . \quad (4)$$

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.

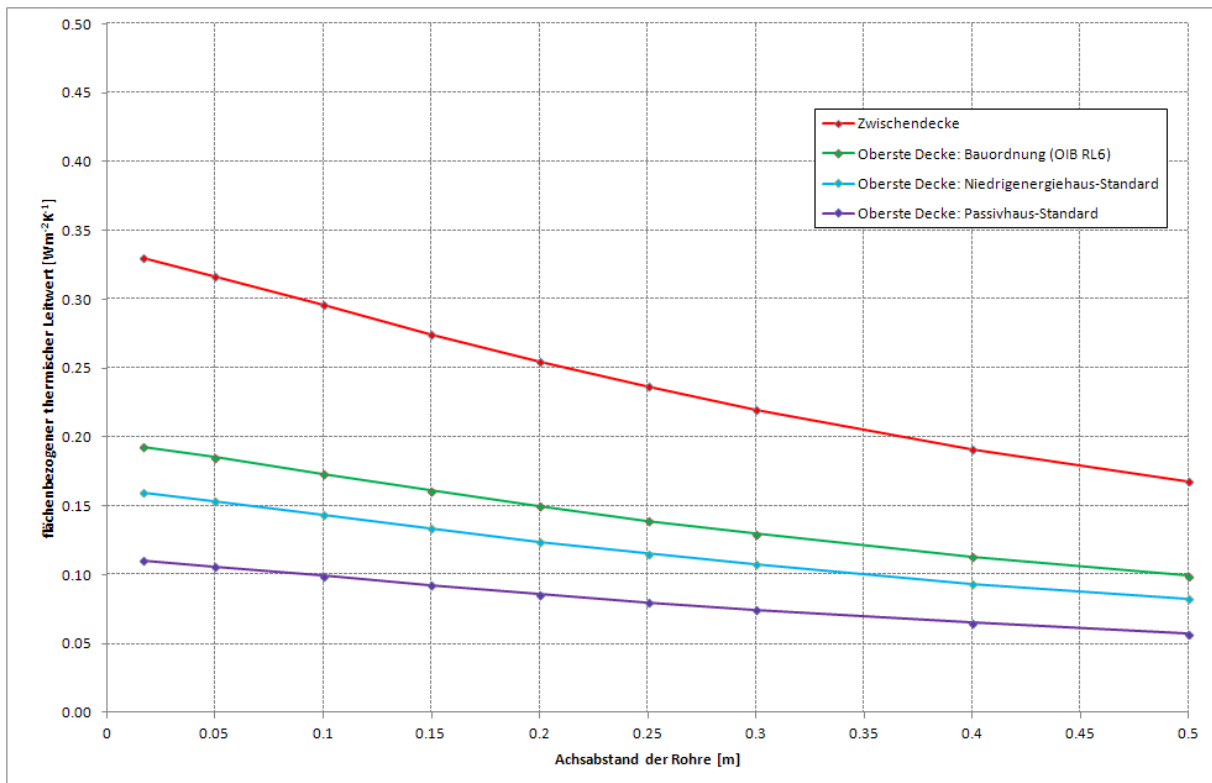


Abb. 17: Heizfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\lambda_{r,0}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tabelle 19 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 17 dargestellten Verläufe.

	a [$\text{Wm}^{-4}\text{K}^{-1}$]	b [$\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	c [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
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. 19: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,0}$ gemäß Gleichung (2).

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

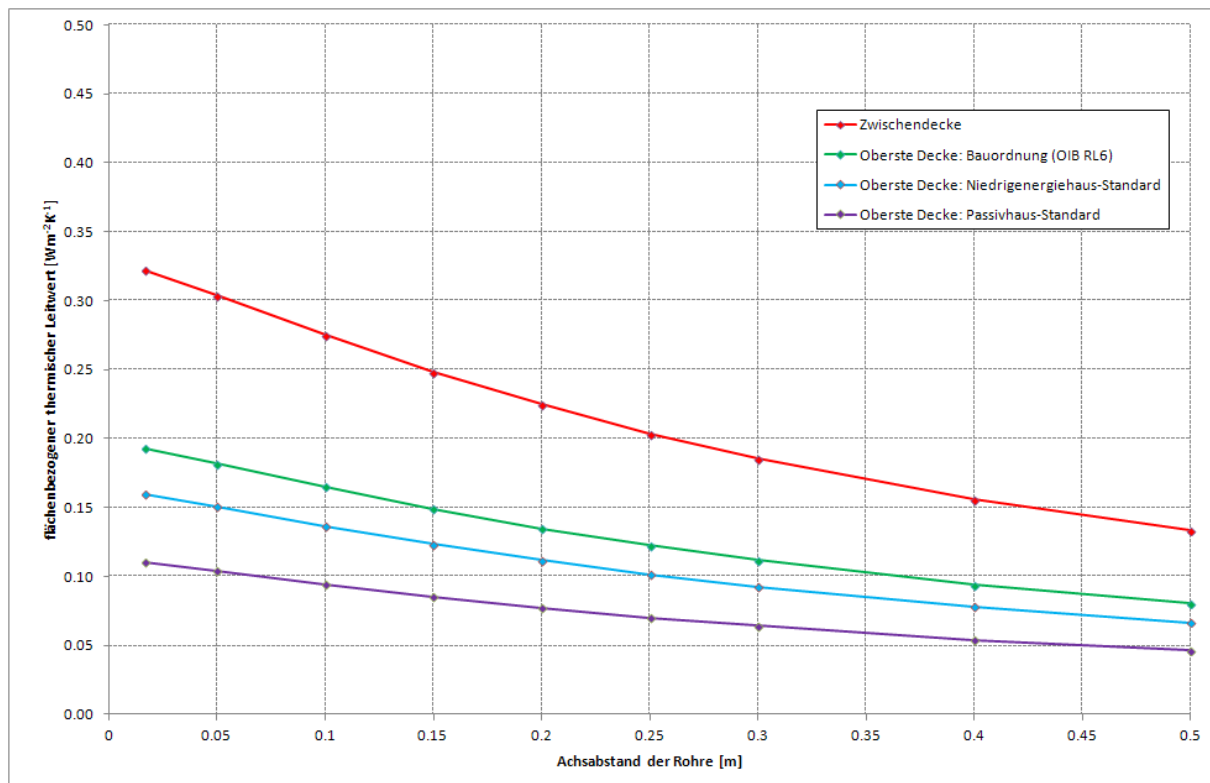


Abb. 18: Kühlfall: Abhängigkeit des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,0}$ vom Deckenaufbau

Die folgende Tabelle 20 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. 18 dargestellten Verläufe.

	a [$\text{Wm}^{-4}\text{K}^{-1}$]	b [$\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	c [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
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. 20: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,o}$ gemäß Gleichung (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

$$v = \frac{\Lambda_{r,o}}{\Lambda_{r,u}} \quad , \quad (5)$$

so zeigt eine genauere Analyse der in Abb. 15 bis Abb. 18 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. 21: Verhältnis v für verschiedene Decken- bzw. Dachaufbauten

Mit Kenntnis der Werte von v kann der flächenbezogene Leitwert $\Lambda_{r,o}$ unter Anwendung von Definitionsgleichung (5) leicht aus dem mittels Regression errechneten Leitwert $\Lambda_{r,u}$ errechnet werden (siehe Gleichung (2) und die zugehörigen Tabellen). Damit ist es unmittelbar möglich, die gesamte, flächenbezogene Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung des Rohrregisters unter Verwendung von Gleichung (4) 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) und (5) unschwer ableitbar, gilt für diesen Spezialfall

$$a = \frac{v}{1+v} \quad . \quad (6)$$

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

$$a = \frac{q_o}{q_{tot}} = \frac{v \cdot (\Theta_r - \Theta_o)}{\Theta_r - \Theta_u + v \cdot (\Theta_r - \Theta_o)} \quad . \quad (7)$$

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) und (7) die Temperatur über dem betrachteten Flachdach Θ_o nicht als Lufttemperatur sondern als sog. „Strahlungslufttemperatur“ interpretiert wird. Die Strahlungslufttemperatur [5] ist eine Fiktivtemperatur, bei deren Verwendung nicht nur die Einflüsse der Außenlufttemperatur sondern auch 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. 22: Maximale Strahlungslufttemperaturen am Norm-Sommertag für ein Flachdach in Wien

Die in Tabelle 22 angeführten Strahlungslufttemperaturen treten um 13⁰⁰ 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 (7) einzusetzen.

Der Anteil a des Wärmezufusses einer thermisch aktivierten Decke 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.

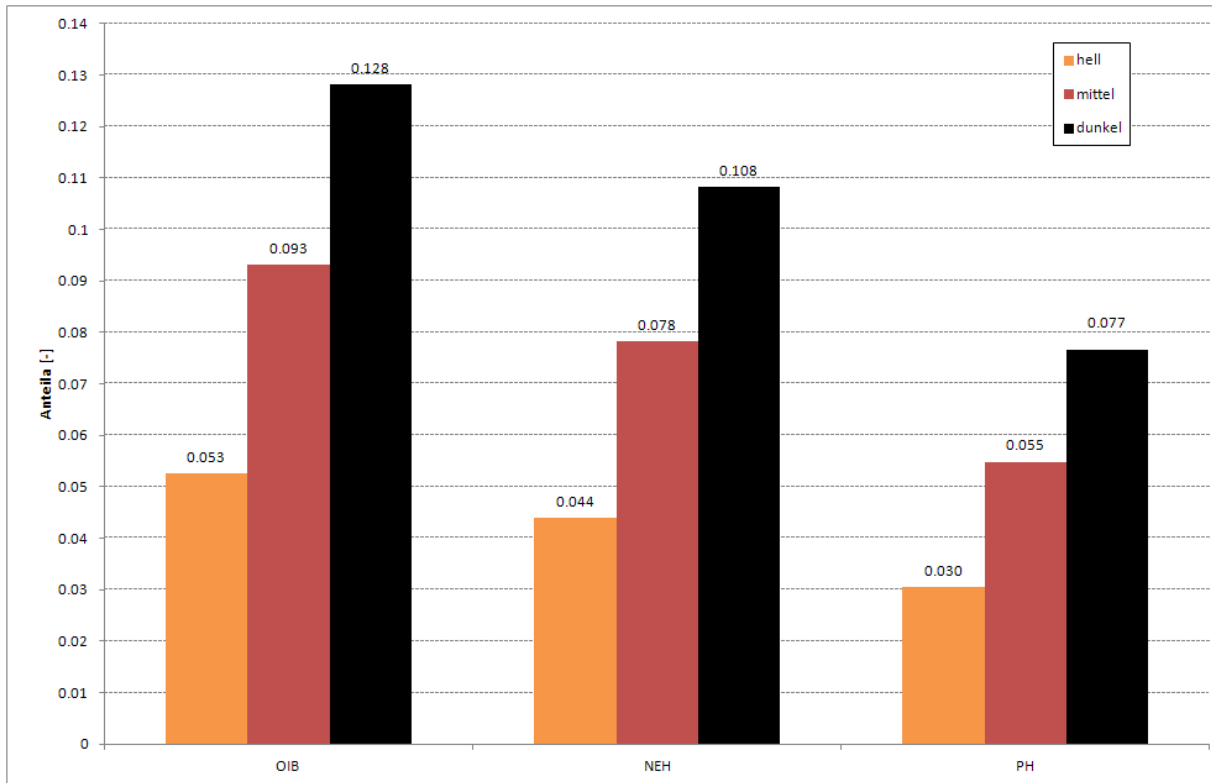


Abb. 19: Kühlfall: Anteil a der von oben in das Register kommenden Wärmeleistung an der gesamten Wärmeaufnahmeleistung des Registers in Abhängigkeit von der Farbe der Dachhaut (siehe Tab. 22)

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 Trübungsgrad 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_0 [°C]
unbewölkt	-13,4
leicht bewölkt	-12,3
stark bewölkt	-11,1

Tab. 23: Strahlungslufttemperaturen bei -10 °C Lufttemperatur für ein Flachdach in Wien

Die folgende Abbildung zeigt den nach Gleichung (7) 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.

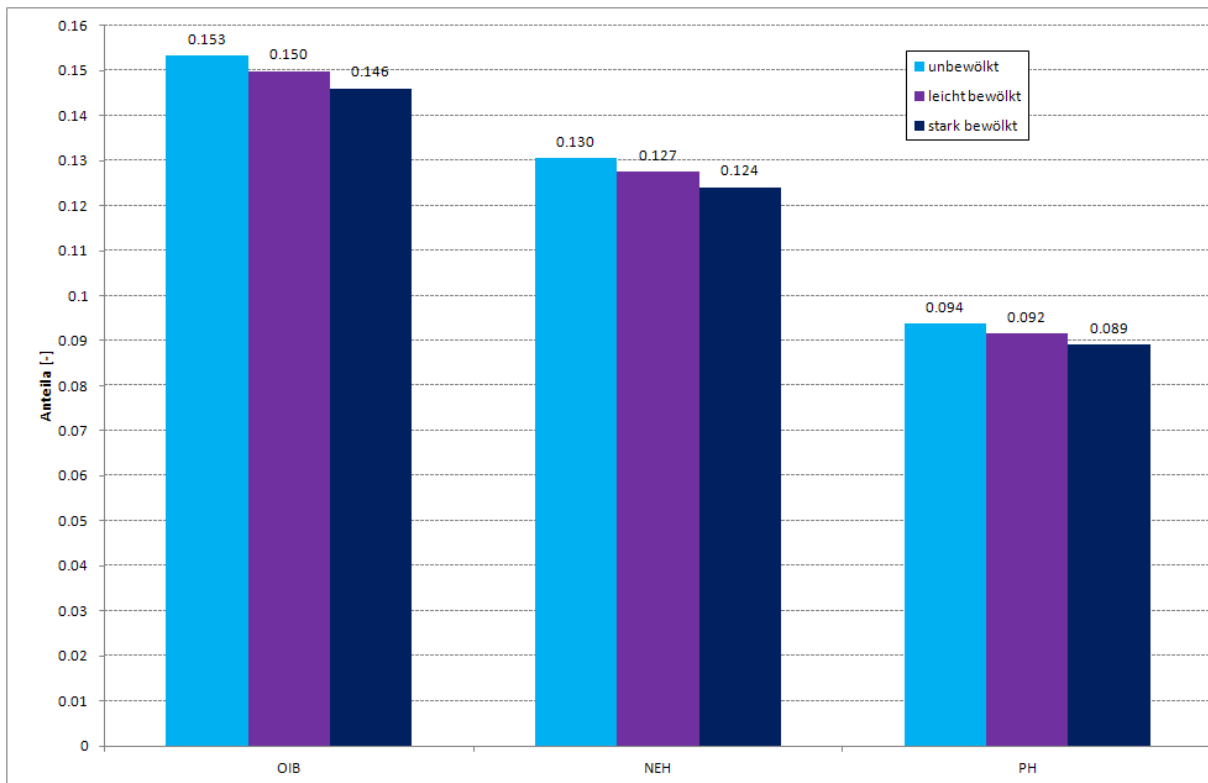


Abb. 20: Heizfall: Anteil a der nach oben entweichenden Wärmeleistung an der gesamten Wärmeabgabeleistung des Registers in Abhängigkeit vom Bewölkungszustand

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:

- Der flächenbezogene thermische Leitwert vom Rohrregister nach unten, d. h. in den zu beheizenden Raum, ist für die hier untersuchten Deckenaufbauten nahezu unabhängig von der Dicke der auf der Decke 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 Geschoßdecke ist der Wärmeabfluss nach außen oder in den unbeheizten Dachraum nicht vernachlässigbar und muss damit bei Auslegungsüberlegungen berücksichtigt werden.

II.3 Instationäre Parameterstudien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von Parameterstudien präsentiert, die instationär, also zeitabhängig durchgeführt wurden. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden hierbei die Raumtemperaturen konstant gehalten und nur die Temperatur des Heiz- bzw. Kühlfluids Schwankungen unterworfen.

In Abschnitt II.3.1 werden die Schwankungen periodisch mit der Tagesperiode angesetzt. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Berechnungsergebnisse im Vergleich zu nicht periodischen Berechnungen sehr genau sind und eine leichte Interpretation zulassen. Die theoretischen Grundlagen des periodisch eingeschwungenen Berechnungsansatzes sind in [6] dokumentiert.

Die Frage der Aufheiz- oder Abkühldauer einer thermisch aktivierten Decke wird unter Beibehaltung des Ansatzes der zeitlichen Periodizität beantwortet, wobei die Periodenlänge auf eine Woche vergrößert wird – siehe Abschnitt II.3.2.

II.3.1 Periodisch eingeschwungene Berechnungen

Es wird untersucht, welcher Tagesverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistung sich an der Deckenuntersicht einstellt, wenn sich die Temperatur des Heiz- bzw. Kühlfluids im Tagesrhythmus ändert.

II.3.1.1 Heizfall

Für den Heizbetrieb wird angenommen, dass zwischen 20⁰⁰ und 7⁰⁰ früh die Heizmitteltemperatur 30 °C beträgt. Zwischen 8⁰⁰ und 19⁰⁰ soll die Heizmitteltemperatur auf 22 °C abgesenkt sein³. Der Temperaturverlauf während der Schaltzeiten wird vereinfachend linear angesetzt. Die Kurvenform dieses als Testfunktion verwendeten Zeitverlaufs der Heizmitteltemperatur zeigt folgende Abbildung.

³ Die Temperaturdifferenz zwischen aktivem Zustand (30 °C) und abgeschaltetem Zustand (22 °C) wurde damit mit 8,0 K bewusst niedrig angesetzt. Da im Kühlfall mit der gleichen Temperaturdifferenz gearbeitet wird, sind die Ergebnisse von Heiz- und Kühlfällen damit unmittelbar vergleichbar.

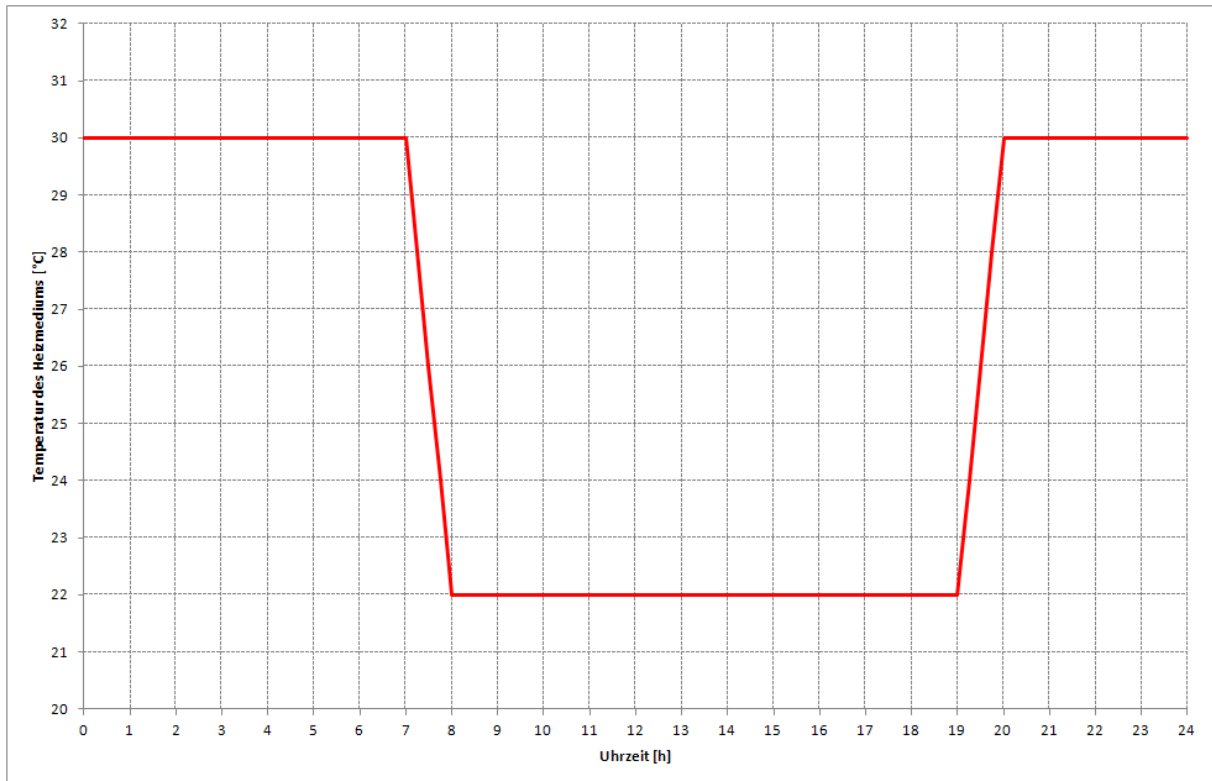


Abb. 21: Heizfall: Angesetzter Tagesverlauf der Heizmitteltemperatur

Es ist zu berechnen, welchen Tagesverlauf die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke hat, wenn die Lufttemperatur sowohl im unter der Geschoßdecke liegenden Raum als auch im oberhalb der Decke situierten Raum eine tageszeitlich konstante Temperatur von 22 °C hat.

Anmerkung: In dieser Parameterstudie kommt die Uhrzeit nur beim Tagesverlauf der Heizmitteltemperatur vor. Die Lufttemperaturen in den Räumen sind zeitunabhängig angesetzt. Zudem beeinflussen außenklimatische Einflüsse das Berechnungsergebnis nicht. Aus diesem Grund bleiben die Berechnungsergebnisse auch dann unverändert, wenn der Beginn der Absenkung der Heizmitteltemperatur verschoben, die Dauer der Absenkung aber gleich gehalten wird. So ergibt sich z. B. die gleiche Aussage, wenn die Heizmitteltemperatur um 19⁰⁰ abgesenkt und um 7⁰⁰ wieder erhöht wird (Nachtabsenkung - Szenario z. B. bei Verwendung von Warmwasserkollektoren). Bei der Interpretation der Ergebnisse sind in diesem Fall nur die Werte der Abszisse (Uhrzeit [h]) entsprechend anzupassen.

Da beim instationären Verhalten der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit zum Tragen kommt, liegt es nahe zu fragen, welchen Einfluss die Lage des Rohrregisters auf den zeitlichen Verlauf der Wärmeabgabeleistung spielt. Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Tagesverläufe der Wärmeabgabeleistungen bei verschiedenen Betonüberdeckungen (siehe Abb. 10) im Fall der Rohrdimension 17 x 2,0 und einem Achsabstand der Rohre von 15 cm.

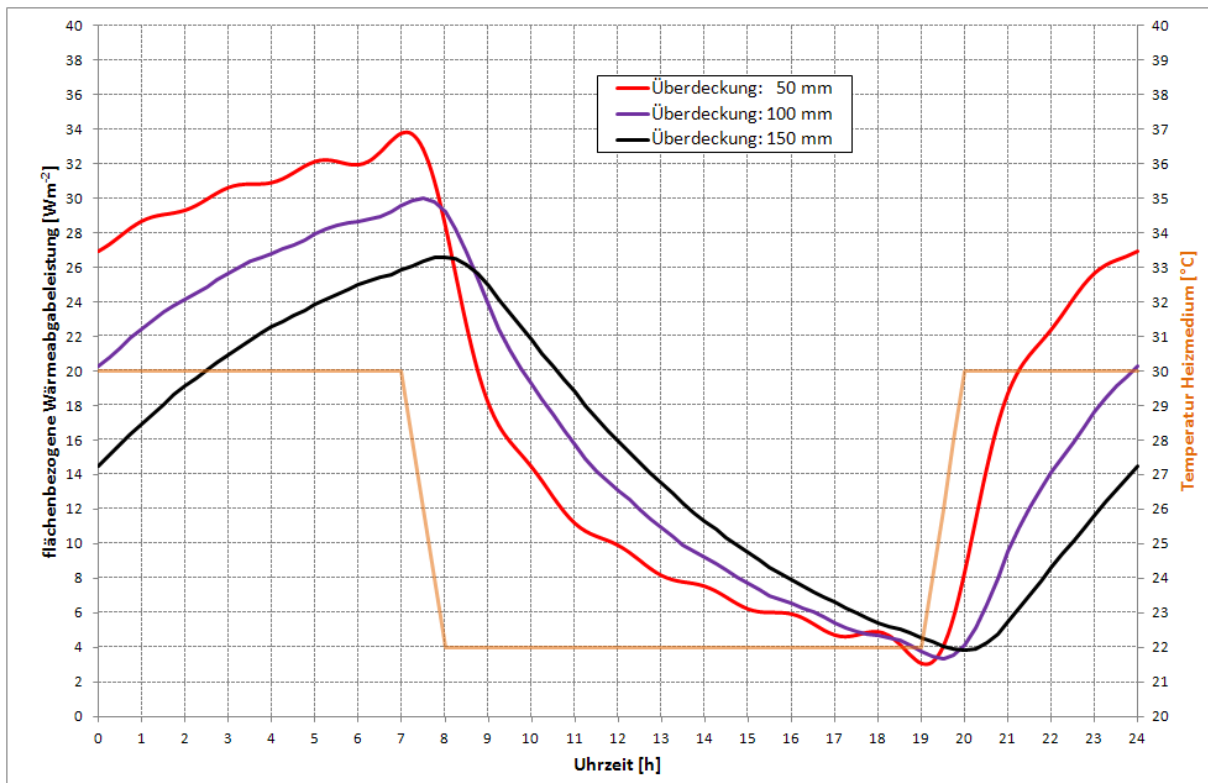


Abb. 22: Heizfall: Berechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand 150 mm

Es zeigt sich, dass die Wärmeabgabe der aktivierten Geschoßdecke bei der geringsten Betonüberdeckung nach Beendigung der Beheizung vorerst am schnellsten abnimmt⁴. Da die Wärmeabgabe in der zweiten Tageshälfte jedoch langsamer abnimmt als im Fall größerer Betonüberdeckung, liegt die Wärmeabgabe zu Beginn der Beheizung um 19⁰⁰ in allen drei untersuchten Fällen in der gleichen Größenordnung bei ca. 3,0 bis 4,5 Wm⁻².

Überdeckung [mm]	flächenbezogene Wärmeabgabeleistung [Wm ⁻²]	
	7 ⁰⁰	19 ⁰⁰
50	33,8	3,1 (9,2%)
100	29,6	3,8 (12,8%)
150	25,8	4,6 (17,8%)

Tab. 24: Heizfall: Flächenbezogene Wärmeabgabeleistungen in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung des Rohrregisters

Bezüglich der im Tagesverlauf an den unterhalb der aktivierten Geschoßdecke liegenden Raum abgegebenen flächenbezogenen Wärmemenge ergibt sich das in folgender Tabelle gezeigte Bild.

⁴ Der leicht wellige Verlauf der Kurven ist durch die verwendete Berechnungsmethode (Fourier-Interpolation) bedingt und hat keine physikalische Bedeutung.

Überdeckung [mm]	Wärmemenge [Whm ⁻²]	
50	444,4	100,0%
100	400,9	90,2%
150	364,9	82,1%

Tab. 25: Heizfall: Im Tagesverlauf abgegebene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters; Heizmitteltemperatur gemäß Abb. 21

Bei nach Abb. 21 schwankender Heizmitteltemperatur reduziert sich die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung bei Vergrößerung der Betonüberdeckung um 5 cm um ca. 10%; die entsprechende Abnahme bei einer Betonüberdeckung von insgesamt 15 cm liegt bei ca. 18 %.

Zur besseren Interpretation dieses Ergebnisses ist in folgender Tabelle die täglich abgegebene Wärmemenge im Fall einer tageszeitlich konstant auf 30 °C gehaltenen Heizmitteltemperatur, d. h. für den stationären Fall ausgewiesen.

Überdeckung [mm]	Wärmemenge [Whm ⁻²]	
50	882,9	100,0%
100	798,7	90,5%
150	728,7	82,5%

Tab. 26: Heizfall: Im Tagesverlauf abgegebene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters; Heizmitteltemperatur konstant auf 30 °C

Ein Vergleich der Tabellen 25 und 26 zeigt zum einen, dass der Einfluss der Lage des Rohrregisters auf die während eines Tages an den Raum abgegebene Wärmemenge für die stationäre Rechnung in etwa gleich groß ist wie für die zeitabhängige Berechnung. Zum anderen zeigt ein Vergleich der Werte der abgegebenen Wärmemengen bei gleicher Überdeckung, dass bei halbtägiger Beheizung gemäß Abb. 21 sich auch die während des Tages abgegebene Wärmemenge halbiert. Es zeigt sich somit, dass sich unter den angenommenen Bedingungen die Wärmespeicherfähigkeit auf die Tagessumme der Wärmeabgabe nicht wesentlich auswirkt.

Unter Verwendung von Gleichung (3) kann aus den in Abb. 22 gezeigten Tagesverläufen der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung auf die entsprechenden Tagesverläufe der an der Deckenunterseite auftretenden Oberflächentemperaturen rückgerechnet werden. Das Ergebnis dieser Berechnung zeigt die folgende Abbildung.

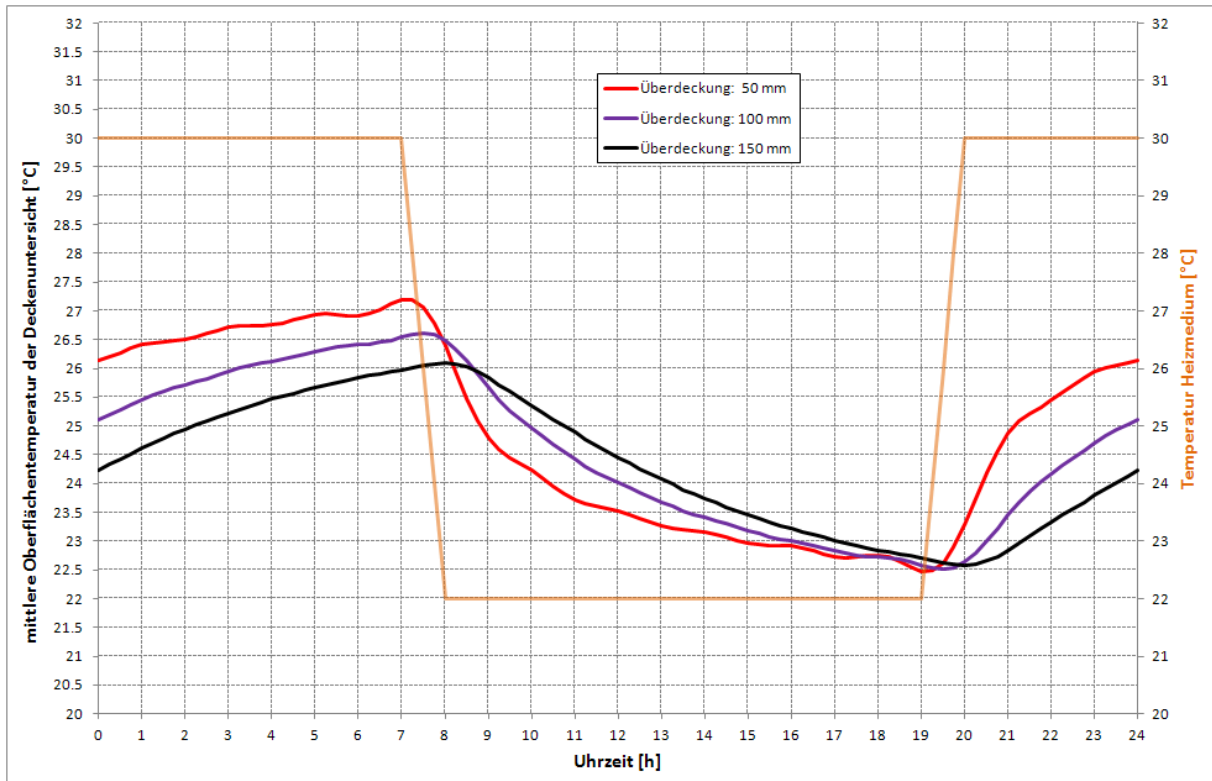


Abb. 23: Heizfall: Berechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand 150 mm

Es zeigt sich, dass die mittleren Oberflächentemperaturen im Tagesverlauf zwischen ca. 22,5 °C und – bei einer Überdeckung von 5 cm – maximal 27,2 °C schwanken. Während das Tagesminimum für alle drei untersuchten Fälle nahezu gleich ist, sinkt das Tagesmaximum mit steigender Betonüberdeckung des Rohrregisters. Wie in Abschnitt II.1 gezeigt, ist davon auszugehen, dass der hier gezeigten mittleren Oberflächentemperatur noch eine vom Ort abhängige Temperaturschwankung („Welligkeit“) in der Größenordnung von ca. $\pm 0,4$ K überlagert ist.

Die Auswirkung des Rohrabstands auf die sich an der Deckenuntersicht im Tagesverlauf einstellende flächenbezogene Wärmeabgabeleistung wurde für die interessierenden Achsabstände zwischen 10 und 25 cm untersucht. Das Ergebnis dieser Parameterstudie zeigt die folgende Abbildung für die oberflächennahe Lage des Rohrregisters (Betonüberdeckung 50 mm).

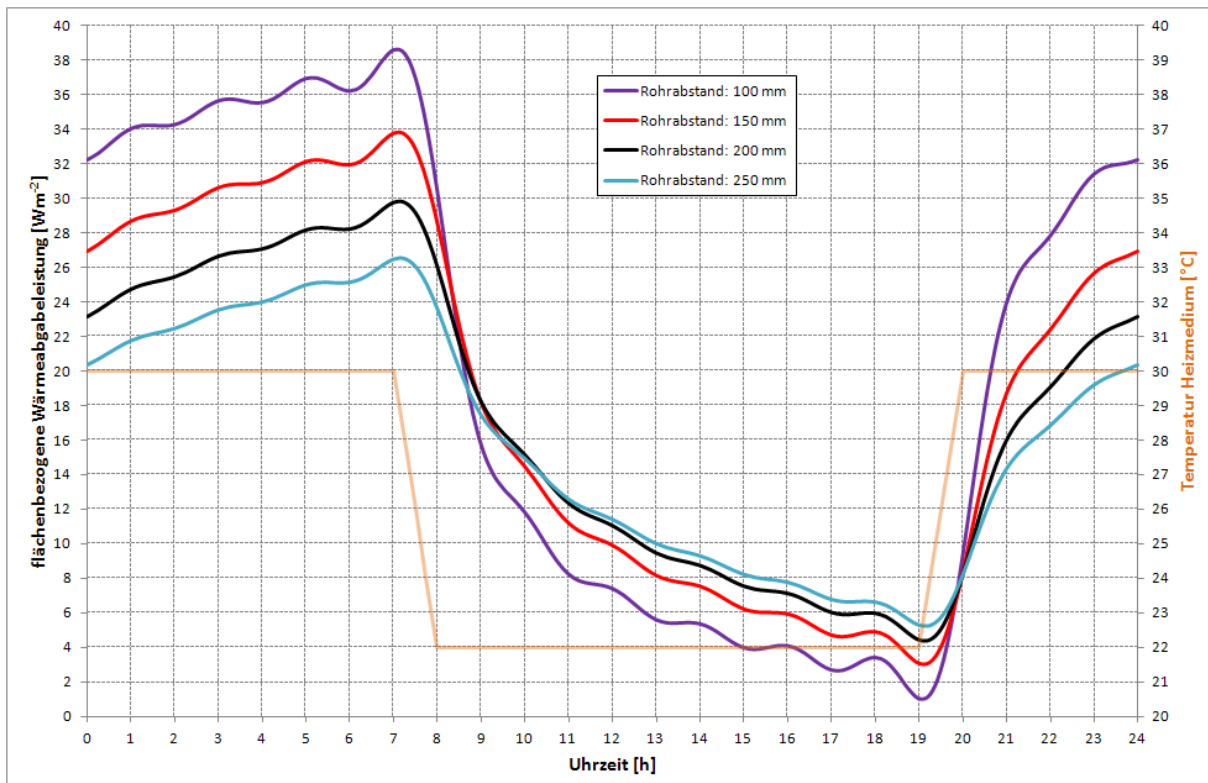


Abb. 24: Heizfall: Berechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung für verschiedene Rohrabstände; Rohr 17 x 2,0; Überdeckung: 50 mm

Die Wärmeabgabe der aktivierten Geschoßdecke nimmt zum einen bei kleiner werdendem Rohrabstand zu. Zum anderen reagiert die thermisch aktivierte Decke bei kleinen Rohrabständen wesentlich schneller auf die Absenkung der Temperatur des Heizfluids als bei größer werdenden Rohrabständen⁵. Bei einem Rohrabstand von 10 cm fällt die Wärmeabgabe der Decke bis 19⁰⁰ – dem Zeitpunkt der Wiedererwärmung des Heizmediums – auf nahezu null Wm^{-2} (genauer: auf $1,0 \text{ Wm}^{-2}$) ab. Bei größer werdenden Rohrabständen verläuft die Auskühlung der Decke wesentlich langsamer. Der 19⁰⁰-Wert liegt bei einem Rohrabstand von 25 cm z. B. mit bei $5,3 \text{ Wm}^{-2}$ noch wesentlich höher. Es zeigt sich somit, dass der Rohrabstand die Wärmeabgabeleistung im Tagesverlauf ganz wesentlich mitbestimmt; dies zeigt auch die folgende Tabelle.

d [mm]	flächenbezogene Wärmeabgabeleistung [Wm^{-2}]	
	7 ⁰⁰	19 ⁰⁰
100	38,6	1,0 (2,6%)
150	33,8	3,1 (9,2%)
200	29,7	4,5 (15,2%)
250	26,5	5,3 (20,0%)

Tab. 27: Heizfall: Flächenbezogene Wärmeabgabeleistungen in Abhängigkeit vom Achsabstand **d** der Rohre

⁵ Der leicht wellige Verlauf der Kurven ist durch die verwendete Berechnungsmethode (Fourier-Interpolation) bedingt und hat keine physikalische Bedeutung.

Bezüglich der im Tagesverlauf an den unterhalb der aktivierten Geschoßdecke liegenden Raum abgegebenen flächenbezogenen Wärmemenge ergibt sich das in folgender Tabelle gezeigte Bild.

Rohrabstand [mm]	Wärmemenge [Whm^{-2}]	
100	478,8	100,0%
150	444,4	92,8%
200	412,0	86,1%
250	382,3	79,9%

Tab. 28: Heizfall: Im Tagesverlauf abgegebene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters; Heizmitteltemperatur gemäß Abb. 21

Die täglich abgegebene Wärmemenge fällt mit steigendem Rohrabstand nahezu linear ab. Natürlich zeigt sich auch hier, dass die täglich abgegebene Wärmemenge bei der nach Abb. 21 schwankenden Heizmitteltemperatur halb so groß ist wie jene, die bei einer Heizmitteltemperatur von konstant 30 °C erreicht würde.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht in Abhängigkeit vom Rohrabstand.

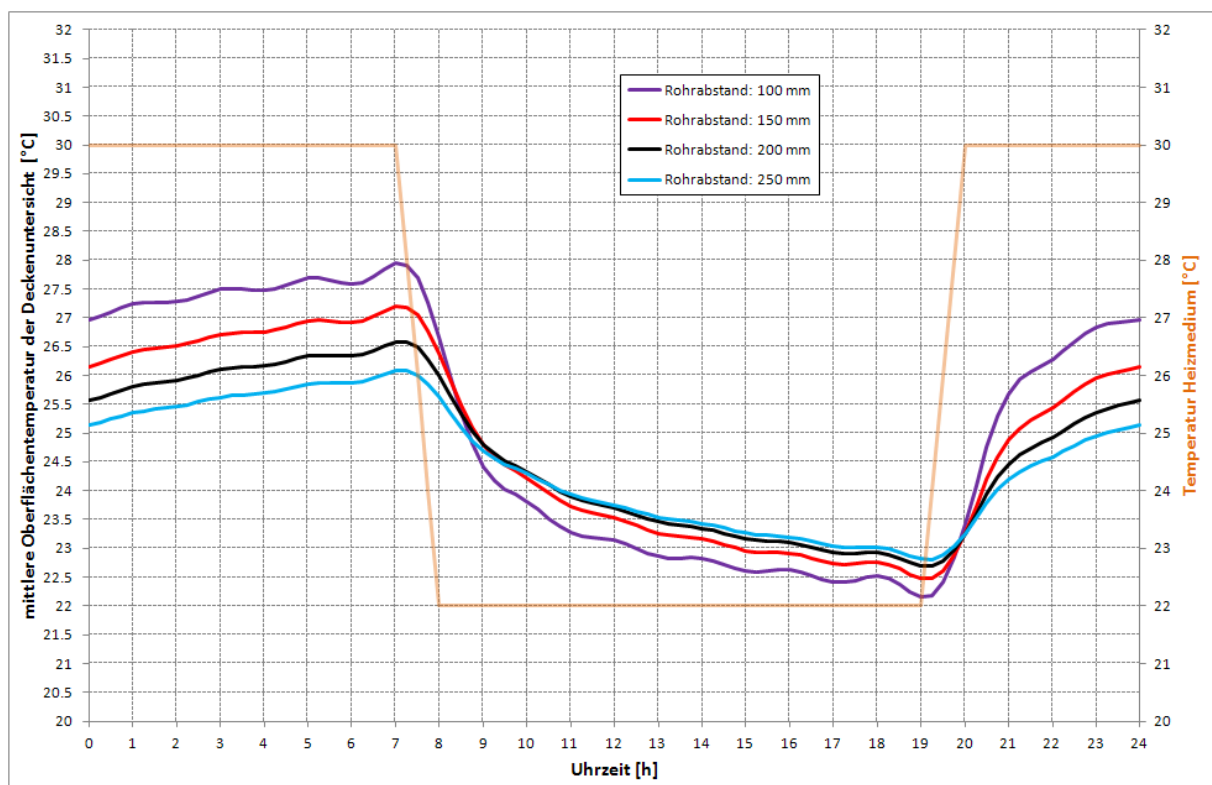


Abb. 25: Heizfall: Berechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für verschiedene Rohrabstände; Rohr 17 x 2,0; Überdeckung: 50 mm

Es zeigt sich, dass eine Vergrößerung des Rohrabstands die Tagesschwankung der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht deutlich reduziert. Für den thermischen Komfort im Raum spielt das Tagesmaximum der Oberflächentemperatur eine wesentliche Rolle. Dieses sinkt bei Vergrößerung des Rohrabstands von 10 cm auf 25 cm von 27,9 °C auf 26,1 °C ab.

Conclusio:

Die Berechnung der Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke bei täglich schwankender Heizmitteltemperatur (Testfunktion gemäß Abb. 21) führt auf folgende Ergebnisse.

- Bei steigender Betonüberdeckung des Rohrregisters sinkt einerseits die im Tagesverlauf von der Decke abgegebene Wärmemenge deutlich ab. Andererseits wird bei steigender Betonüberdeckung das Maximum der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht reduziert, was eine Erhöhung des thermischen Komforts nach sich zieht.
- Eine Vergrößerung des Achsabstands der Rohre des Registers führt zu einer Abnahme der im Tagesverlauf von der Decke abgegebene Wärmemenge. Gleichzeitig nimmt die Tagesschwankung der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht mit steigendem Rohrabstand ab, wobei auch die maximalen Oberflächentemperaturen deutlich absinken.

II.3.1.2 Kühlfall

Für den Kühlbetrieb wird angenommen, dass zwischen 20⁰⁰ und 7⁰⁰ früh die Kühlmitteltemperatur bei 26 °C liegt. Zwischen 8⁰⁰ und 19⁰⁰ soll die Kühlmitteltemperatur auf 18 °C abgesenkt sein. Der Temperaturverlauf während der Schaltzeiten wird vereinfachend linear angesetzt. Die Kurvenform dieses als Testfunktion verwendeten Zeitverlaufs der Kühlmitteltemperatur zeigt folgende Abbildung.

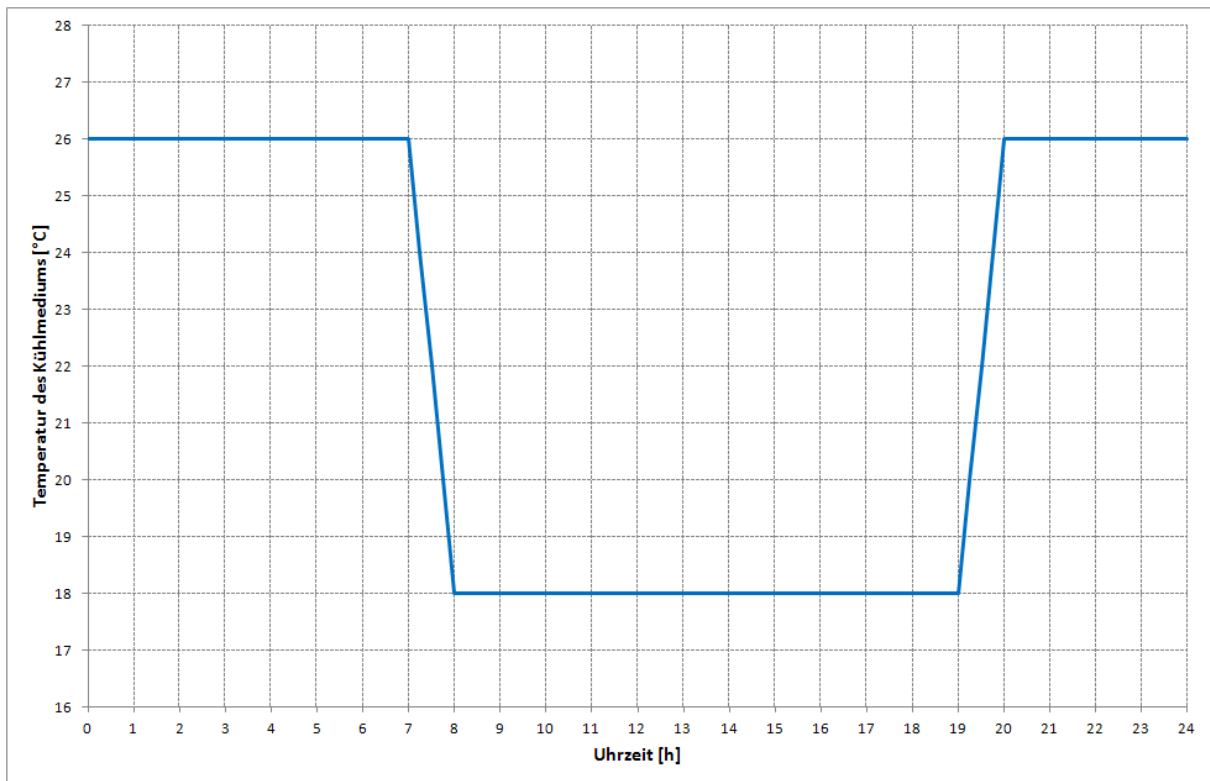


Abb. 26: Kühlfall: Angesetzter Tagesverlauf der Kühlmitteltemperatur

Es ist zu berechnen, welchen Tagesverlauf die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke hat, wenn die Lufttemperatur sowohl im unter der Geschoßdecke liegenden Raum als auch im oberhalb der Decke situierten Raum eine tageszeitlich konstante Temperatur von 26 °C hat.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Tagesverläufe der Wärmeaufnahmeleistungen der thermisch aktivierten Geschoßdecke bei verschiedenen Betonüberdeckungen (siehe Abb. 10) im Fall der Rohrdimension 17 x 2,0 und einem Achsabstand der Rohre von 15 cm.

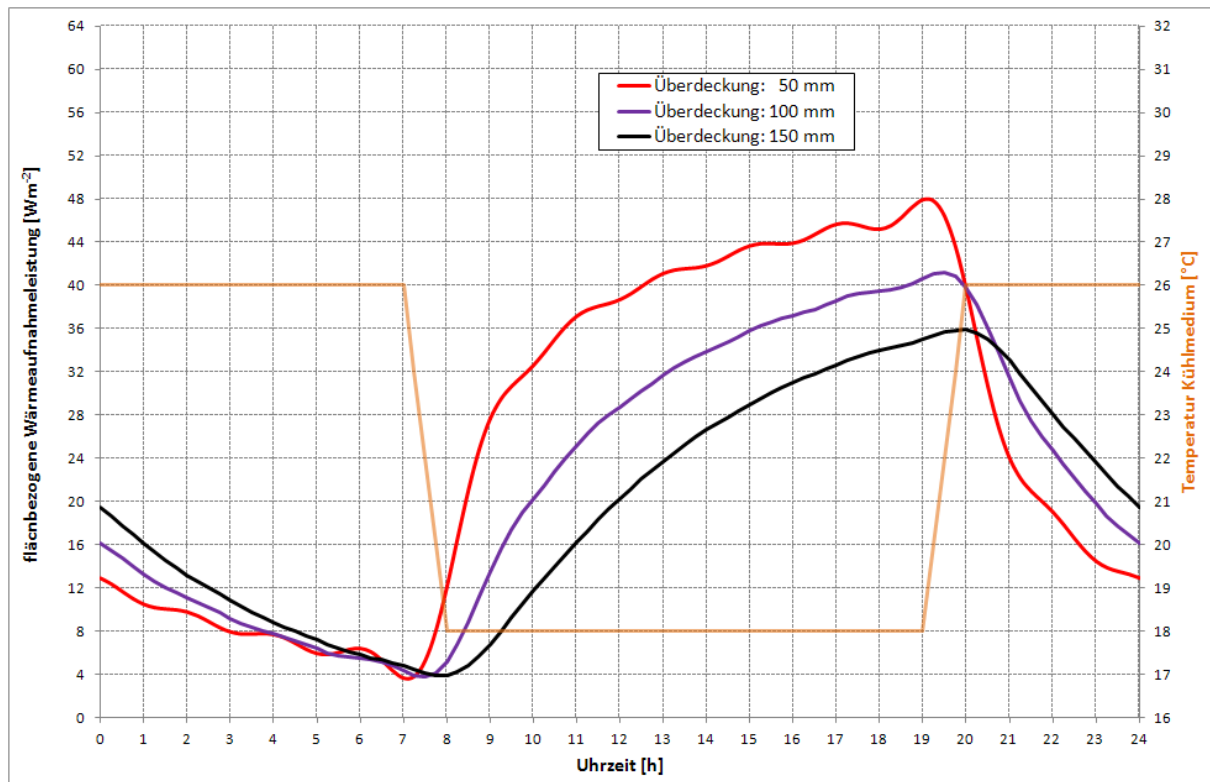


Abb. 27: Kühlfall: Berechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand 150 mm

Es zeigt sich, dass die Wärmeaufnahme der thermisch aktivierten Geschoßdecke bei der geringsten Betonüberdeckung bei Absenkung der Kühlmitteltemperatur auf 18 °C am schnellsten ansteigt⁶. Auch das Maximum der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung liegt mit 48 Wm⁻² um 19⁰⁰ bei einer Betonüberdeckung von 50 mm deutlich am höchsten. Die folgende Tabelle zeigt diesen Effekt anhand der Wärmeaufnahmeleistungen um 19⁰⁰ und 7⁰⁰ deutlicher.

Überdeckung [mm]	flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung [Wm ⁻²]	
	19 ⁰⁰	7 ⁰⁰
50	48,0	3,6 (7,5%)
100	40,6	4,3 (10,6%)
150	35,0	4,8 (13,7%)

Tab. 29: Kühlfall: Flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistungen in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung des Rohrregisters

Bezüglich der im Tagesverlauf aus dem unterhalb der aktivierten Geschoßdecke liegenden Raum aufgenommenen flächenbezogenen Wärmemenge ergibt sich das in folgender Tabelle gezeigte Bild.

⁶ Der leicht wellige Verlauf der Kurven ist durch die verwendete Berechnungsmethode (Fourier-Interpolation) bedingt und hat keine physikalische Bedeutung.

Überdeckung [mm]	Wärmemenge [Whm ⁻²]	
50	615,9	100,0%
100	537,8	87,3%
150	477,5	77,5%

Tab. 30: Kühlfall: Im Tagesverlauf aufgenommene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters; Kühlmitteltemperatur gemäß Abb. 26

Bei nach Abb. 26 schwankender Kühlmitteltemperatur reduziert sich die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung bei Vergrößerung der Betonüberdeckung von 5 cm auf 10 cm um ca. 13%; die entsprechende Abnahme bei einer Betonüberdeckung von insgesamt 15 cm liegt bei 22,5 %.

Zur besseren Interpretation dieses Ergebnisses ist in folgender Tabelle die während eines Tages von der thermisch aktivierten Geschoßdecke aufgenommene Wärmemenge im Fall einer tageszeitlich konstant auf 18 °C gehaltenen Kühlmitteltemperatur - d. h. für den stationären Fall - ausgewiesen.

Überdeckung [mm]	Wärmemenge [Whm ⁻²]	
50	1239,2	100,0%
100	1078,6	87,0%
150	954,3	77,0%

Tab. 31: Kühlfall: Im Tagesverlauf von der Decke aufgenommene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters; Kühlmitteltemperatur konstant auf 18 °C

Ein Vergleich der Tabellen 30 und 31 zeigt zum einen, dass der Einfluss der Lage des Rohrregisters auf die während eines Tages von der Geschoßdecke aufgenommene Wärmemenge für die stationäre Rechnung in etwa gleich groß ist wie für die zeitabhängige Berechnung. Zum anderen zeigt ein Vergleich der Werte der aufgenommenen Wärmemengen bei gleicher Überdeckung, dass bei halbtägiger Kühlung gemäß Abb. 26 sich auch die während des Tages von der Decke aufgenommene Wärmemenge halbiert. Es zeigt sich somit, dass sich unter den angenommenen Bedingungen die Wärmespeicherfähigkeit auf die Tagessumme der Wärmeaufnahme nicht wesentlich auswirkt.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Geschoßdecke für verschiedene Betonüberdeckungen.

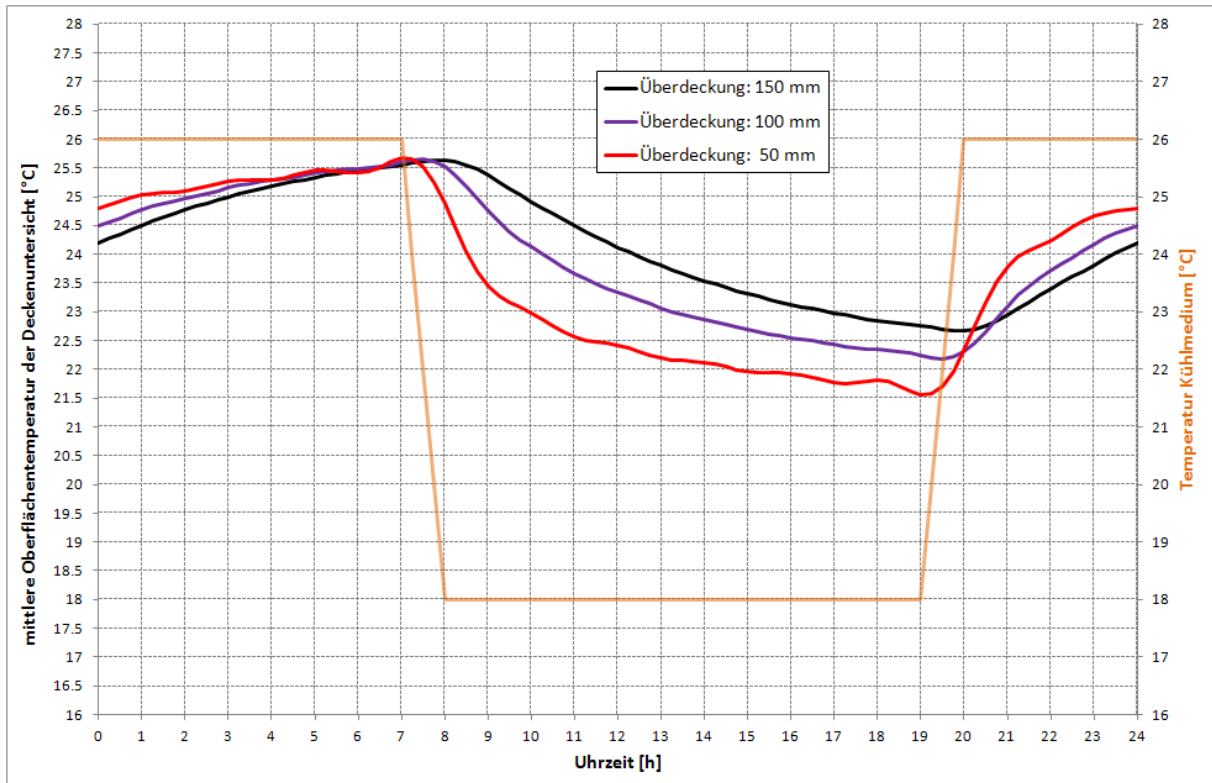


Abb. 28: Kühlfall: Berechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand 150 mm

Es zeigt sich, dass die mittleren Oberflächentemperaturen im Tagesverlauf zwischen ca. 25,6 °C und – bei einer Überdeckung von 5 cm – minimal 21,6 °C schwanken. Während das Tagesmaximum für alle drei untersuchten Fälle nahezu gleich ist, steigt das Tagesminimum mit steigender Betonüberdeckung des Rohrregisters von 21,6 °C bei 5 cm Betonüberdeckung bis auf 22,7 °C bei 15 cm Betonüberdeckung.

Die Auswirkung des Rohrabstands auf die an der Deckenuntersicht im Tagesverlauf von der thermisch aktivierten Geschoßdecke aufgenommene flächenbezogene Wärmeleistung wurde für die interessierenden Achsabstände zwischen 10 und 25 cm untersucht. Das Ergebnis dieser Parameterstudie zeigt die folgende Abbildung für die oberflächennahe Lage des Rohrregisters (Betonüberdeckung 50 mm).

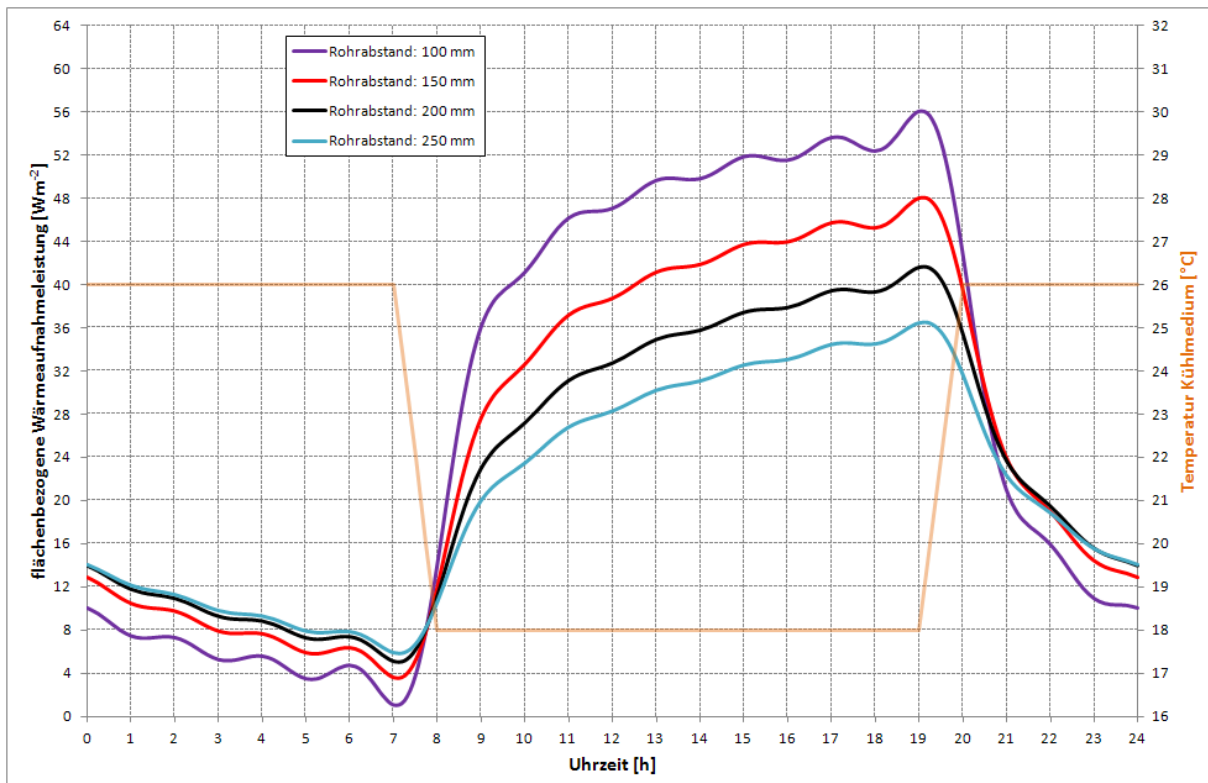


Abb. 29: Kühlfall: Berechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung für verschiedene Rohrabstände; Rohr 17 x 2,0; Überdeckung: 50 mm

Die Wärmeaufnahme der thermisch aktivierten Geschoßdecke nimmt zum einen bei kleiner werdendem Rohrabstand zu. Zum anderen reagiert die thermisch aktivierte Decke bei kleinen Rohrabständen deutlich schneller auf die Absenkung der Temperatur des Kühlfluids als bei größer werdenden Rohrabständen⁷. Bei einem Rohrabstand von 10 cm fällt die Wärmeaufnahmeleistung der Decke bis 7⁰⁰ früh – dem Zeitpunkt des neuerlichen Beginns des Abkühlvorgangs – auf nahezu null Wm^{-2} (genauer: auf $1,0 \text{ Wm}^{-2}$) ab. Bei größer werdenden Rohrabständen verläuft die nächtliche Erwärmung der Geschoßdecke wesentlich langsamer. Der 7⁰⁰-Wert liegt bei einem Rohrabstand von 25 cm z. B. mit $5,9 \text{ Wm}^{-2}$ noch wesentlich höher. Es zeigt sich somit, dass der Rohrabstand die Wärmeaufnahmeleistung im Tagesverlauf ganz wesentlich mitbestimmt; dies zeigt auch die folgende Tabelle.

d [mm]	flächenbezogene Wärmeabgabeleistung [Wm^{-2}]	
	19 ⁰⁰	7 ⁰⁰
100	56,1	1,0 (1,8%)
150	48,0	3,6 (7,5%)
200	41,5	5,1 (12,3%)
250	36,4	5,9 (16,2%)

Tab. 32: Kühlfall: Flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistungen in Abhängigkeit vom Achsabstand **d** der Rohre

Bezüglich der im Tagesverlauf von der aktivierten Geschoßdecke aufgenommenen flächenbezogenen Wärmemenge ergibt sich das in folgender Tabelle gezeigte Bild.

⁷ Der leicht wellige Verlauf der Kurven ist durch die verwendete Berechnungsmethode (Fourier-Interpolation) bedingt und hat keine physikalische Bedeutung.

Rohrabstand [mm]	Wärmemenge [Whm ⁻²]	
100	680,5	100,0%
150	615,9	90,5%
200	557,5	81,9%
250	506,0	74,4%

Tab. 33: Kühlfall: Im Tagesverlauf aufgenommene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters; Kühlmitteltemperatur gemäß Abb. 26

Die täglich von der thermisch aktivierten Geschoßdecke aufgenommene Wärmemenge fällt mit steigendem Rohrabstand nahezu linear ab. Natürlich zeigt sich auch hier, dass die täglich aufgenommene Wärmemenge bei der nach Abb. 26 schwankenden Kühlmitteltemperatur halb so groß ist wie jene, die bei einer Kühlmitteltemperatur von konstant 18 °C erreicht würde.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Geschoßdecke für verschiedene Rohrabstände.

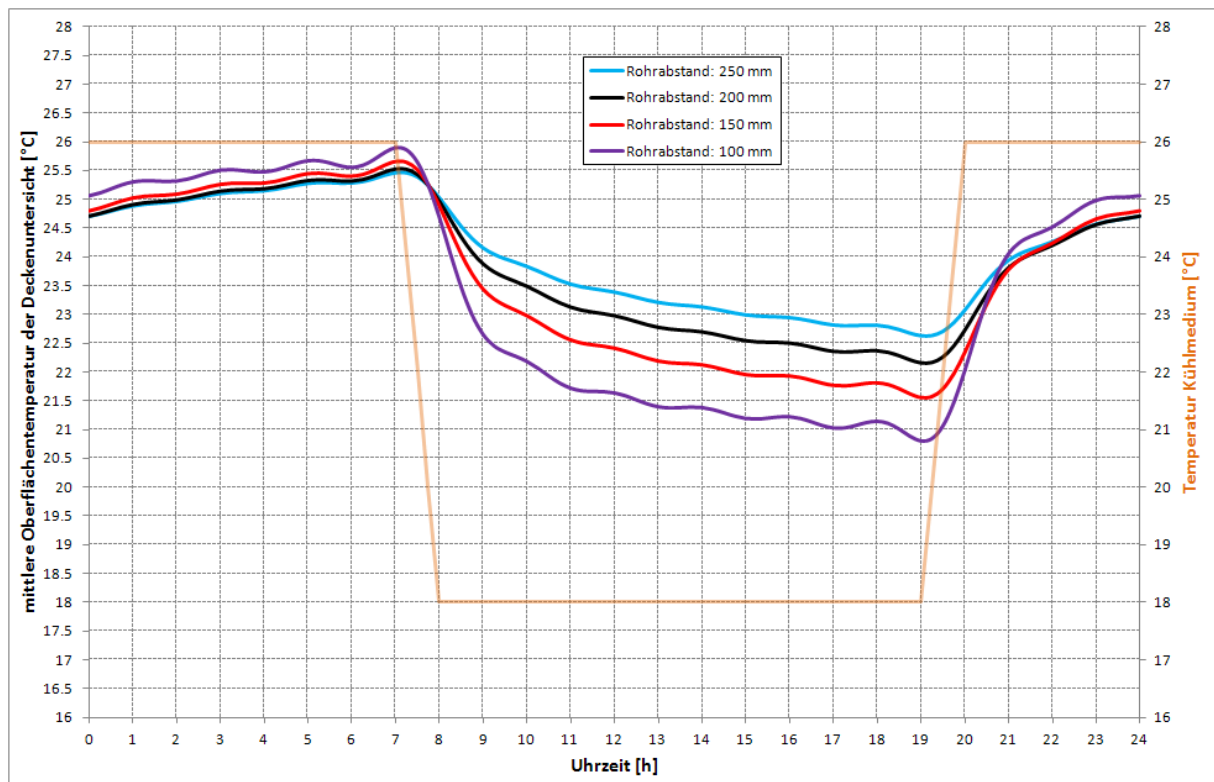


Abb. 30: Kühlfall: Berechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für verschiedene Rohrabstände; Rohr 17 x 2,0; Überdeckung: 50 mm

Es zeigt sich, dass eine Vergrößerung des Rohrabstands die Tagesschwankung der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht deutlich reduziert. Für den thermischen Komfort im Raum spielt das Tagesminimum der Oberflächentemperatur eine wesentliche Rolle. Dieses steigt bei Vergrößerung des Rohrabstands von 10 cm auf 25 cm von 20,8 °C auf 22,6 °C an.

Conclusio:

Die Berechnung der Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke bei täglich schwankender Heizmitteltemperatur (Testfunktion gemäß Abb. 26) führt auf folgende Ergebnisse.

- Bei steigender Betonüberdeckung des Rohrregisters sinkt einerseits die im Tagesverlauf von der thermisch aktivierten der Decke aufgenommene Wärmemenge deutlich ab. Andererseits steigt bei größer werdender Betonüberdeckung das Minimum der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht deutlich an, was eine Erhöhung des thermischen Komforts nach sich zieht.
- Eine Vergrößerung des Achsabstands der Rohre des Registers führt zu einer Abnahme der im Tagesverlauf von der Decke aufgenommenen Wärmemenge. Gleichzeitig nimmt die Tagesschwankung der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht mit steigendem Rohrabstand ab, wobei auch die minimale Oberflächentemperatur ansteigt.

II.3.2 Berechnung von Aufheiz- und Abkühlvorgängen

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 zwischen einer sprunghaften Änderung der Temperatur des Heiz- oder Kühlmittels und der maximal erreichbaren Wärmeabgabe an der Deckenuntersicht verstreicht.

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 nie auf null absinkt. Um den Vorteil der hohen Genauigkeit der periodisch eingeschwungenen Rechnung nicht zu verlieren, wird hier an diesem Berechnungsansatz festgehalten, jedoch die Periodenlänge auf 7 Tage – d. h. eine Woche – verlängert.

II.3.2.1 Aufheizvorgänge

Die Lufttemperatur der beiden Räume wird im Fall der Beheizung auch hier zeitlich konstant mit 22 °C angesetzt. Zur Beantwortung der Frage nach den Aufheizzeiten wird angenommen, dass die Temperatur des Heizmediums zwei Tage lang auf 22 °C – und damit identisch mit den Raumlufttemperaturen – gehalten wird. Daraufhin erfolgt binnen einer Stunde das Aufheizen von 22 °C auf 30 °C. Die Temperatur des Heizmediums wird daraufhin 3,5 Tage auf konstant 30 °C gehalten, bevor sie innerhalb einer Stunde wieder auf 22 °C abgesenkt und während der restlichen Woche konstant auf 22 °C gehalten wird. In folgender Abbildung ist der als Testfunktion verwendete Zeitverlauf der Temperatur des Heizmediums dargestellt.

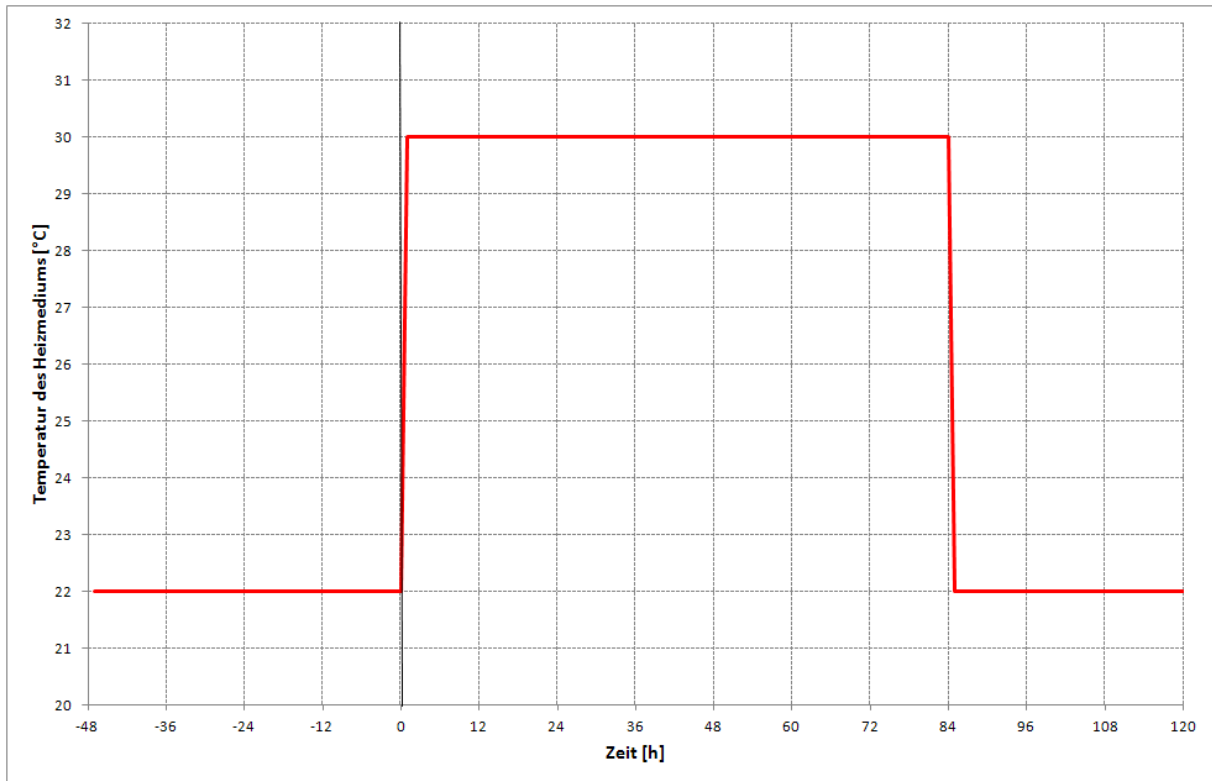


Abb. 31: Heizfall: Angesetzter Zeitverlauf der Heizmitteltemperatur

Zur leichteren Interpretation der Ergebnisse wird der Nullpunkt der Zeitskala auf den Zeitpunkt des Beginns der Aufheizung des Heizmediums gelegt.

Die folgende Abbildung zeigt den berechneten Zeitverlauf der Wärmeabgabe an der Untersicht der thermisch aktivierten Geschoßdecke.

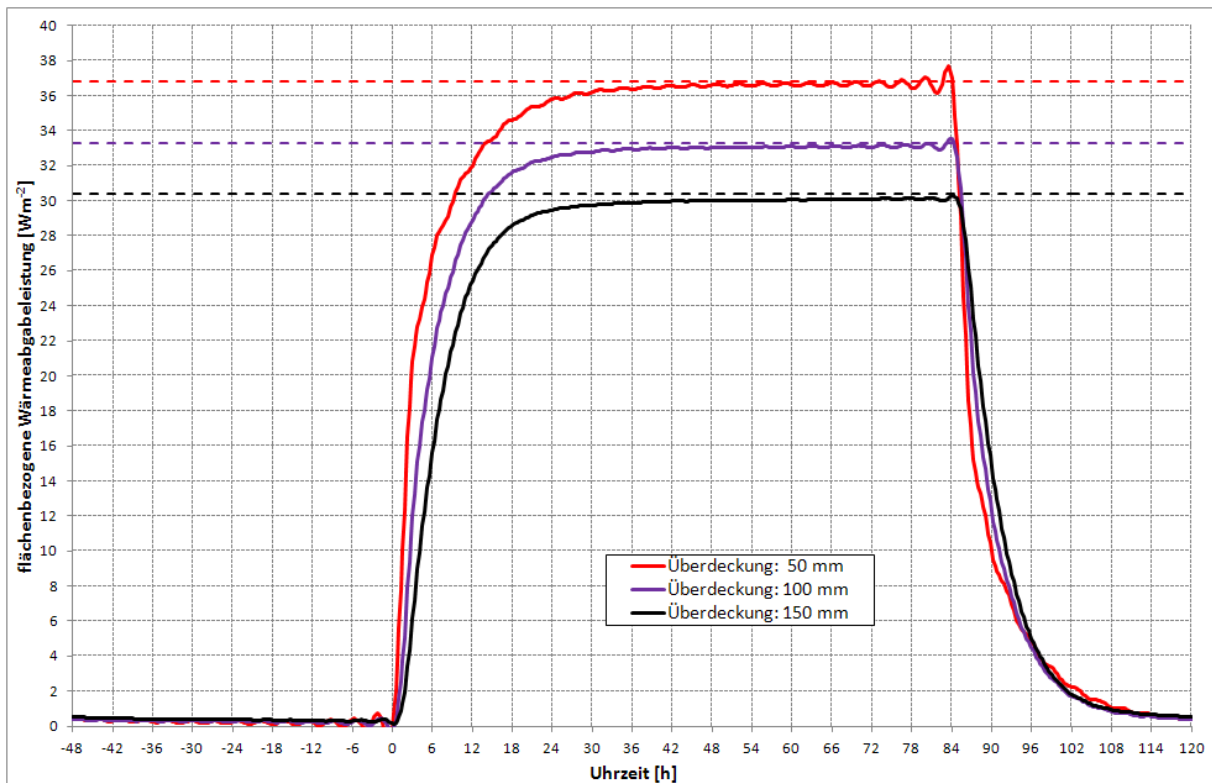


Abb. 32: Heizfall: Berechnete Zeitverläufe (Wochenperiode) der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand 150 mm

Es zeigt sich, dass unter dem angenommenen Zeitverlauf der Heizmitteltemperatur (siehe Abbildung. 31) die Geschoßdecke nahezu ganz auskühlen kann und somit die Beantwortung der Frage nach dem Aufheizverhalten der Decke in sehr guter Näherung möglich ist⁸.

Die strichlierten Linien in Abb. 32 zeigen die stationär errechneten flächenbezogenen Wärmeabgabeleistungen (berechnet gemäß Tab. 10), welche ersichtlich die Obergrenzen der Wärmeabgabeleistungen darstellen.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Verläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung in den ersten beiden Tagen nach der sprunghaften Erhöhung der Heizmitteltemperatur; sie stellt damit lediglich einen Ausschnitt der Abbildung 32 für das interessierende Zeitintervall dar.

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

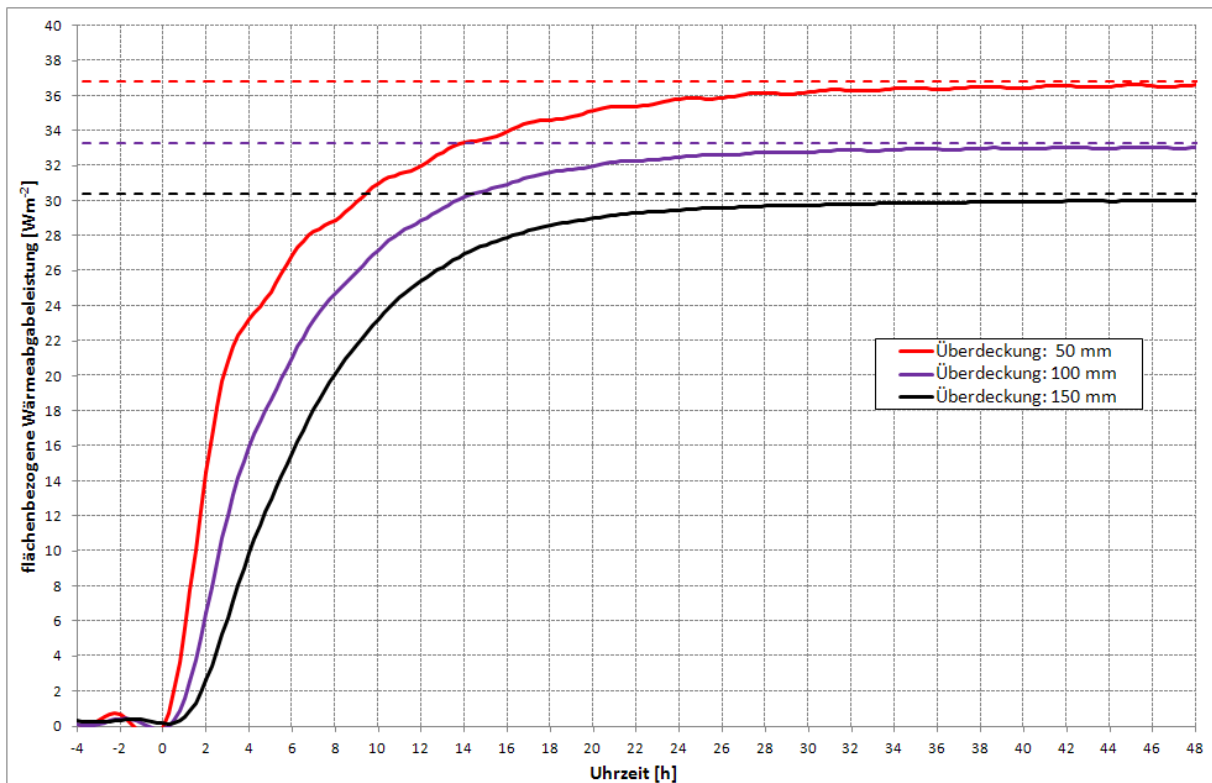


Abb. 33: Heizfall: Aufheizverhalten der thermisch aktivierten Decke; Ausschnitt aus Abb. 32

Wie schon bei der Berechnung unter Zugrundelegung der Tagesperiode zeigt sich auch hier, dass bei steigender Betonüberdeckung des Rohrregisters nicht nur die maximal mögliche Wärmeabgabeleistung sinkt, sondern auch die thermische Trägheit der aktivierten Geschoßdecke deutlich größer wird. Zur Quantifizierung dieses Effekts sind in folgender Tabelle die zur Erreichung einer Wärmeabgabeleistung von 25 Wm^{-2} erforderlichen Zeitintervalle aufgelistet.

Überdeckung [mm]	Zeit [h]
50	5,25
100	8,25
150	11,75

Tab. 34: Aufheizverhalten: Zeitintervalle für das Erreichen einer Wärmeabgabeleistung von 25 Wm^{-2} .

Bei einer Betonüberdeckung von 150 mm braucht die Geschoßdecke bis zum Erreichen einer Wärmeabgabeleistung von 25 Wm^{-2} mehr als doppelt so lang, wie bei einer Betonüberdeckung von nur 50 mm.

Um den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf das Aufheizverhalten der thermisch aktivierten Geschoßdecke besser zeigen zu können, werden in der folgenden Tabelle jene Zeitintervalle gegenüber gestellt, die zum Erreichen von 90% der maximal erzielbaren flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung erforderlich sind.

Überdeckung [mm]	Wärmeabgabeleistung [Wm^{-2}]	Zeit [h]
50	82,8	13,50
100	74,9	13,75
150	68,3	14,75

Tab. 35: Aufheizverhalten: Zeitintervalle für das Erreichen von 90% der maximal möglichen Wärmeabgabeleistung.

Ersichtlich benötigt die thermisch aktivierte Geschoßdecke bei allen drei untersuchten Varianten zum Erreichen von 90% ihrer maximal möglichen flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung mehr als einen halben Tag. Zwischen 50 und 100 mm Betonüberdeckung ist im Rahmen der Auswertungsgenauigkeit (Zeitschritt $\frac{1}{4}$ h) kaum ein Unterschied auszumachen. Bei 150 mm Betonüberdeckung verlängert sich die Aufheizzeit um ca. eine Stunde.

Conclusio:

Die rechnerische Untersuchung des Aufheizverhaltens einer thermisch aktivierten Geschoßdecke führt zu folgenden Ergebnissen.

- Zum Erreichen von 90% der maximal möglichen Wärmeabgabeleistung wird nach einer sprunghaften Erhöhung der Heizmitteltemperatur ein Zeitraum von über $\frac{1}{2}$ Tag benötigt. Dieses Zeitintervall zeigt eine eher schwache Abhängigkeit von der Dicke der Betonüberdeckung und vergrößert sich bei ansteigender Betonüberdeckung.
- Wie bereits bei den Untersuchungen unter Zugrundlegung der Tagesperiode erkannt, sinkt die maximal mögliche Wärmeabgabeleistung mit steigender Betonüberdeckung. Das zum Erreichen einer Wärmeabgabeleistung von z. B. 25 Wm^{-2} benötigte Zeitintervall zeigt aus diesem Grund eine starke Abhängigkeit von der Betonüberdeckung. Bei 15 cm Betonüberdeckung wird zum Erreichen einer Wärmeabgabeleistung von 25 Wm^{-2} über doppelt so viel Zeit benötigt als für den Fall mit 5 cm Betonüberdeckung.

II.3.2.2 Abkühlvorgänge

Die Lufttemperatur der beiden Räume wird im Fall der Kühlung zeitlich konstant mit $26 \text{ }^\circ\text{C}$ – also eine für den sommerlichen thermischen Komfort gut geeignete Temperatur - angesetzt. Zur Beantwortung der Frage nach dem Abkühlverhalten der thermisch aktivierten Geschoßdecke wird angenommen, dass die Temperatur des Kühlmediums zwei Tage lang auf $26 \text{ }^\circ\text{C}$ – und damit identisch mit den Raumlufttemperaturen – gehalten wird. Daraufhin erfolgt binnen einer Stunde das Abkühlen von $26 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Temperatur des Kühlmediums wird daraufhin 3,5 Tage auf konstant $18 \text{ }^\circ\text{C}$ gehalten, bevor sie innerhalb einer Stunde wieder auf $26 \text{ }^\circ\text{C}$ angehoben und während der restlichen Woche konstant auf $26 \text{ }^\circ\text{C}$ gehalten wird.

In folgender Abbildung ist der als Testfunktion verwendete Zeitverlauf der Temperatur des Kühlmediums dargestellt. Zur leichteren Interpretation der Ergebnisse wird der Nullpunkt der Zeitskala auf den Zeitpunkt des Beginns der Aufheizung des Heizmediums gelegt.

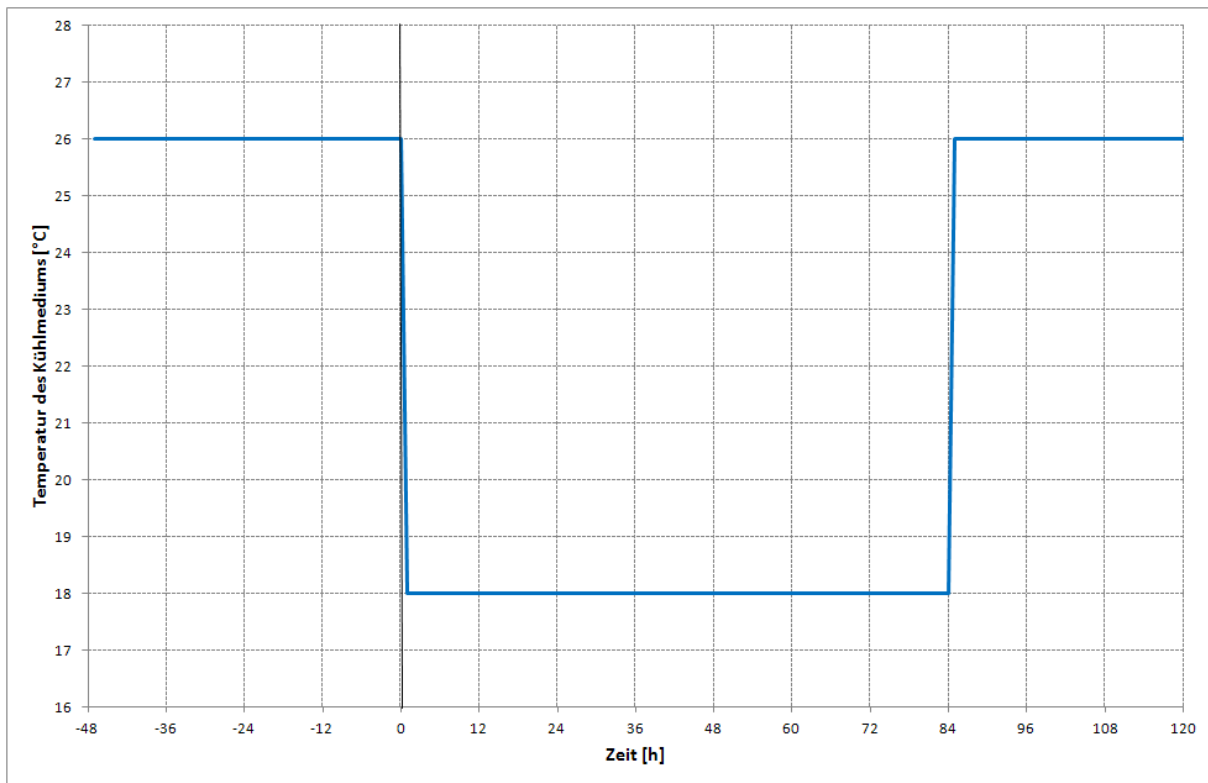


Abb. 34: Kühlfall: Angesetzter Zeitverlauf der Kühlmitteltemperatur

Die folgende Abbildung zeigt den berechneten Zeitverlauf der Wärmeaufnahmeleistung an der Untersicht der thermisch aktivierten Geschoßdecke.

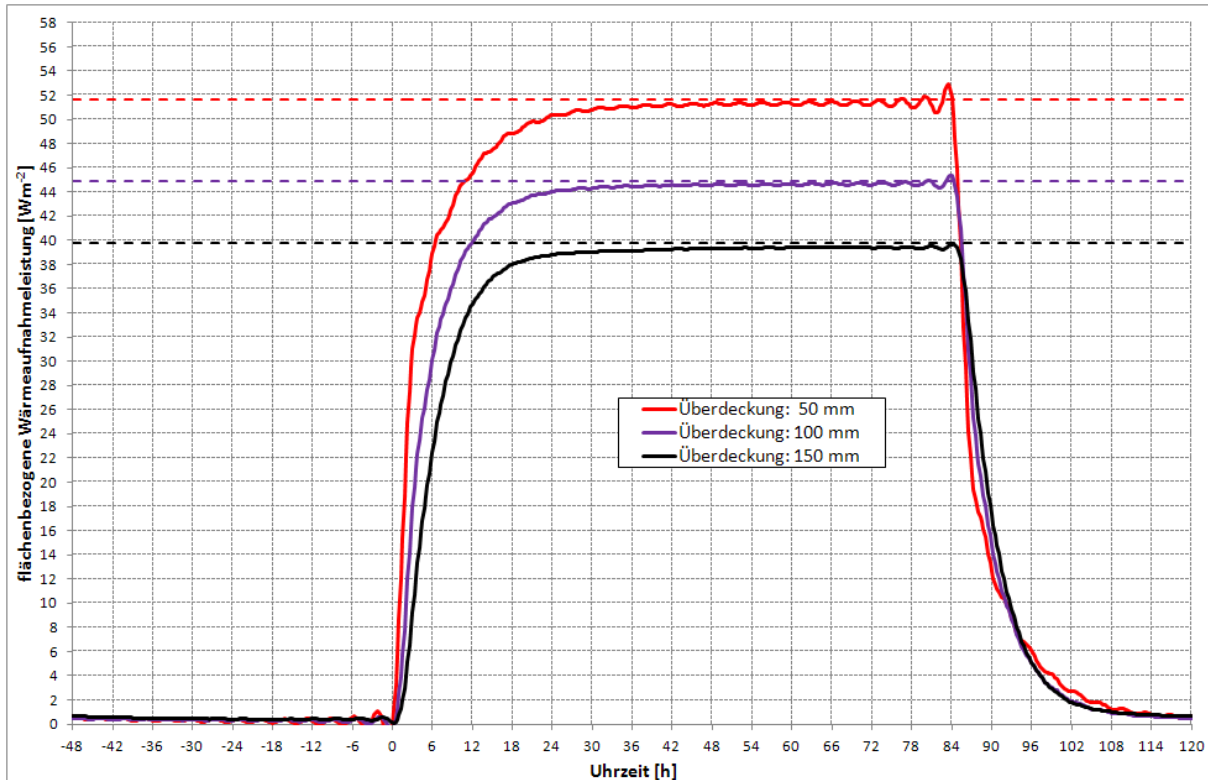


Abb. 35: Kühlfall: Berechnete Zeitverläufe (Wochenperiode) der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung für verschiedene Positionen des Rohrregisters; Rohr 17 x 2,0; Achsabstand 150 mm

Es zeigt sich, dass unter dem angenommenen Zeitverlauf der Kühlmitteltemperatur (siehe Abbildung. 34) die Decke sich nahezu ganz aufwärmen kann und somit die Beantwortung der Frage nach dem Abkühlverhalten der Decke in sehr guter Näherung möglich ist⁹.

Die strichlierten Linien in Abb. 35 zeigen die stationär errechneten flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistungen (berechnet gemäß Tab. 11), welche ersichtlich die Obergrenzen der Wärmeaufnahmeleistungen darstellen.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Verläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung in den ersten beiden Tagen nach der sprunghaften Abkühlung der Kühlmitteltemperatur; sie stellt damit lediglich einen Ausschnitt der Abbildung 35 für das interessierende Zeitintervall dar.

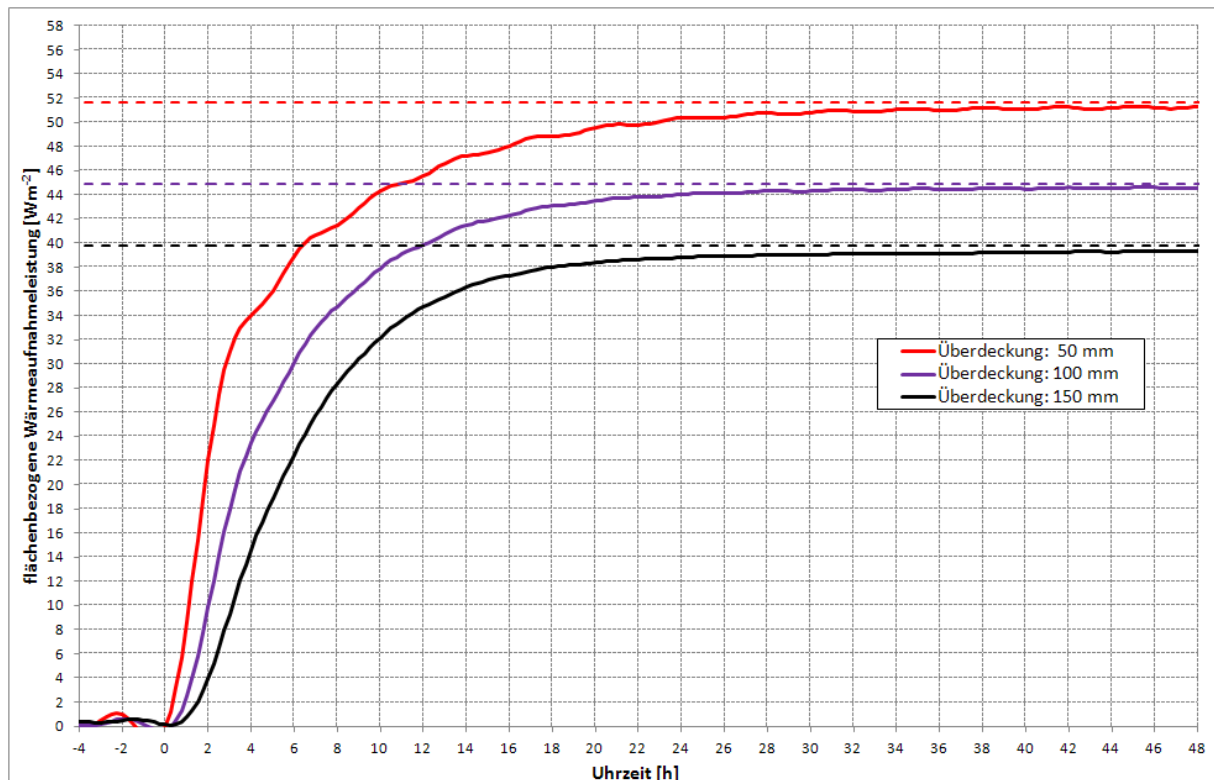


Abb. 36: Kühlfall: Abkühlverhalten der thermisch aktivierten Decke; Ausschnitt aus Abb. 35

Im Vergleich zum Fall der Beheizung ergeben sich ähnliche Kurvenverläufe. Allerdings steigen die maximal erreichbaren flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistungen im Vergleich zu den Wärmeabgabeleistungen im Fall der Beheizung deutlich an. Dies ist direkte Folge des verbesserten Wärmeübergangs an der Deckenuntersicht.

Ersichtlich steigt auch im Fall der Kühlung die thermische Trägheit der aktivierten Geschoßdecke bei steigender Betonüberdeckung. Zur Quantifizierung dieses Effekts sind in folgender Tabelle die zur Erreichung einer Wärmeabgabeleistung von 30 Wm^{-2} erforderlichen Zeitintervalle aufgelistet.

⁹ Die Schwankungen der berechneten Zeitverläufe sind verfahrensbedingt (Fourier-Zerlegung) und haben keine physikalische Bedeutung.

Überdeckung [mm]	Zeit [h]
50	3,00
100	6,00
150	9,00

Tab. 36: Abkühlverhalten: Zeitintervalle für das Erreichen einer Wärmeaufnahmeleistung von 30 Wm^{-2} .

Bei einer Betonüberdeckung von 150 mm braucht die Geschoßdecke bis zum Erreichen einer Wärmeaufnahmeleistung von 30 Wm^{-2} dreimal so lang, wie bei einer Betonüberdeckung von nur 50 mm.

Um den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf das Abkühlverhalten der thermisch aktivierten Decke besser zeigen zu können, werden in der folgenden Tabelle jene Zeitintervalle gegenüber gestellt, die zum Erreichen von 90% der maximal erzielbaren flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung erforderlich sind.

Überdeckung [mm]	Wärmeaufnahmeleistung [Wm^{-2}]	Zeit [h]
50	46,5	13,00
100	40,4	13,00
150	35,8	13,50

Tab. 37: Abkühlverhalten: Zeitintervalle für das Erreichen von 90% der maximal möglichen Wärmeaufnahmeleistung.

Ersichtlich benötigt die thermisch aktivierte Geschoßdecke bei allen drei untersuchten Varianten zum Erreichen von 90% ihrer maximal möglichen flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung mehr als einen halben Tag. Zwischen 50 und 100 mm Betonüberdeckung ist im Rahmen der Auswertungsgenauigkeit (Zeitschritt $\frac{1}{4}$ h) kein Unterschied auszumachen. Bei 150 mm Betonüberdeckung verlängert sich die Aufheizzeit um ca. $\frac{1}{2}$ Stunde.

Conclusio:

Die rechnerische Untersuchung des Abkühlverhaltens einer thermisch aktivierten Geschoßdecke führt auf folgende Ergebnisse.

- Zum Erreichen von 90% der maximal möglichen Wärmeaufnahmeleistung wird nach einer sprunghaften Erniedrigung der Kühlmitteltemperatur ein Zeitraum von über $\frac{1}{2}$ Tag benötigt. Dieses Zeitintervall zeigt eine eher schwache Abhängigkeit von der Dicke der Betonüberdeckung und vergrößert sich leicht bei ansteigender Betonüberdeckung.
- Die maximal mögliche Wärmeaufnahmeleistung sinkt mit steigender Betonüberdeckung. Das zum Erreichen einer Wärmeaufnahmeleistung von z. B. 30 Wm^{-2} benötigte Zeitintervall zeigt aus diesem Grund eine starke Abhängigkeit von der Betonüberdeckung. Bei 15 cm Betonüberdeckung wird zum Erreichen einer Wärmeabgabeleistung von 30 Wm^{-2} dreimal so viel Zeit benötigt als für den Fall mit 5 cm Betonüberdeckung.

III. Auslegungsberechnungen

In Kapitel II wurden Kenngrößen für thermisch aktivierte Geschoßdecken präsentiert, die sich u. a. nutzbringend im Zuge von Auslegungsberechnungen anwenden lassen. In diesem Kapitel soll exemplarisch auf die Vorgangsweise für die Berechnung der notwendigen Heiz- bzw. Kühlflächen in Abhängigkeit von den Eigenschaften des eingesetzten Rohrregisters (Rohrdurchmesser, Rohrabstand, Lage des Rohrregisters) eingegangen werden.

Neben dem Aufzeigen der Anwendbarkeit der in Kapitel II 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 II.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, erscheint 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.

III.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.

III.1.1 Raumgeometrie

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

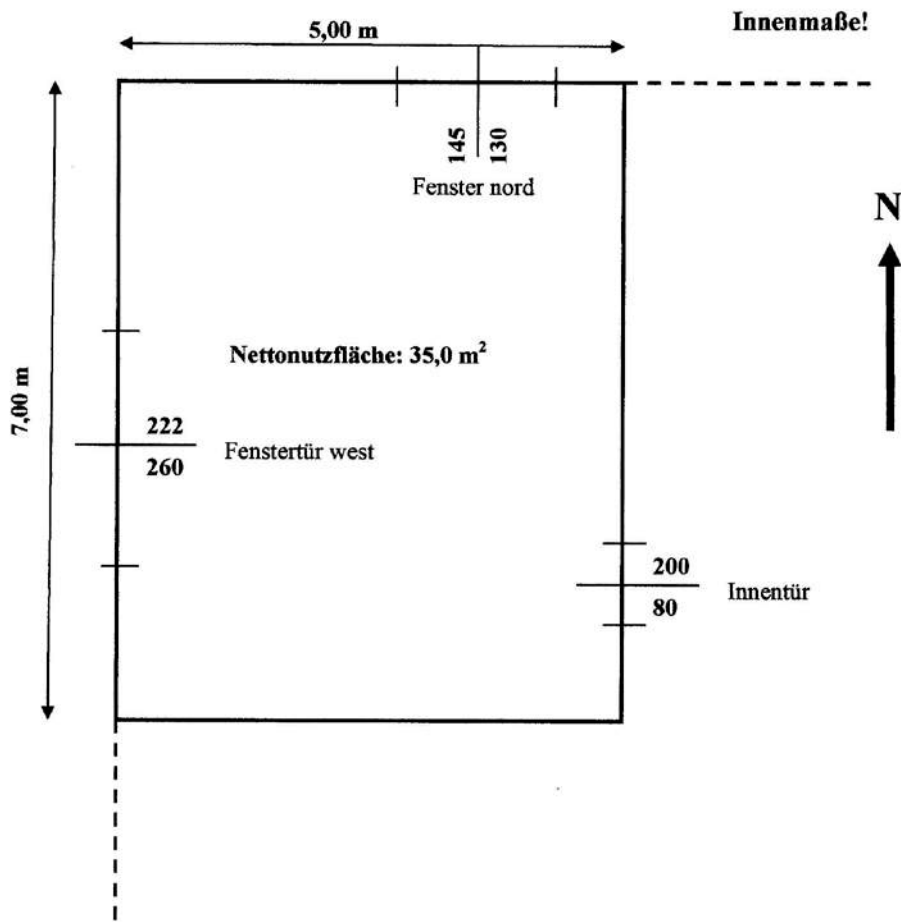


Abb. 37: Grundriss des Modellraums

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.

III.1.2 Bauteillisten

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 ⁻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. 38: Decken- und Fußbodenaufbau des Modellraums

	d [m]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻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. 39: 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 [7],
2. Gebäudehülle in Niedrigenergie-Standard,
3. Gebäudehülle in Passivhausstandard.

Variante 1: Gebäudehülle entsprechend der OIB-Richtlinie 6

Für die erste Variante, in der die Gebäudehülle den derzeit gültigen Bauvorschriften gemäß OIB-Richtlinie 6 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. 40: Var. 1: Thermische Gebäudequalität gemäß OIB-Richtlinie 6; Aufbau der Außenwand

Der Wärmedurchgangskoeffizient des in Tab. 40 gezeigten Wandaufbaus entspricht mit $U_{AW} = 0,35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ genau der in der OIB-Richtlinie 6 [7] 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. Der U-Wert des Fensters liegt für das Prüfnormmaß bei $U_w = 1,35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und erfüllt damit die Anforderungen der OIB-Richtlinie 6 ($U_w \leq 1,40 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Der Gesamtenergiedurchlassgrad für das 2-fach-Wärmeschutzglas wird mit $g = 0,60$ angesetzt.

Variante 2: Gebäudehülle in Niedrigenergie-Standard

Die zweite Variante geht von der Annahme aus, dass die thermische Qualität der Gebäudehülle in Niedrigenergie-Standard ausgeführt ist. Die folgende Tabelle zeigt den 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. 41: Var. 2: Niedrigenergie-Standard; Aufbau der Außenwand

Im Vergleich zur Außenwand nach OIB-Richtlinie 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. Der U-Wert des Fensters liegt unter diesen Annahmen 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.

Variante 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]	$\lambda [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	$\rho [\text{kgm}^{-3}]$	$c [\text{kJkg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
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. 42: Var. 3: Passivhaus-Standard; Aufbau der Außenwand

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 („Solarglas“). Der Wärmedurchgangskoeffizient des Glases ist mit jenem der Variante 2 identisch ($U_G = 0,70 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

III.2 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 [8] als Methode für die Kühllast-Berechnung die periodisch eingeschwungene Simulation mit einem Tag (24 Stunden) als Periodenlänge verwendet. Die außerklimatischen Bedingungen für solch' eine Simulation sind in der ÖNorm B8110-3 [8] 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 [8] aus dem EXCEL-Sheet NAT_T13.XLS [9] 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 [10] gesetzt.

Die Wahl der Standorte hängt einerseits von den außerklimatischen 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 [9] und [10] 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. 43: Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur für die Heiz- und Kühllastberechnung nach [9] und [10]

Um sowohl für die Heizlast- als auch für die Kühllastberechnung einen möglichst weiten Bereich an außerklimatischen Bedingungen abzustecken, werden für die folgenden Untersuchungen 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. 44: Daten für die ausgewählten Landeshauptstädte

III.3 Dynamische Heizlastberechnung

Die Heizlastberechnungen erfolgen für den in Abschnitt III.1 definierten Modellraum mittels periodisch eingeschwungener Simulation unter Zugriff auf das Gebäudesimulationsprogramm

GEBA [11]. Dem in Tab. 44 aufgelisteten Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur für den jeweiligen Standort wird eine mittlere monatliche Tagesschwankung überlagert, die dem Klimadatenkatalog [12] entnommen ist. Die derart errechneten Tagesverläufe der Außenlufttemperatur sind in folgender Abbildung dargestellt.

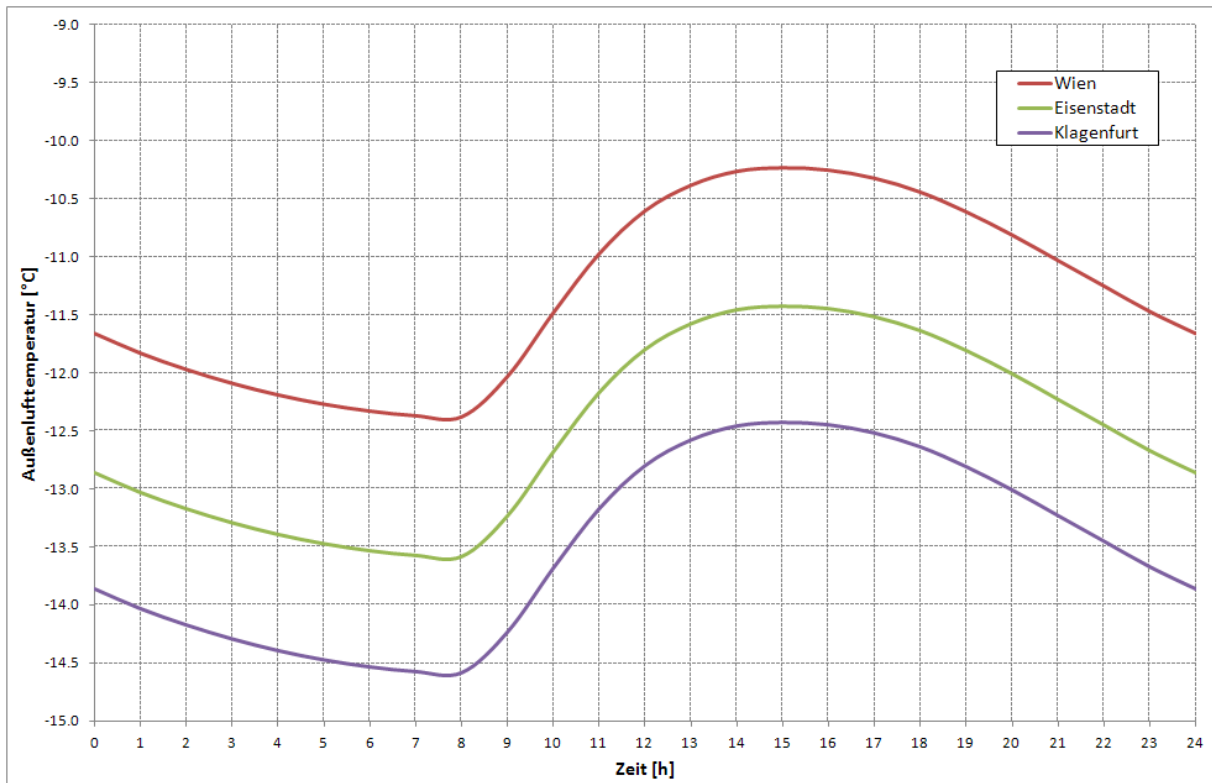


Abb. 38: Den dynamischen Heizlastberechnungen zugrunde gelegte Tagesverläufe der Außenlufttemperatur.

Ersichtlich handelt es sich bei den entworfenen Tagesgängen der Außenlufttemperatur um parallel verschobene Kurven, deren Tagesmittelwerte den in Tab. 44 für die Heizlastberechnung aufgelisteten Werten entsprechen. Die Tagesschwankung entspricht jeweils einem mittleren Januar-Tag.

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 Trübungsparameter wurden dementsprechend auf $T = 20,0$ (T ... Trübungsparameter 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 [13]. Der Norm entsprechend werden hingegen nutzungsbedingte Innenwärmen vernachlässigt. Als kritischer Fall wird somit der ungenutzte Raum angesehen.

Die Frischluftzufuhr erfolgt nach der ÖNorm H7500 [14] 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.

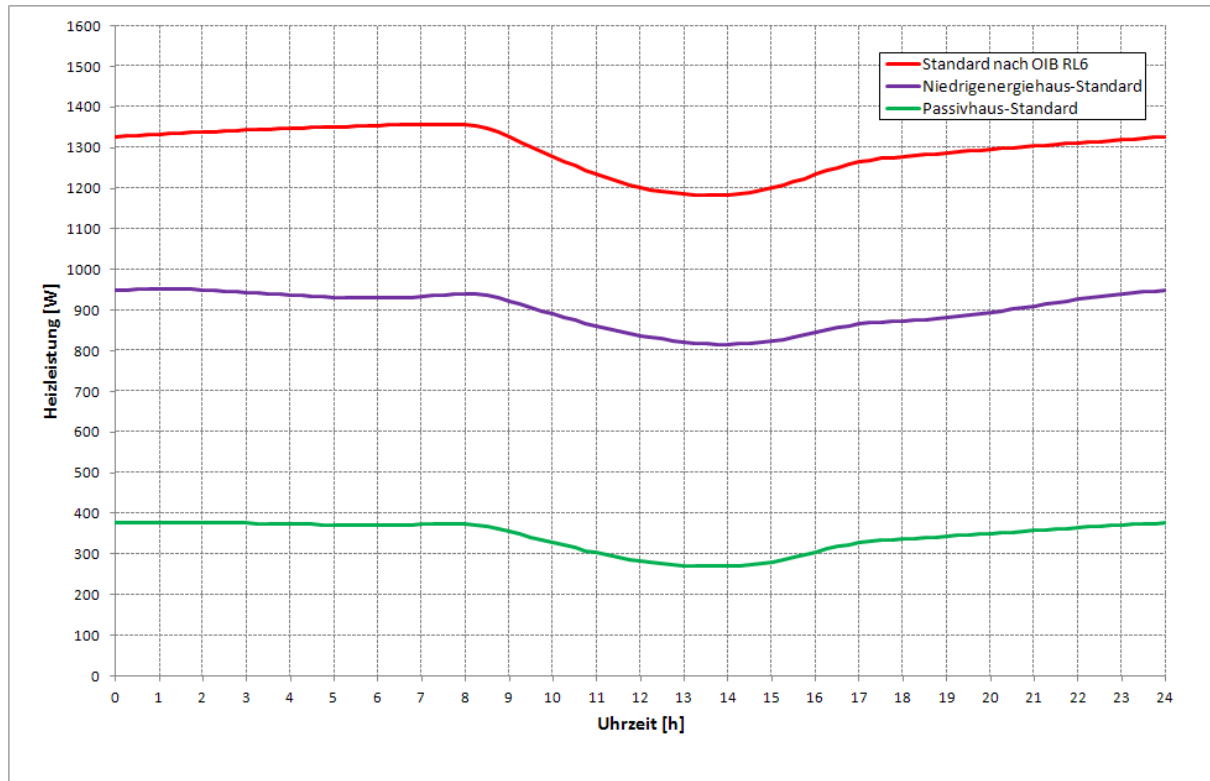


Abb. 39: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Wien – Innere Stadt

Beim thermischen Standard der Gebäudehülle nach OIB Richtlinie 6 [7] („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.

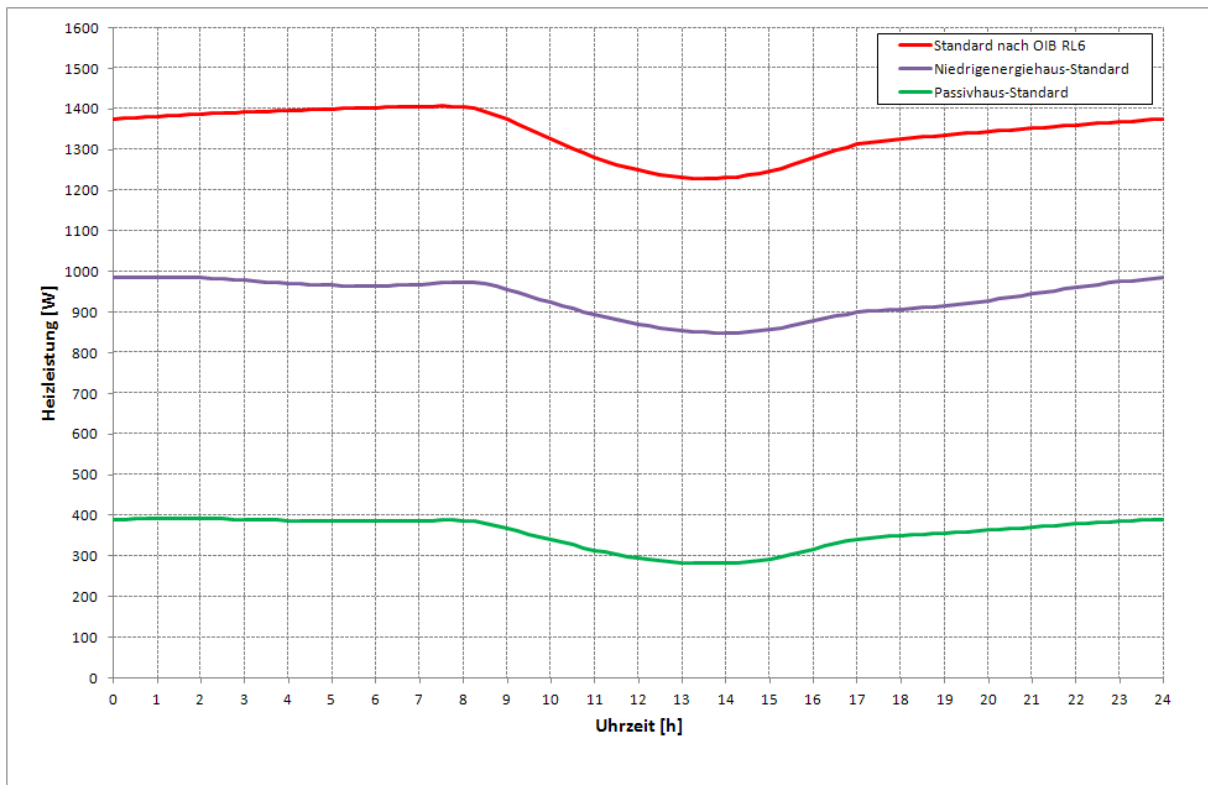


Abb. 40: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Eisenstadt

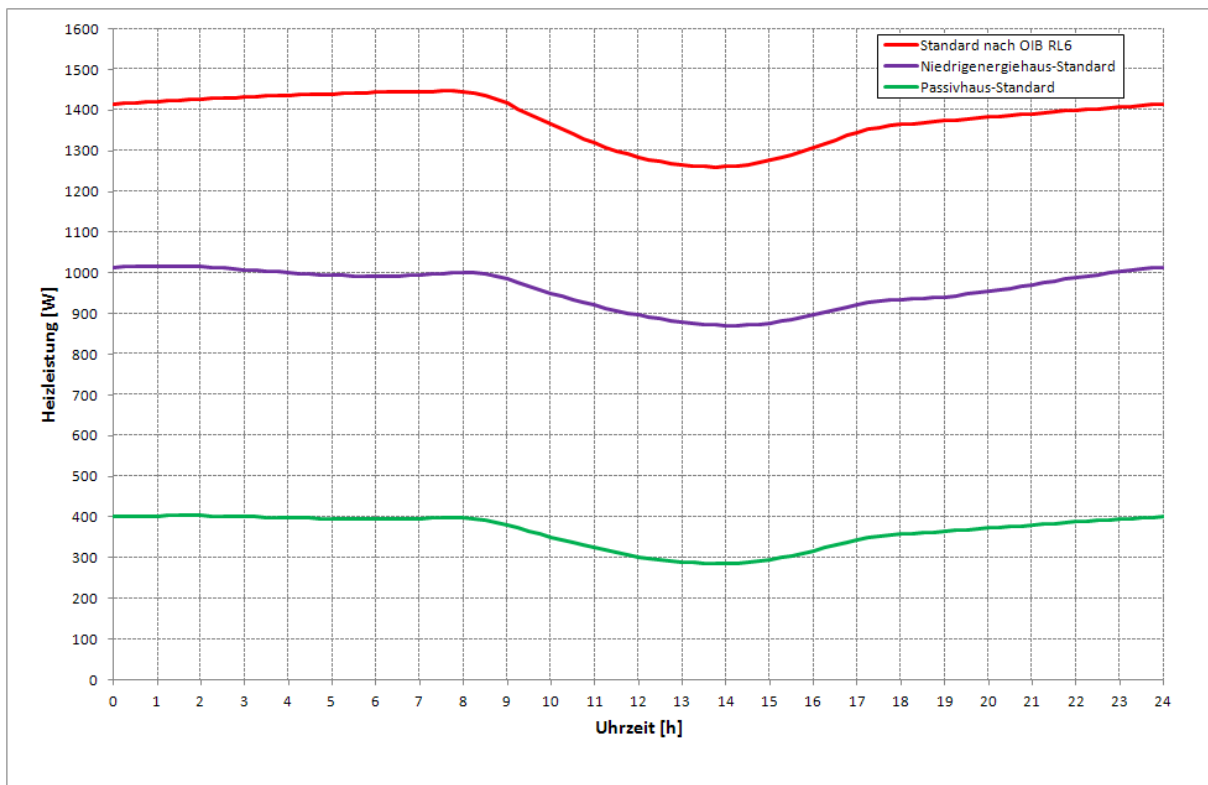


Abb. 41: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt

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.

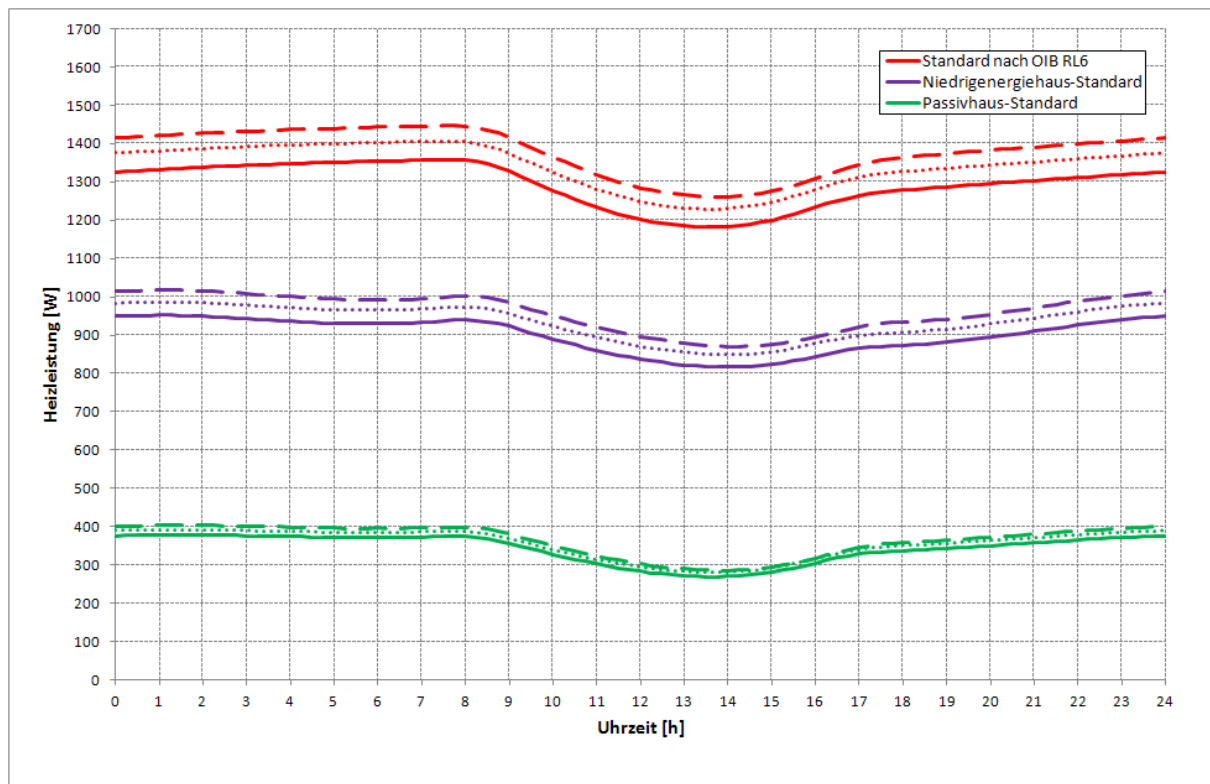


Abb. 42: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für die Standorte:
 durchgezogene Linie: Wien – Innere Stadt
 punktierte Linie: Eisenstadt
 strichlierte Linie: Klagenfurt

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 [7] 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. 45: 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. 46: 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 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.

Conclusio:

Die dynamische Berechnung der Raumheizlast für den in Abschnitt III.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 [7] 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.
- Im Fall 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 erfüllt¹⁰.

III.4 Ermittlung der Heizflächen

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 Tabelle 45 für die drei untersuchten Standorte und die betrachteten drei Stufen in Hinblick auf die thermische Qualität der Gebäudehülle zusammen gestellt.

Die Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Geschoßdecke Φ_h ergibt sich aus Gleichung (1) mittels Multiplikation der Wärmestromdichte q mit der Bauteilfläche A gemäß

¹⁰ 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.

$$\Phi_h = q \cdot A = \Lambda_{r,u} \cdot A \cdot (\Theta_r - \Theta_u) \quad (8)$$

Wird nun Φ_h mit der Heizlast Φ_{HL} des Raums gleichgesetzt, so ergibt sich die zur Deckung der Heizlast erforderliche Registerfläche unmittelbar zu

$$A = \frac{\Phi_{HL}}{\Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} \quad (9)$$

wobei Φ_{HL} der Tabelle 45 entnommen wird. Die Temperatur Θ_u in den Gleichungen (8) und (9) 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 (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 Tabelle 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 [7] ergibt sich z. B. für den Standort Klagenfurt der gesuchte Flächeninhalt A gemäß Gleichung (9):

$$A = \frac{\Phi_{HL}}{\Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} = \frac{1447,4}{4,5982 \cdot (30 - 20)} = 31,48 \text{ m}^2.$$

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 Tabelle 47 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. 47: Für den Modellraum aus der Heizlast errechnete Registerflächen in m^2

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 [7] reicht hingegen nicht aus (in Tab. 47 rot gekennzeichnet).

Ist die Gebäudehülle in Passivhausqualität ausgeführt, so reichen lt. Tabelle 47 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 (9) unter Verwendung von Gleichung (2) auf

$$\Lambda_{r,u} = a \cdot d^2 + b \cdot d + c = \frac{\Phi_{HL}}{A \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} \quad (10)$$

Die Lösung dieser quadratischen Gleichung nach dem Achsabstand d ist bekanntlich durch

$$d = \frac{1}{2 \cdot a} \cdot \left[-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot \left(c - \frac{\Phi_{HL}}{A \cdot (\Theta_r - \Theta_u)} \right)} \right] \quad (11)$$

gegeben, wobei a, b und c die Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ sind und den Tabellen in Kapitel 2 entnommen werden können.

Anwendung von Gleichung (11) unter Verwendung der in Tabelle 45 angegebenen Heizlastwerte und den Regressionskoeffizienten gemäß Tabelle 7 führt auf folgendes Ergebnis.

	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	OIB-Richtlinie 6
Wien	---	26,6	2,0
Eisenstadt	---	24,1	---
Klagenfurt	---	22,0	---

Tab. 48: Modellraum: erforderliche Achsabstände in cm bei einer Registerfläche von 24,5 m²

Es zeigt sich, dass für ein Passivhaus die quadratische Gleichung (10) keine reelle Lösung hat; der Wert unter der Wurzel in Gleichung (11) 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 (9) lediglich nach der Heizmitteltemperatur Θ_r aufzulösen:

$$\Theta_r = \Theta_u + \frac{\Phi_{HL}}{\Lambda_{r,u} \cdot A} \quad (12)$$

Bei einem angenommenen Achsabstand der Rohre von z. B. d = 0,30 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 Heizmitteltemperatur 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 (3) führt unter diesen Bedingungen auf

mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht zwischen 22,4 °C (Wien) und 22,6 °C (Klagenfurt). Bei der angesetzten Raumlufttemperatur von 20 °C kann davon ausgegangen werden, dass diese niedrigen Oberflächentemperaturen des beheizten Teils der Geschößdecke auch bei extremen winterlichen Bedingungen für einen sehr hohen thermischen Komfort sorgen.

Tabelle 48 zeigt jedoch auch, dass bei einer thermischen Qualität der Gebäudehülle nach OIB-Richtlinie 6 [7] 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 cm; dies sollte für eine Ausführung natürlich nicht empfohlen werden. Für die beiden anderen Standorte ergeben sich die Achsabstände nach Gleichung (11) 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 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 (12) $\Theta_r = 32,1 \text{ °C}$; 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 °C für Wien und 29,1 °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 II. 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, niedrigen Oberflächentemperaturen im Bereich der Temperierung und damit zu sehr hohem thermischen Komfort.

III.5 Dynamische Kühllastberechnung

Auch die Kühllastberechnungen erfolgen für den in Abschnitt III.1 definierten Modellraum mittels periodisch eingeschwungener Simulation unter Zugriff auf das Gebäudesimulationsprogramm GEBA [11]. Dem in Tab. 44 aufgelisteten Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur für den jeweiligen Standort wird eine mittlere monatliche Tagesschwankung überlagert, die gemäß ÖNorm B8110-3 [8] Standortunabhängig mit $\pm 7,0 \text{ K}$ angesetzt wird. Die der-

art errechneten Tagesverläufe der Außenlufttemperatur sind in folgender Abbildung dargestellt.

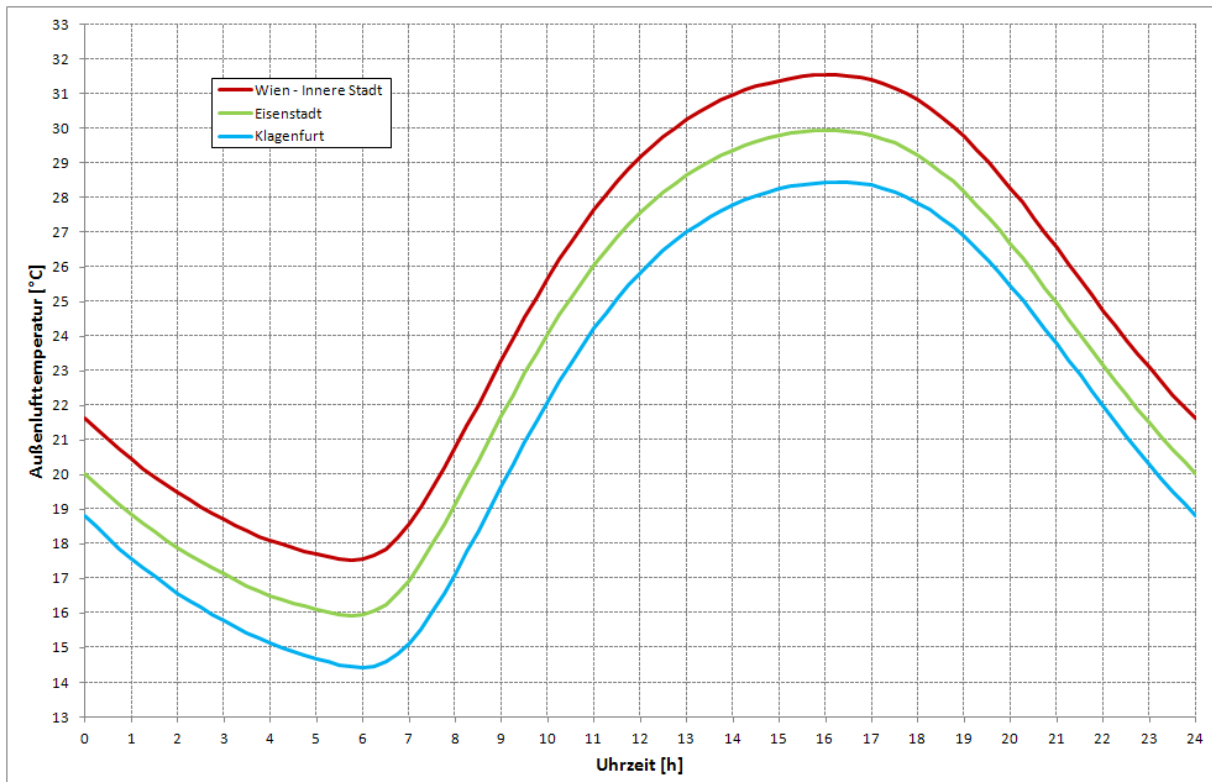


Abb. 43: Den dynamischen Kühllastberechnungen zugrunde gelegte Tagesverläufe der Außenlufttemperatur

Ersichtlich handelt es sich bei den entworfenen Tagesgängen der Außenlufttemperatur um parallel verschobene Kurven, deren Tagesmittelwerte den in Tab. 44 für die Sommertauglichkeitsberechnung aufgelisteten Werten entsprechen.

In Hinblick auf die Sonneneinstrahlung werden die Vorgaben der ÖNorm B8110-3 [8] 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 [8] ein Wert von $\rho = 0,20$ angesetzt.

Auch in Hinblick auf die Raumnutzung werden die Vorgaben der ÖNorm B8110-3 [8] 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 der 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.

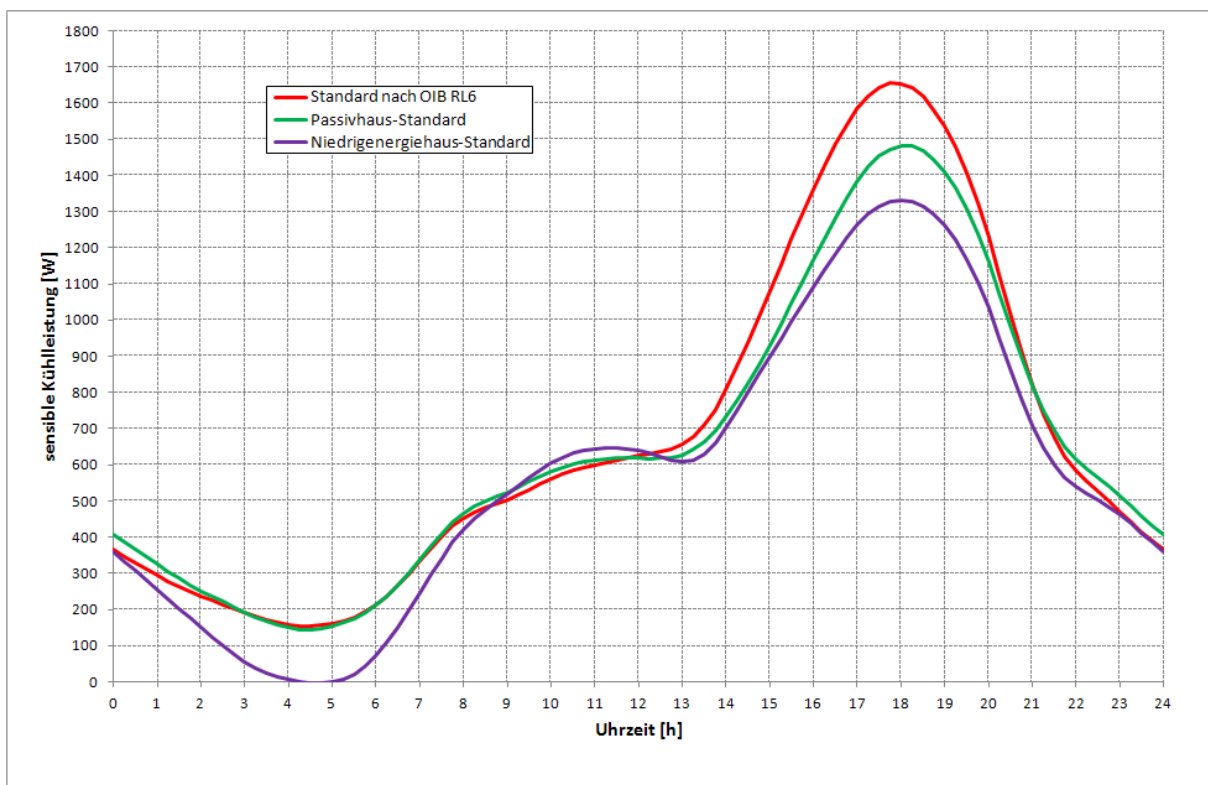


Abb. 44: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen; Norm-Sommertag für Wien, Innere Stadt

Die für die Gewährleistung der Sommertauglichkeit¹¹ 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 westgerichtete, unverschattete Fenstertür hervorgerufen und liefert den gesuchten Wert der sensiblen Kühllast.

Der thermische Standard der Gebäudehülle nach OIB Richtlinie 6 [7] („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.

¹¹ Als sommertauglich wird hier gemäß ÖNorm B8110-3 [8] ein Raum bezeichnet, dessen Tagesgang der operativen Temperatur die Obergrenze von 27 °C nicht überschreitet.

Eine tiefer gehende 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 deutlich höherem solaren Eintrag im Raum führt.

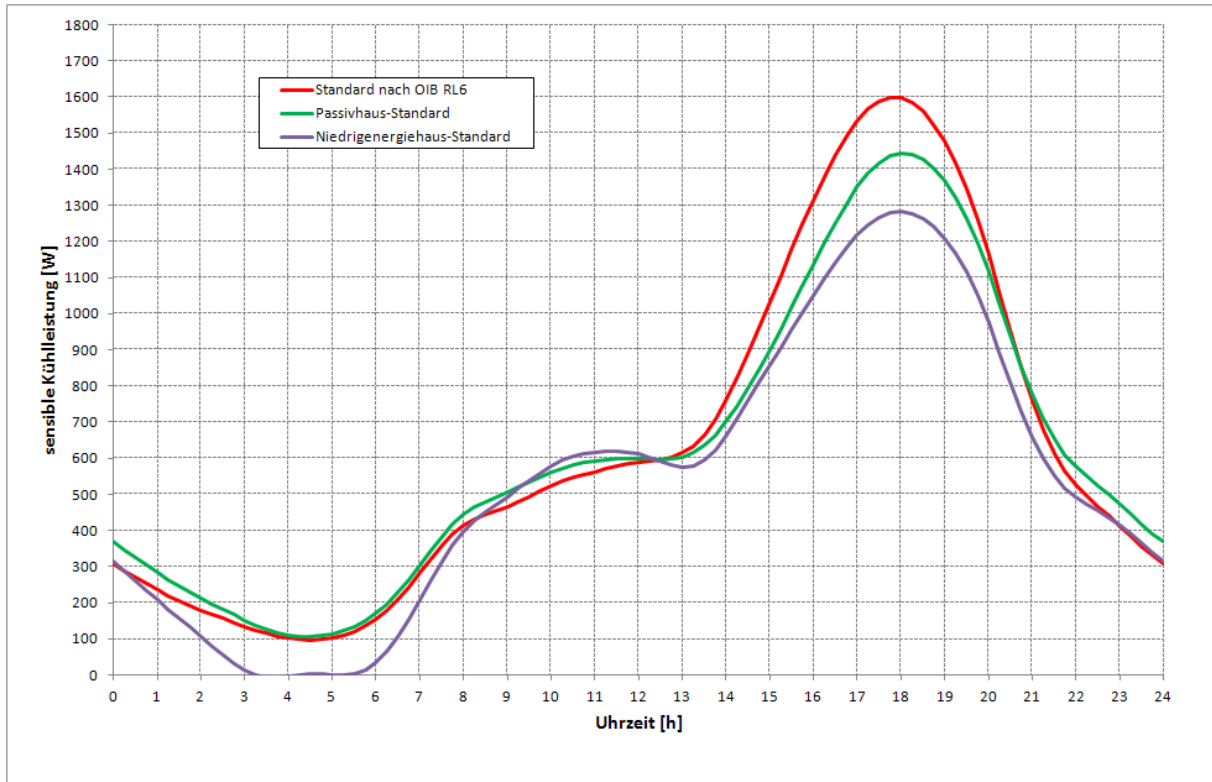


Abb. 45: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen; Norm-Sommertag für Eisenstadt

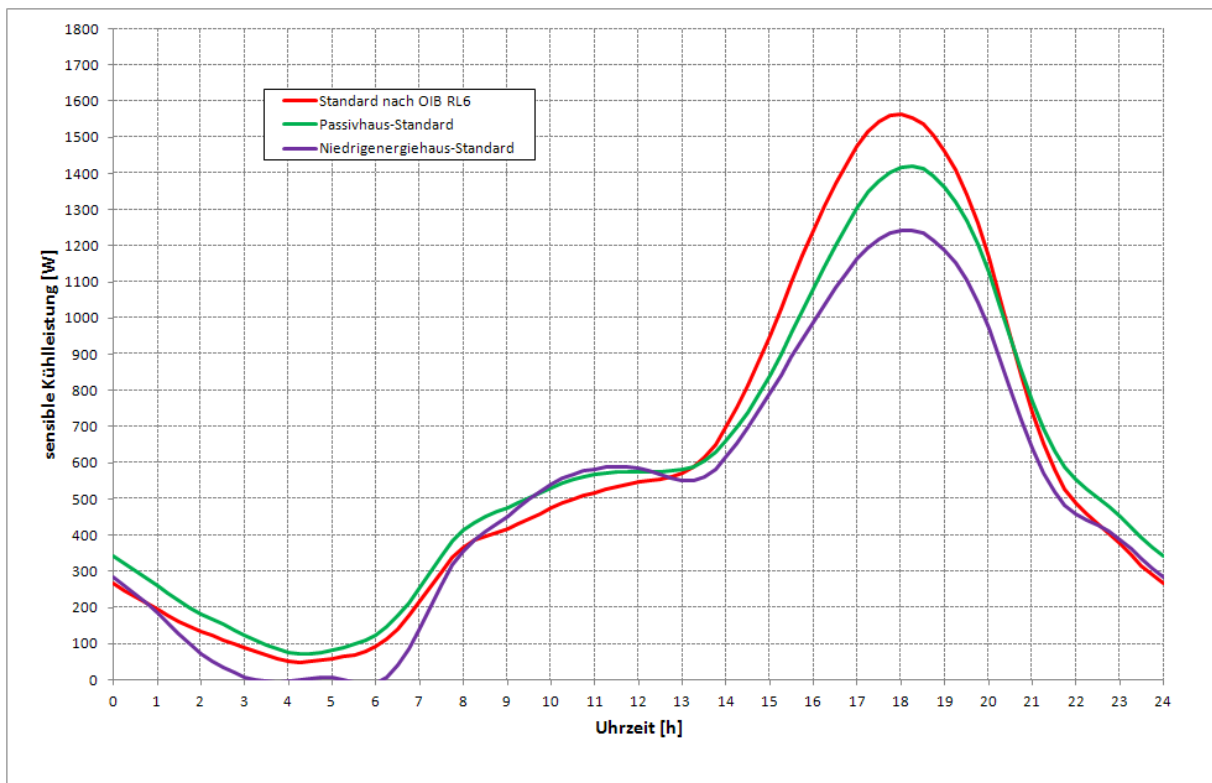


Abb. 46: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen; Norm-Sommertag für Klagenfurt
 Für Eisenstadt und Klagenfurt ergeben sich qualitativ faktisch gleiche Tagesverläufe wie für Wien, Innere Stadt. Natürlich bewirken die etwas niedrigeren sommerlichen Außenlufttemperaturen ein deutliches Zurückgehen der erforderlichen sensiblen Kühllast. Die folgende Abbildung zeigt die Auswirkung des Außenklimas auf die berechneten Tagesgänge der erforderlichen sensiblen Kühlleistung.

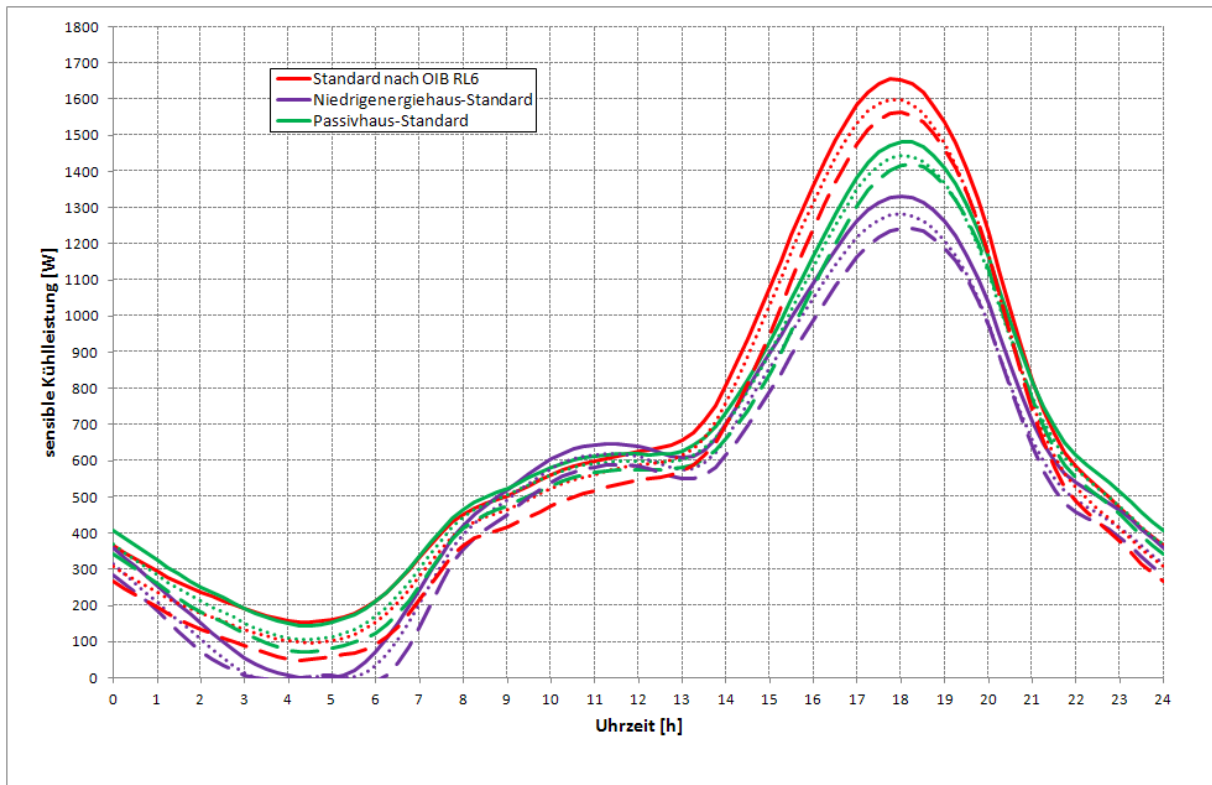


Abb. 47: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen am Norm-Sommertag für die Standorte:
 durchgezogene Linie: Wien – Innere Stadt
 punktierte Linie: Eisenstadt
 strichlierte Linie: Klagenfurt

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. 49: 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. 50: 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 Kühlleistungen 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.

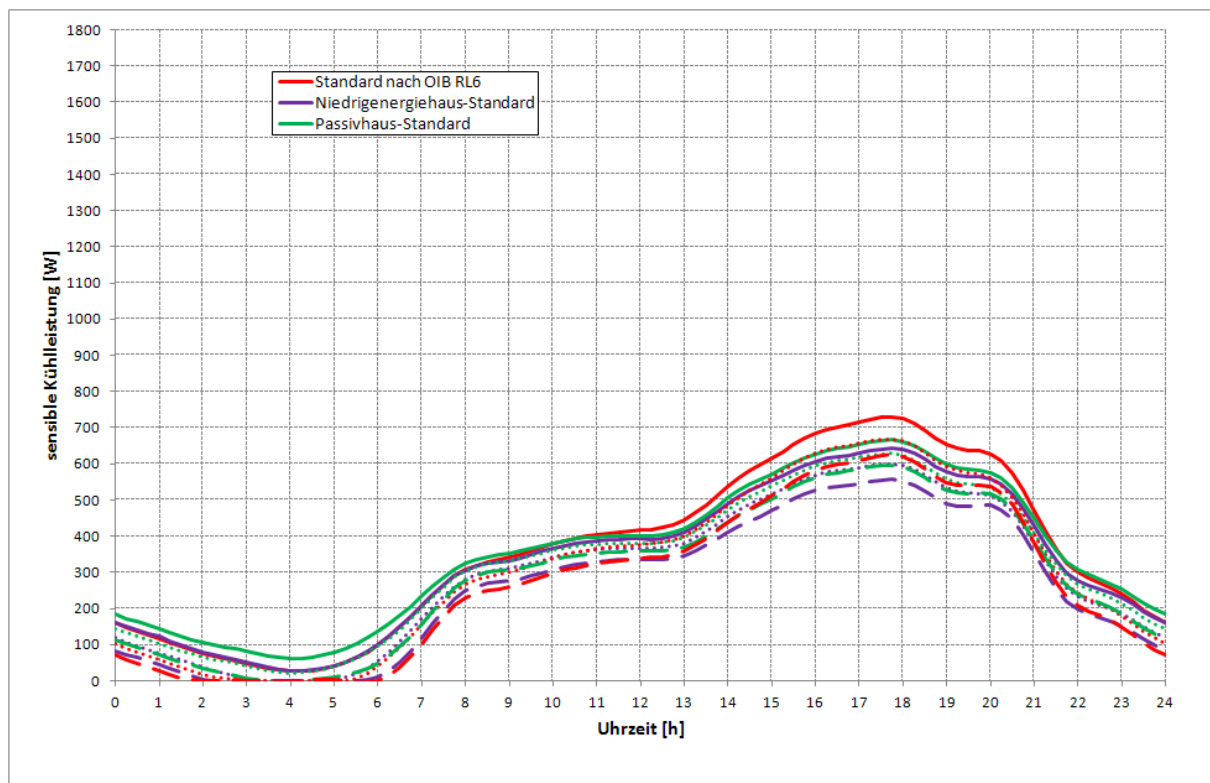


Abb. 48: Errechnete Tagesverläufe der sensiblen Kühlleistungen am Norm-Sommertag bei ganztägig verwendeter Außenjalousie vor den westlich orientierten Fenstertüren:
 durchgezogene Linie: Wien – Innere Stadt
 punktierte Linie: Eisenstadt
 strichlierte Linie: Klagenfurt

Es zeigt sich, dass durch Jalousie-Verwendung die erforderliche Kühlleistung mehr als halbiert wird. Die Kühllast wird nach wie vor durch das Maximum am späten Nachmittag be-

stimmt. 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. 51: 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. 52: 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. 46). 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 III.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 [7] deutlich niedriger.
- Für eine thermische Qualität der Gebäudehülle in Passivhausqualität liegen die Kühllast-Werte hingegen deutlich über den entsprechenden Heizlast-Werten.

III.6 Ermittlung der Kühlflächen

Die im vorher gehenden Abschnitt errechneten sensiblen Kühllasten bilden – gemeinsam mit den Erkenntnissen aus Abschnitt III.4 - 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 Berechnung der erforderlichen Flächen der Kühlregister werden damit die Kühllasten von Tabelle 51 herangezogen.

Wie schon bei der Berechnung der für die Deckung der Heizlast erforderlichen Registerflächen, wird die zu Gleichung (9) analoge Beziehung

$$A = \frac{\Phi_{KL}}{\Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_u - \Theta_r)} \quad (13)$$

zur Berechnung der erforderlichen thermisch aktivierbaren Fläche A heran gezogen. Φ_{KL} ist die errechnete sensible Kühllast in Watt und wird Tab. 51 entnommen; Θ_u ist die der Kühllastberechnung zugrunde gelegte Obergrenze für die Solltemperatur des unter der Geschosdecke liegenden Raums und beträgt im Fall der in Abschnitt III.5 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 Tabelle 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 wird z. B. für den Standort Klagenfurt der gesuchte Flächeninhalt A gemäß Gleichung (13) 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 Tabelle 53 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. 53: 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 Passivhaustauglichkeit 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 Oberflächentemperatur der gekühlten Deckenunterseite nach folgender, zu Gleichung (12) analoger Beziehung

$$\Theta_r = \Theta_u - \frac{\Phi_{KL}}{\Lambda_{r,u} \cdot A} \quad (14)$$

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 mittlere Oberflächentemperatur von 21,3 °C, für Klagenfurt mit 21,9 °C ein etwas höherer Wert. Die entsprechenden mittleren Oberflächentemperaturen für eine Gebäudehülle im Niedrigenergiehaus-Standard betragen 21,5 °C für Wien bzw. 22,3 °C für Klagenfurt. Es zeigt sich somit, dass bereits mit verhältnismäßig hohen Oberflächentemperaturen die erforderlichen sensiblen Kühlleistungen bereitgestellt werden, was hohe thermische Behaglichkeit auch während sommerlicher Hitzeperioden gewährleistet.

Conclusio:

Die Berechnung der Kühlflächen aus der sensiblen Kühllast erweist sich unter den in Abschnitt II. 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.

IV. 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 Kühllastberechnung 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 die rein konvektive Wärmezufuhr (d. h. Konvektorheizung) bzw. die 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 außenklimatischen 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 [15] – entnommen.

Demnach ist im Falle der Heizwärmebedarfsberechnung für die Wärmeabgabe von Personen, Beleuchtung und Geräten ein 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 [15] 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 [8], also jene Ansätze, die auch der Kühllastberechnung zugrunde gelegt wurden, verwendet.

Bezüglich der außenklimatischen 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.

IV.1 Außenklimatische Bedingungen – mittlere Verhältnisse

Die Simulationen des thermischen Verhaltens des in Abschnitt III.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 wer-

den somit die Außenlufttemperatur und Angaben zur Sonneneinstrahlung für diese drei Standorte.

Die benötigten langjährigen Klimadaten können mit dem Programm OEKLIM [16] flächendeckend für Österreich berechnet werden. OEKLIM ist in einer reduzierten Form auch auf der Homepage des BMFWF als „Klimadatenrechner“ [17] installiert und für die Allgemeinheit frei verfügbar.

In Hinblick auf die anzusetzenden Außenlufttemperaturen interessieren vor allem die Monatsmittelwerte für die drei ausgesuchten Standorte. Die folgende Abbildung zeigt die mit OEKLIM [16] berechneten langjährigen Monatsmittelwerte, wobei sich der Mittelungszeitraum auf 30 Jahre (1978 bis 2007) bezieht.

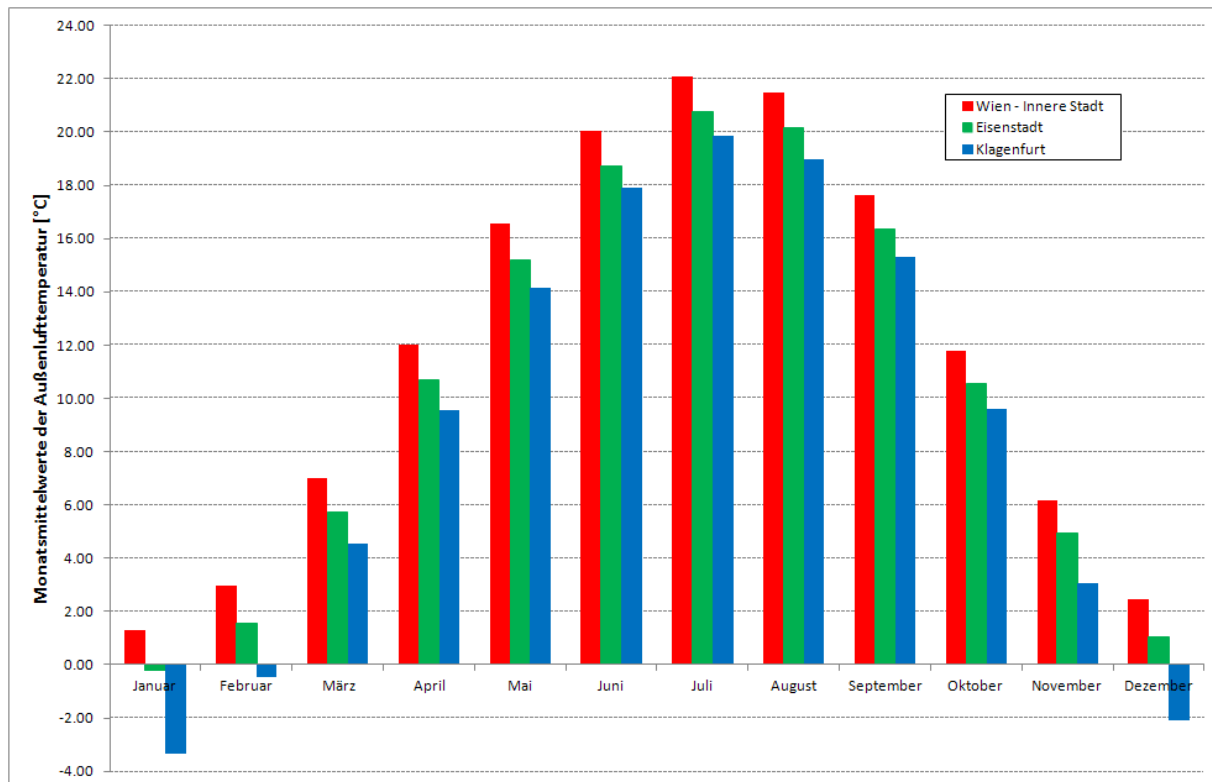


Abb. 49: Langjährige Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur für Wien, Innere Stadt, Eisenstadt und Klagenfurt

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 [12] zu finden und werden dem Tagesmittelwert nach Abb. 49 überlagert.

Bezüglich der Sonneneinstrahlung liefert OEKLIM [16] 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.

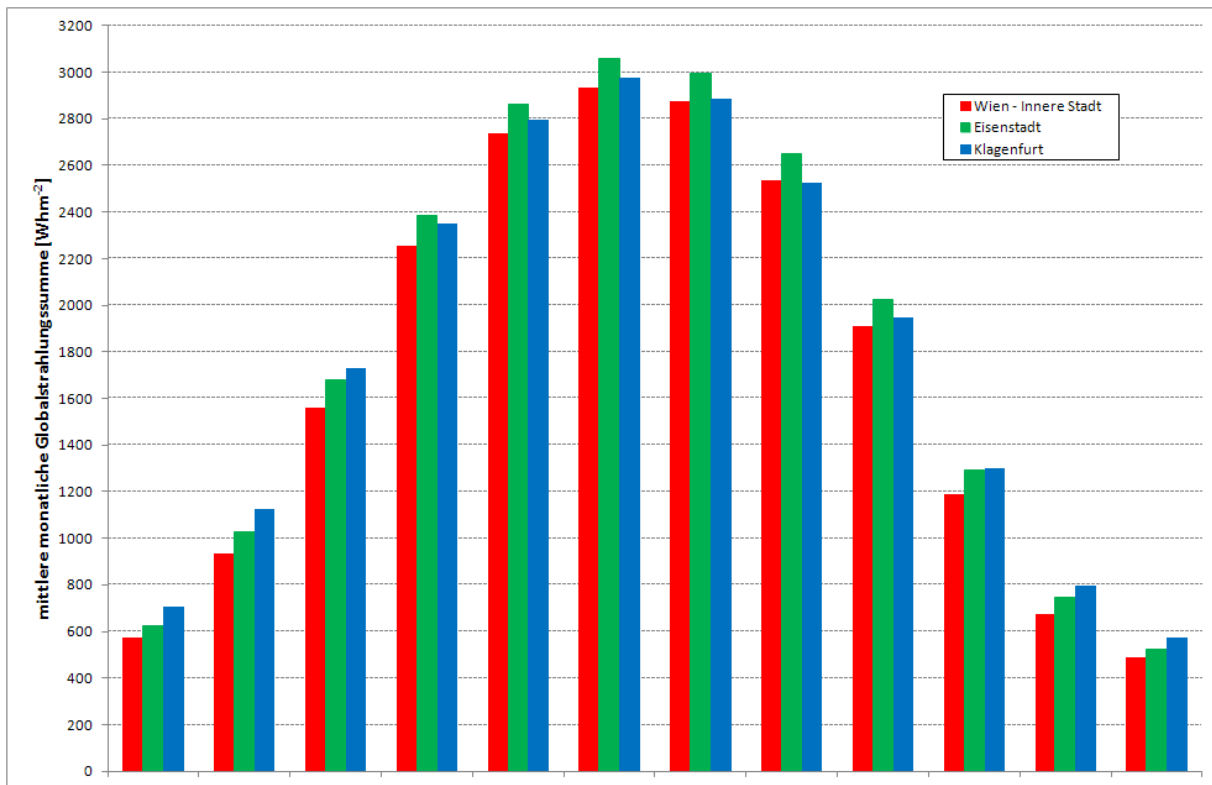


Abb. 50: Langjährige monatliche Summen der Globalstrahlung auf die vertikale Westfassade für Wien, Innere Stadt, Eisenstadt und Klagenfurt

Auch in Hinblick auf die solare Einstrahlung ergeben sich zwischen den ausgewählten Standorten deutliche Unterschiede. Die von OEKLIM [16] gelieferten Strahlungssummen auf die West- und Nordfassade werden im Zuge der Simulation verwendet, um Tagesgänge der entsprechenden Sonneneinstrahlungswerte rückzurechnen.

IV.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. 49 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. 54: Parameter zur Beschreibung der außerklimatischen Verhältnisse im Januar für die ausgewählten Landeshauptstädte

Aufgrund der Ergebnisse von Abschnitt III.3 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 gegenüber gestellt, 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 x 2,0 und einem Rohrabstand von 20 cm gerechnet¹². Als Gebäudestandort wird vorerst Wien, Innere Stadt festgelegt.

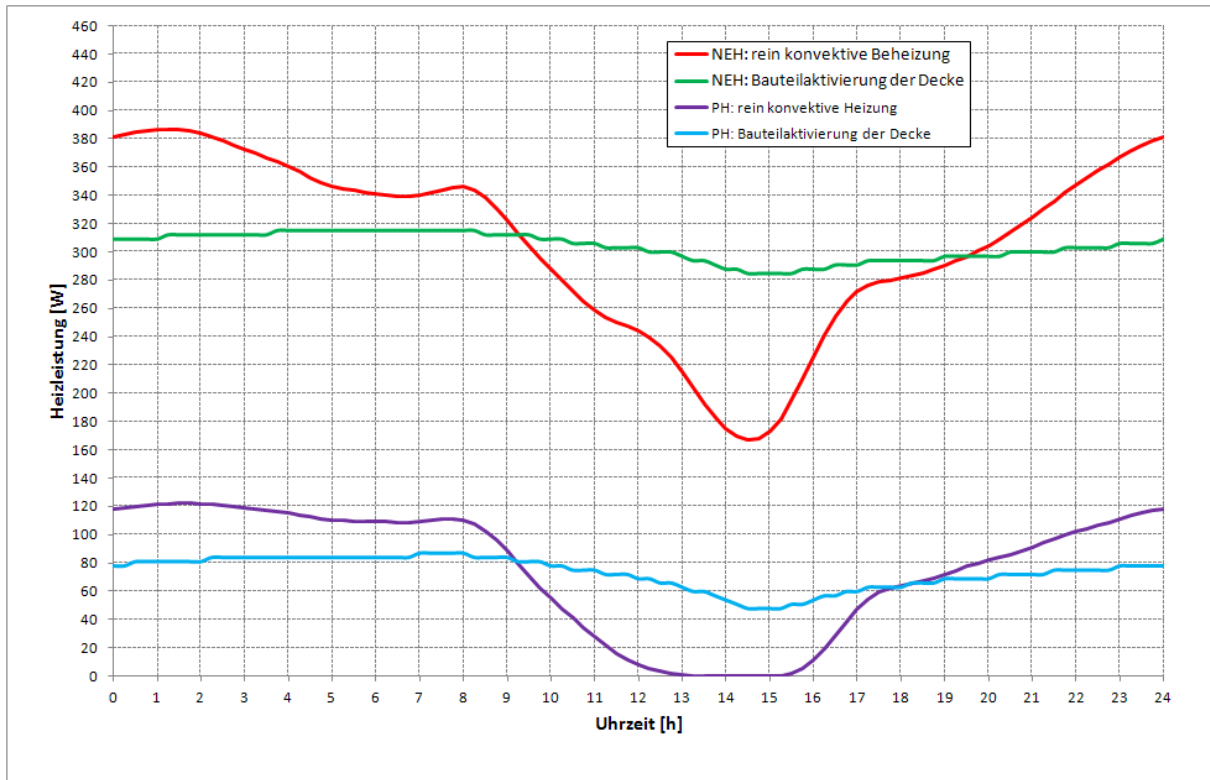


Abb. 51: Tagesgänge der erforderlichen Heizleistungen für den mittleren Januar-Tag am Standort Wien, Innere Stadt

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.

Abbildung 51 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 Abbildung 51 als Fläche unter der jeweiligen Kurve zu sehen. In folgender Tabelle sind die errechneten Heizwärmebedarfs-Werte für den mittleren Januar-Tag am Standort Wien gegenüber gestellt.

Niedrigenergiehaus		Passivhaus	
rein konvektiv	Deckenaktivierung	rein konvektiv	Deckenaktivierung
7,37	7,29	1,80	1,76

Tab. 55: Heizwärmebedarf in kWh für den mittleren Januar-Tag in Wien, Innere Stadt in Abhängigkeit von der Qualität der Gebäudehülle und der Art der Beheizung

¹² 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.

Es zeigt sich, dass der Heizwärmebedarf im Fall der thermischen Aktivierung der Geschößdecke 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 Heizmitteltemperaturen 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.

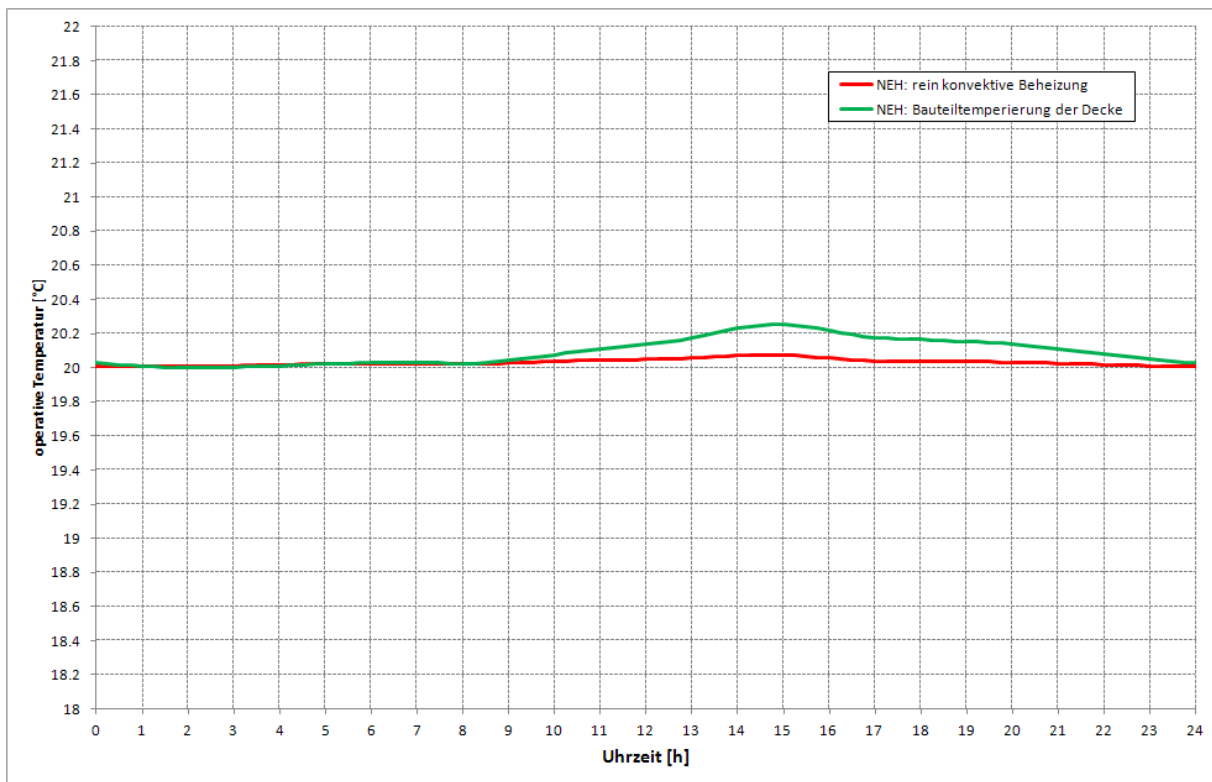


Abb. 52: Niedrigenergiehaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Beheizung nach Abbildung 51; mittlerer Januar-Tag in Wien, Innere Stadt

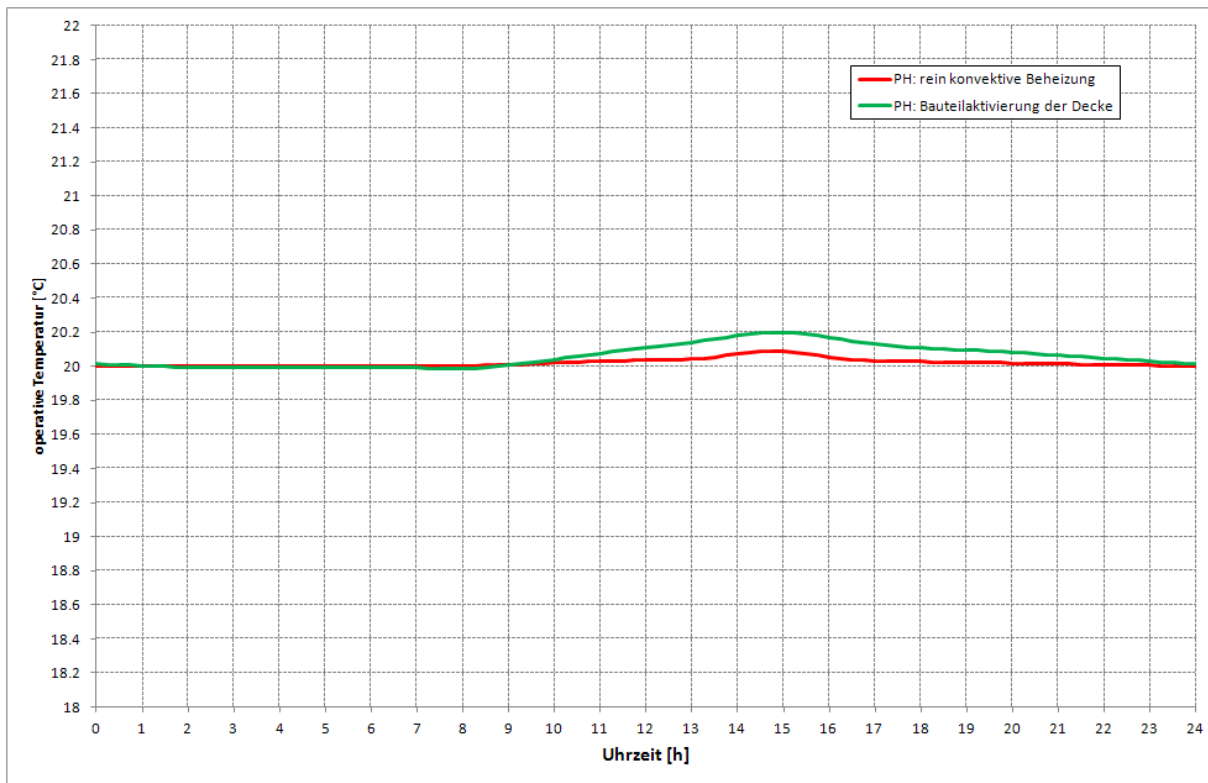


Abb. 53: Passivhaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Beheizung nach Abbildung 51; mittlerer Januar-Tag in Wien, Innere Stadt

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. Es zeigt sich damit der ausgezeichnete Selbstregelungseffekt der thermischen Bauteilaktivierung.

Der gesuchte Heizwärmebedarf für den Monat Januar ergibt sich aus dem in Tab. 55 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. 56: 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

konvektiver 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.

IV.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. 49 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. 57: Parameter zur Beschreibung der außerklimatischen Verhältnisse im Juli für die ausgewählten Landeshauptstädte

Aufgrund der Ergebnisse von Abschnitt III.5 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 III.5.

In folgender Abbildung sind die Tagesverläufe der benötigten sensiblen Kühlleistung bei rein konvektiver Kühlung des Raums jenen Tagesverläufen gegenüber gestellt, 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 x 2,0 und einem Rohrabstand von 20 cm gerechnet. Als Gebäudestandort wird vorerst Wien, Innere Stadt festgelegt.

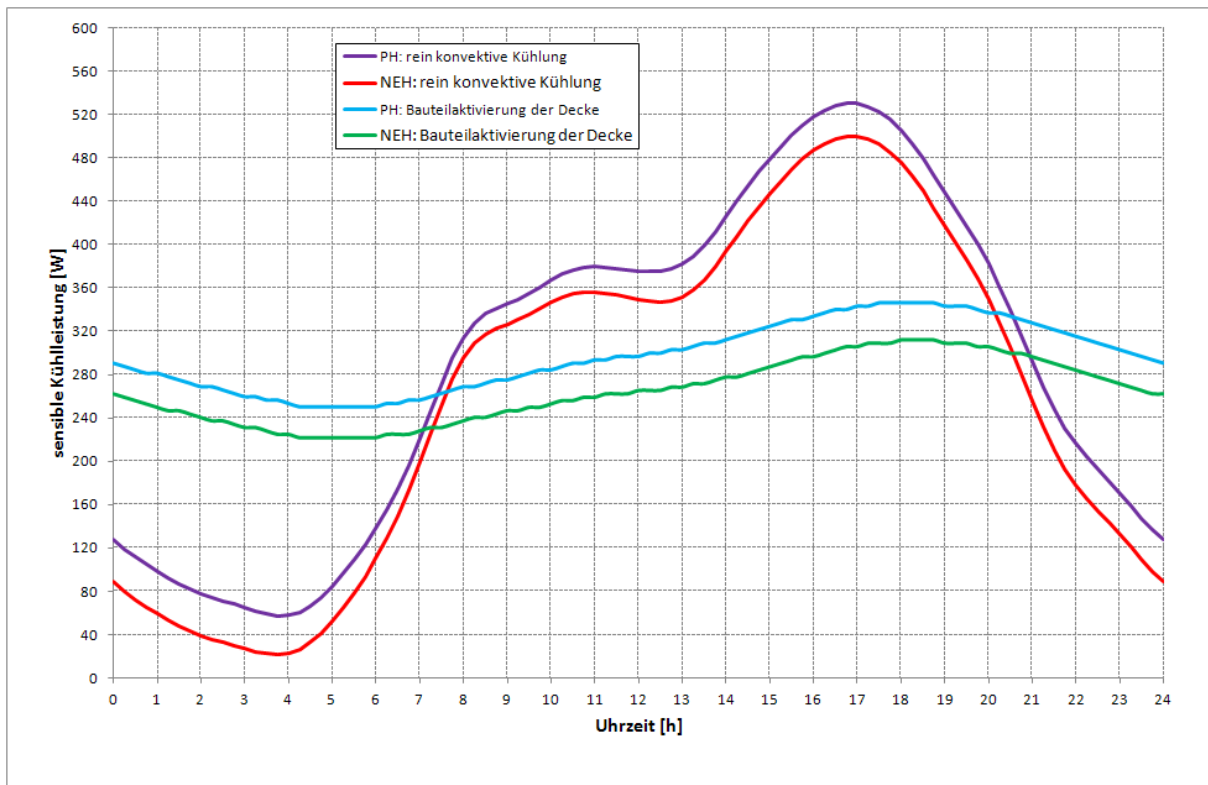


Abb. 54: Tagesgänge der erforderlichen sensiblen Kühlleistungen für den mittleren Juli-Tag am Standort Wien, Innere Stadt

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 Beheizung 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 unregelt angenommen.

Abbildung 54 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 Abbildung 54 als Fläche unter der jeweiligen Kurve zu sehen. In folgender Tabelle sind die errechneten Kühlbedarfs-Werte für den mittleren Juli-Tag am Standort Wien gegenüber gestellt.

Niedrigenergiehaus		Passivhaus	
rein konvektiv	Deckenaktivierung	rein konvektiv	Deckenaktivierung
6,22	6,36	6,96	7,12

Tab. 58: 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 Tabelle 55. 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.

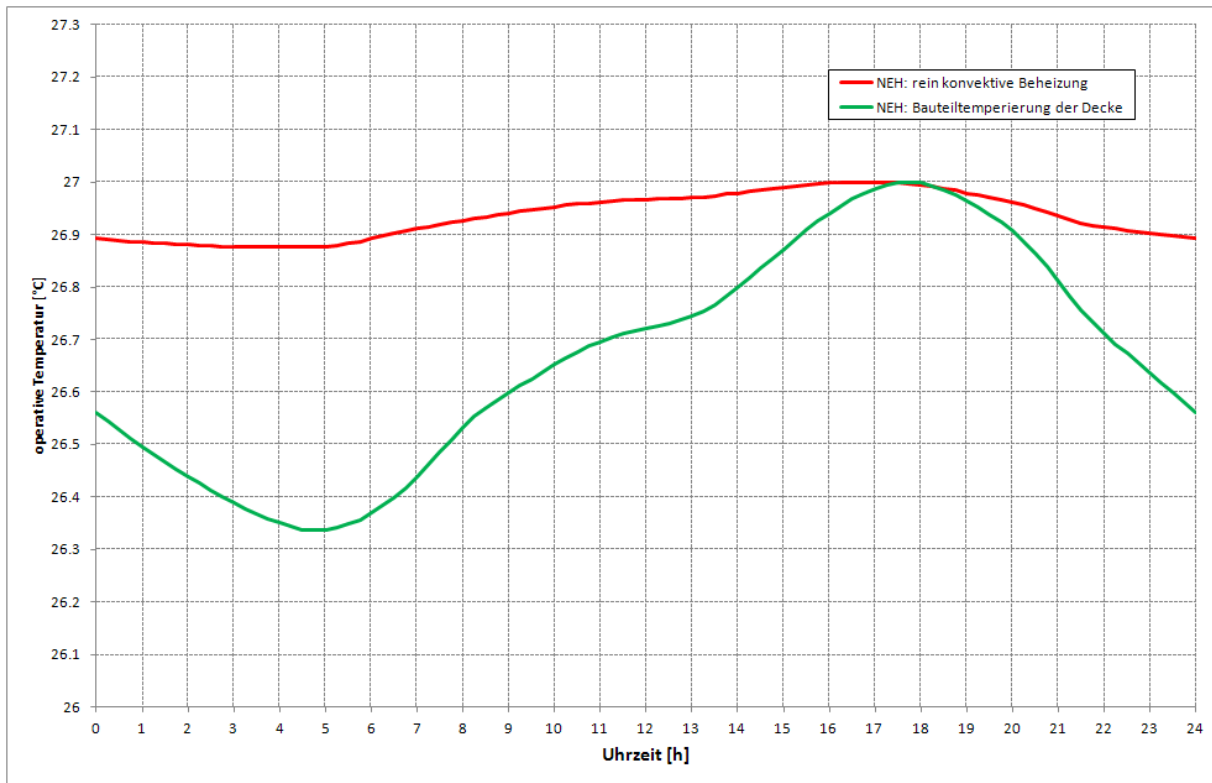


Abb. 55: Niedrigenergiehaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Kühlung nach Abbildung 54; mittlerer Juli-Tag in Wien, Innere Stadt

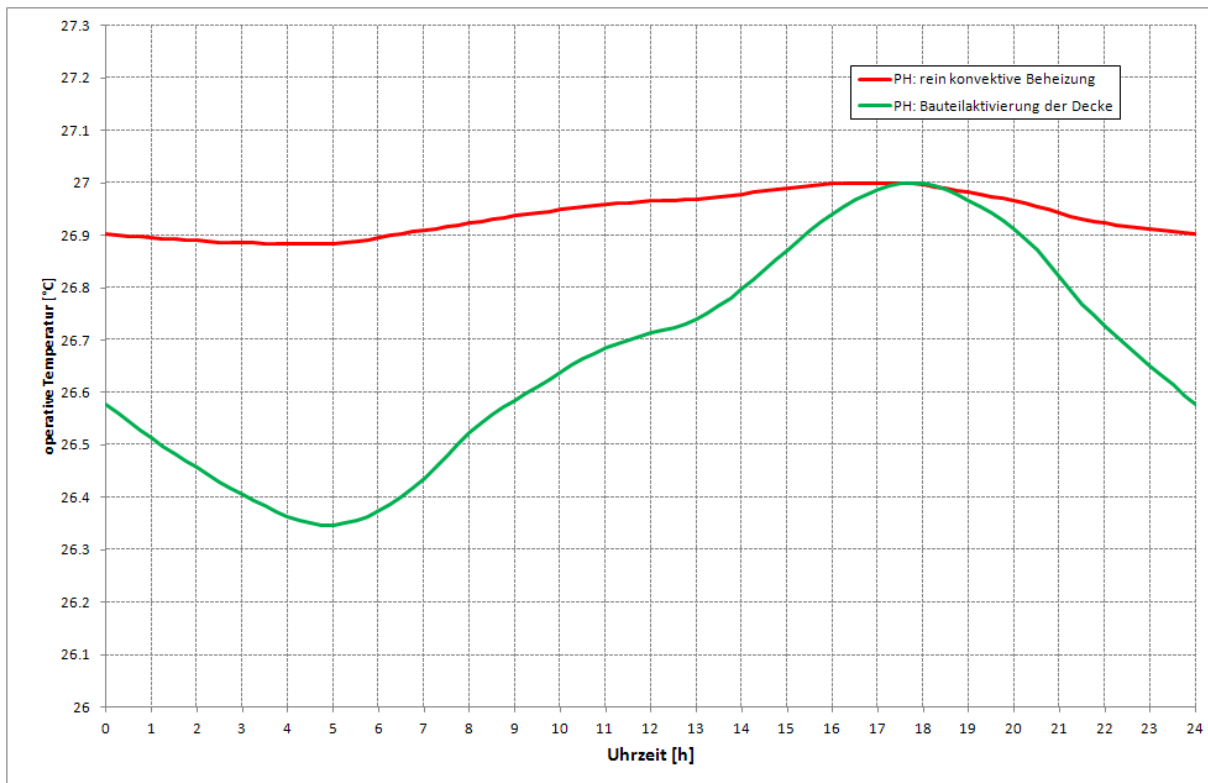


Abb. 56: Passivhaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der operativen Temperatur bei Kühlung nach Abbildung 54; mittlerer Juli-Tag in Wien, Innere Stadt

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. 58 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. 59: 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 nahezu 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. Auswirkungen auf die 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 dem Inhabitanten 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. In den folgenden Abschnitten werden exemplarisch jene Temperaturen im Raum berechnet, die ein kugelförmiger Messfühler bei einer Bewegung durch den Raum registriert. Aus diesen Berechnungen kann auf Temperaturgradienten geschlossen werden, und damit können weit tragfähigere Aussagen zum thermischen Komfort getroffen werden.

V.1 Strahlungsfeld im Winter

Im Folgenden soll das Strahlungsfeld in dem in Abschnitt III.1 definierten Modellraum für den mittleren Januar-Tag berechnet werden. Hierbei soll der in Hinblick auf die Oberflächen-

temperaturen kritischste Fall beleuchtet werden. Den Ergebnissen von Abschnitt IV.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.

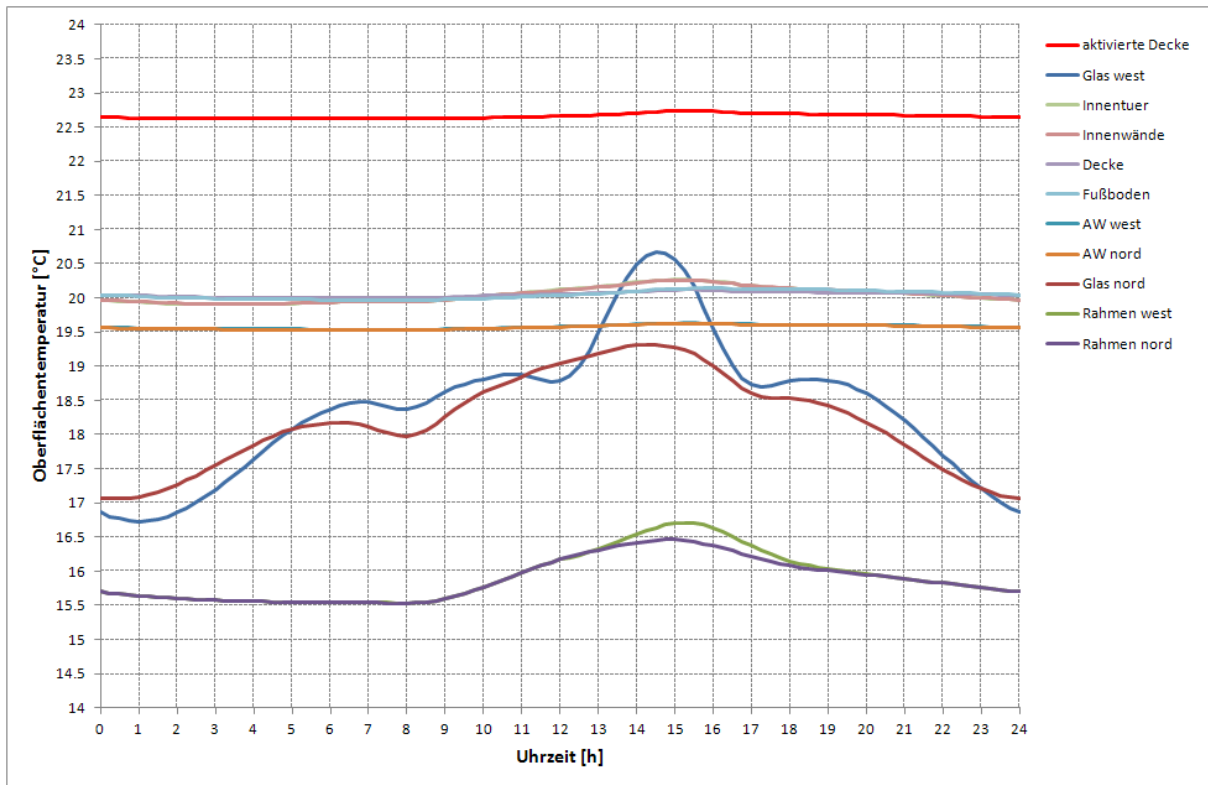


Abb. 57: Niedrigenergiehaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der Oberflächentemperaturen bei Beheizung mittels Aktivierung der Decke; mittlerer Januar-Tag in Klagenfurt

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 8⁰⁰ früh, dem Zeitpunkt eines lokalen Maximums der Wärmeabgabeleistung der Decke (siehe dazu z. B. Abb. 51), berechnet werden.

Die folgende Tabelle zeigt die um 8⁰⁰ 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. 60: Oberflächentemperaturen in °C für den mittleren Januar-Tag um 8⁰⁰; Niedrigenergie-Standard; Klagenfurt

Die innerste Isotherme gehört zu einer vom Kugelthermometer registrierten Temperatur von 20,5 °C. Mit Ausnahme der Bereiche nahe der Fenster und Fenstertür fällt die Temperatur auf 19,9 °C im unmittelbaren Bereich der Kante der beiden Außenwände (links oben) ab. Die 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.

In der nächsten Abbildung ist die vom Kugelthermometer registrierte Temperatur für einen Vertikalschnitt durch den Raum, der durch die Mitte des Nordfensters gelegt ist (siehe Abb. 37). Die Blickrichtung ist nach Osten, also von der Außenwand mit der Fenstertür zur Innenwand mit Tür hin gerichtet.

Die Lage der horizontalen Ebene, deren Temperaturverteilung in Abbildung 58 gezeigt wurde, ist in obigem Bild strichliert eingezeichnet. Der interessierende Aufenthaltsbereich vom Fußboden bis 1,8 m Raumhöhe liegt somit links von 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. 59 oben) 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. 60) 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 größtenteils 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 sehr gut einzustufen ist.

V.2 Strahlungsfeld im Sommer

Für den Sommerfall wird das Strahlungsfeld in dem in Abschnitt III.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 IV.3 folgend ist dies der Modellraum in Passivhaushaus-Qualität 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.

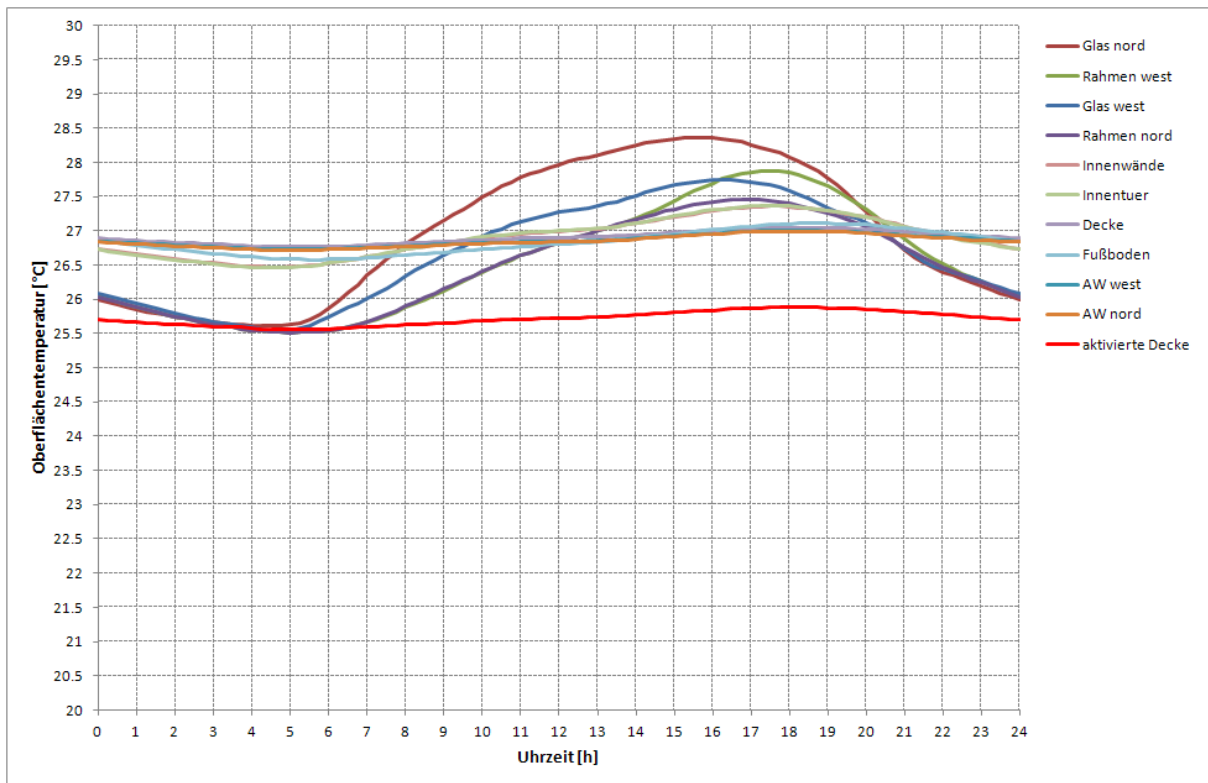


Abb. 60: Passivhaushaus-Qualität: Errechnete Tagesgänge der Oberflächentemperaturen bei Kühlung mittels Aktivierung der Decke; mittlerer Juli-Tag in Wien, Innere Stadt

Die Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Geschoßdecke liegt lediglich bis zu ca. 2 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. 54), 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. 61: 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.

Ersichtlich ist der Sommerfall von kleineren Temperaturdifferenzen geprägt als der Winterfall (siehe zum Vergleich Abb. 58). Die innerste Isotherme gehört zu einer vom Kugelthermometer registrierten Temperatur von 26,9 °C. Mit Ausnahme der Bereiche nahe der Fenster und 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 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. 61) 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. 37). Die Blickrichtung ist nach Osten, also von der Außenwand mit der Fenstertür zur Innenwand mit Innentür hin gerichtet.

Die Lage der horizontalen Ebene, deren Temperaturverteilung in Abbildung 61 gezeigt wurde, ist in obigem Bild strichliert eingezeichnet. Der interessierende Aufenthaltsbereich vom Fußboden bis 1,8 m Raumhöhe liegt somit links von 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 wahrzunehmen sein.

Im Bereich des Nordfensters (in Abb. 62 oben) 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. Literaturverzeichnis

- [1] Baustoffe und -produkte Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften, Tabellierte Bemessungswerte. *ÖNorm EN 12524*. 2000.
- [2] Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte. *ÖNorm B8110-7*. 2013.
- [3] 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.
- [4] Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren. *ÖNorm EN ISO 6946*. 2008.
- [5] **Koch, H. A. & Pechinger, U.** Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Sonnen- und Wärmestrahlungseinflüssen auf Gebäudeoberflächen. *Gesundheits-Ingenieur*. 1977. Bd. 98, Heft 10.
- [6] **Kreč, K.** Zur Wärmespeicherung in Baukonstruktionen. *Gesundheits-Ingenieur*. 1993, Bd. 114, Heft 1.
- [7] Energieeinsparung und Wärmeschutz. *OIB Richtlinie 6*: Österreichisches Institut für Bauforschung, 2011.
- [8] Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung. *ÖNorm B8110-3*. 2012.
- [9] EXCEL-Tool zur Berechnung der Außenlufttemperatur mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen. *OIB*: Österreichisches Institut für Bauforschung, 2007.
- [10] EXCEL-Tool zur Berechnung der Normaußentemperatur. *OIB*: Österreichisches Institut für Bauforschung, 2009.
- [11] GEBA. *Programm zur Berechnung des thermischen Verhaltens von Räumen, Raumgruppen und Gebäuden*: © Dr. Klaus Krec, 2014. Var. 8.0.
- [12] **Heindl, W., Sigmund, A. & Kreč, K.** *Klimadatenkatalog*. Wien : Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, 1984. Bde. 5a, b, c.
- [13] Passivhaus Projektierungspaket - Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. *PHPP 2004*. Darmstadt: Passivhausinstitut Dr. Wolfgang Feist, 2004.
- [14] Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. *ÖNorm H7500*. 2006.
- [15] Wärmeschutz im Hochbau -Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile. *ÖNorm B8110-5*. 2011.
- [16] **Kreč, K. & Nackler, J. N.** *OEKLIM - Klimadaten für das Bauwesen*: im Auftrag der MA39 der Stadt Wien, 2012.
- [17] **Kreč, K. & Nackler, J. N.** *Klimadatenrechner* - Link: <http://www.bmwfw.gv.at/klimadatenrechner>: im Auftrag des BMWFJ, 2012.
- [18] Rohre aus vernetztem Polyethylen hoher Dichte (PE-X) - Maße. *DIN 16893*. 2000.
- [19] Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz. *ÖNorm B8110-2*. 2003.

- [20] Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf. *ÖNorm B8110-6*. 2010.
- [21] Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen. *ÖNorm EN ISO 10211*. 2008.
- [22] AnTherm. *Programm zur Analyse des thermischen Verhaltens von Bauteilen mit Wärmebrücken*: © M. Kornicki, 2014. Var. 7.126.
- [23] IBO - Passivhaus-Bauteilkatalog – Ökologisch bewertete Konstruktionen, 3. Auflage, ISBN 978-3-211-29763-2, Springer-Verlag Wien – New York, 2009
- [24] **Nackler, J. N. & Kreč, K.**, Wärmeverluste von erdberührten Bauteilen: Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren, ISBN-13: 978-3639470536, AV Akademiker-Verlag, 2014.
- [25] **Heindl, W. & Kreč, K.**, Interpolation und Kontinuierisierung, Forschungsbericht im Auftrag des BMWF, 1985
- [26] THESIM. *Programm zur dreidimensionalen Simulation des thermischen Verhaltens von Einzelräumen*. © Dr. Klaus Krec, 2014. Var. 3.0.
- [27] Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen Berechnungsverfahren. *ÖNorm EN ISO 13786*. 2008.

VII. Anhänge

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit führten zu weiteren Detailfragen, die in den folgenden beiden Anhängen diskutiert und mittels rechnerischer Parameterstudien beantwortet werden.

VII.1 Auswirkungen einer Verkleidung der Deckenuntersicht

In Ergänzung zu Abschnitt II.2.5 ist die Frage zu beantworten, welchen Einfluss die Verkleidung der Deckenuntersicht auf die Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme einer thermisch aktivierten Decke hat.

Unter Beibehaltung des in Tab. 1 festgelegten Schichtaufbaus einer Geschoßdecke wird angenommen, dass die Deckenuntersicht mit einer 12,5 mm dicken Gipskartonplatte verkleidet 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 folgende Untersuchung wird für ein Register von Rohren mit 17 mm Außendurchmesser und mit einer Betonüberdeckung von 50 mm (siehe Abb. 10) durchgeführt; der Rohrabstand wird als Parameter der Untersuchung variiert.

In den folgenden beiden Abbildungen sind die flächenbezogenen thermischen Leitwerte zwischen Rohrregister und Raum unterhalb der Decke $\Lambda_{r,u}$ in Abhängigkeit vom Achsabstand der Rohre des Registers als Ergebnis der rechnerischen Untersuchung für den Heiz- und den Kühlfall dargestellt. Zur leichteren Interpretierbarkeit wird das Ergebnis gemeinsam mit den bereits in Abschnitt II.2.5 gewonnenen Ergebnissen dargestellt. Es werden somit lediglich die Abbildungen 13 und 14 ergänzt.

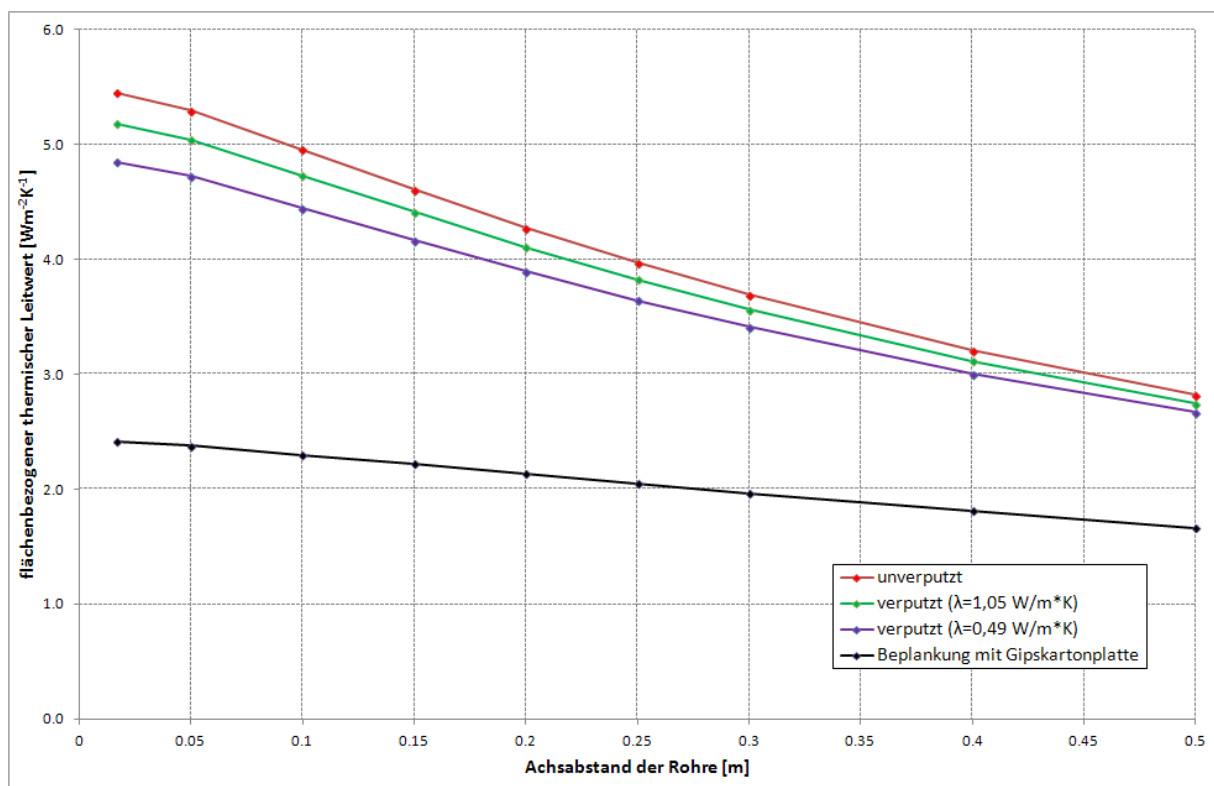


Abb. A.1: Heizfall: Vergleich der flächenbezogenen thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ zwischen unverputzter und verputzter, sowie mit Gipskartonplatte verkleideter Decke

Die folgende Tabelle A.1 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. A.1 dargestellten Verläufe.

	a [$\text{Wm}^{-4}\text{K}^{-1}$]	b [$\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	c [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
unverputzt	4,8608	-8,2603	5,7340
verputzt ($\lambda_{\text{Putz}} = 1,05 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	3,9601	-7,3183	5,4117
verputzt ($\lambda_{\text{Putz}} = 0,49 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	3,4070	-6,6280	5,1157
Beplankung mit Gipskartonplatte	0,2858	-1,7571	2,4681

Tab. A.1: Heizfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

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

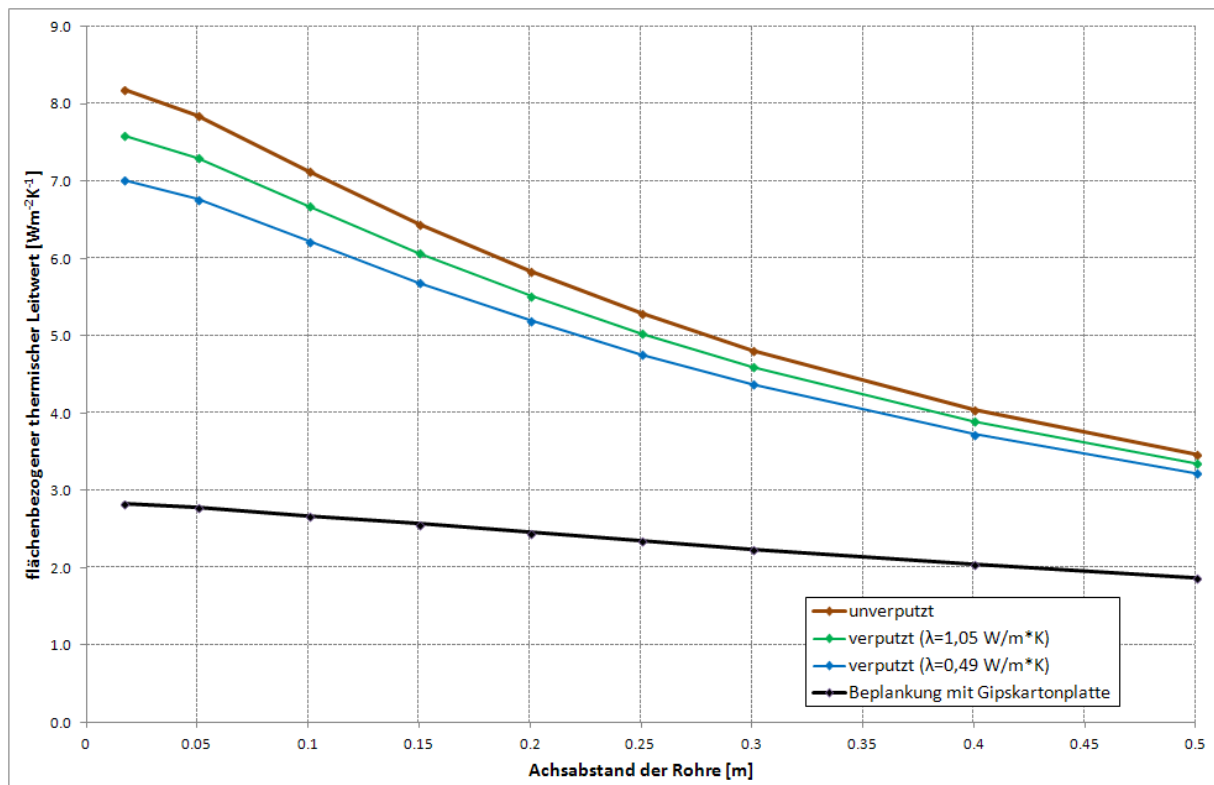


Abb. A.2: Kühlfall: Vergleich der flächenbezogenen thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ zwischen unverputzter und verputzter, sowie mit Gipskartonplatte verkleideter Decke

Die folgende Tabelle A.2 zeigt die mittels quadratischer Regression ermittelten Koeffizienten für die in Abb. A.2 dargestellten Verläufe.

	a [$\text{Wm}^{-4}\text{K}^{-1}$]	b [$\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	c [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
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. A.2: Kühlfall: Regressionskoeffizienten zur Berechnung des flächenbezogenen thermischen Leitwerts $\Lambda_{r,u}$ gemäß Gleichung (2).

Sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlfall zeigt sich, dass eine Beplankung der Deckenuntersicht der thermisch aktivierten Decke die flächenbezogenen thermischen Leitwerte – und damit die flächenbezogenen Wärmeabgabe- bzw. Wärmeaufnahmeleistungen – drastisch sinken lässt. Bei Rohrabständen unter 20 cm wird die Wärmeabgabeleistung im Vergleich zur unverputzten Decke auf etwas weniger als die Hälfte reduziert. In Hinblick auf die Wärmeaufnahmeleistung der Decke im Kühlfall fällt die Reduktion noch deutlich größer aus.

Conclusio:

- Eine Beplankung der Deckenuntersicht mit einer Gipskartonplatte muss vermieden werden, da die wärmedämmende Wirkung von Luftschicht und Gipskartonplatte sowohl die Wärmeabgabe- als auch die Wärmeaufnahmeleistung der Decke massiv reduziert.
- Verallgemeinernd kann aus diesem Ergebnis geschlossen werden, dass Schichten mit im Vergleich zu Stahlbeton geringer Wärmeleitfähigkeit zwischen Rohrregister und unter der Decke liegendem Raum jedenfalls zu vermeiden sind. Im Fall von dünnen Schichten – wie z. B. Putz- oder Spachtelschichten – kann die Reduktion der Wärmeabgabe- und Wärmeaufnahmeleistung noch in akzeptablen Größenordnungen gehalten werden. Im Sinne der Erhaltung hoher Planungssicherheit ist für solche Fälle aber zu empfehlen, die Eigenschaften der Decke mittels mehrdimensionaler Berechnung zu ermitteln.

VII.2 Dynamische Heizlastberechnung für einen Modellraum im EG

In Ergänzung zu Abschnitt III.3 wird rechnerisch abgeschätzt, wie sich die bereits ermittelten Ergebnisse in Hinblick auf Heizlast bzw. erforderliche Heizflächen verändern, wenn sich der Modellraum im Erdgeschoß befindet. Hierbei sind zwei verschiedene 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. Natürlich wird davon ausgegangen, dass in diesen Fällen der Boden des Modellraums unbeheizt bleibt.

Die Berechnungen werden jeweils für den Standort Klagenfurt durchgeführt, wobei zwischen der Ausführung der Gebäudehülle in Niedrigenergiehausqualität und einer in Passivhausqualität zu unterscheiden ist.

VII.2.1 Gebäude unterkellert

Der Fußboden des in Abschnitt III.1.1 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.

VII.2.1.1 offener Keller

Im Fall des offenen Kellers wird die Kellertemperatur mit der Außenlufttemperatur gleich gesetzt (Auslegungstemperatur für Klagenfurt: $-13,5\text{ °C}$). Es ist daher naheliegend, für diesen Fall den Wärmedurchgangskoeffizienten für den Fußboden mit jenem der Außenwand gleichzusetzen. Für den Passivhausstandard sollte der Fußbodenaufbau demnach gemäß Tab. 42 einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_f = 0,10\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ erreichen¹³. Im Fall des Niedrigenergiehausstandards beträgt der entsprechende Zielwert $U_f = 0,15\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (siehe Tab. 41).

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. 1 wie folgt.

¹³ 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.

	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
Dämmschicht EPS	0,2000	0,031	15	1,40
unten				

Tab. A.3: 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 („Worstcase“) 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 ihrer 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.

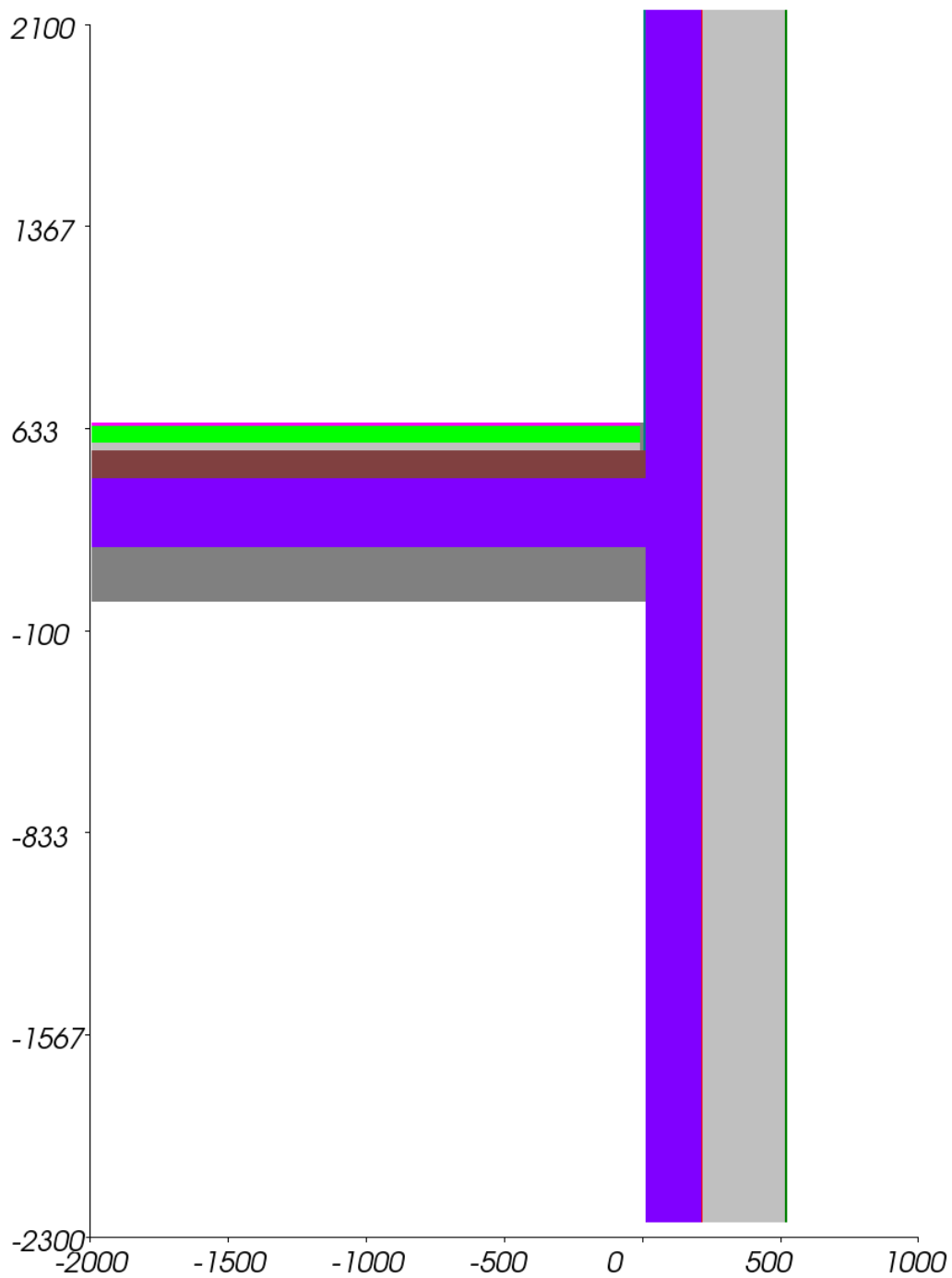


Abb. A.3: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller: Berechnungsmodell für den Anschluss Kellerdecke - Außenwand

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.

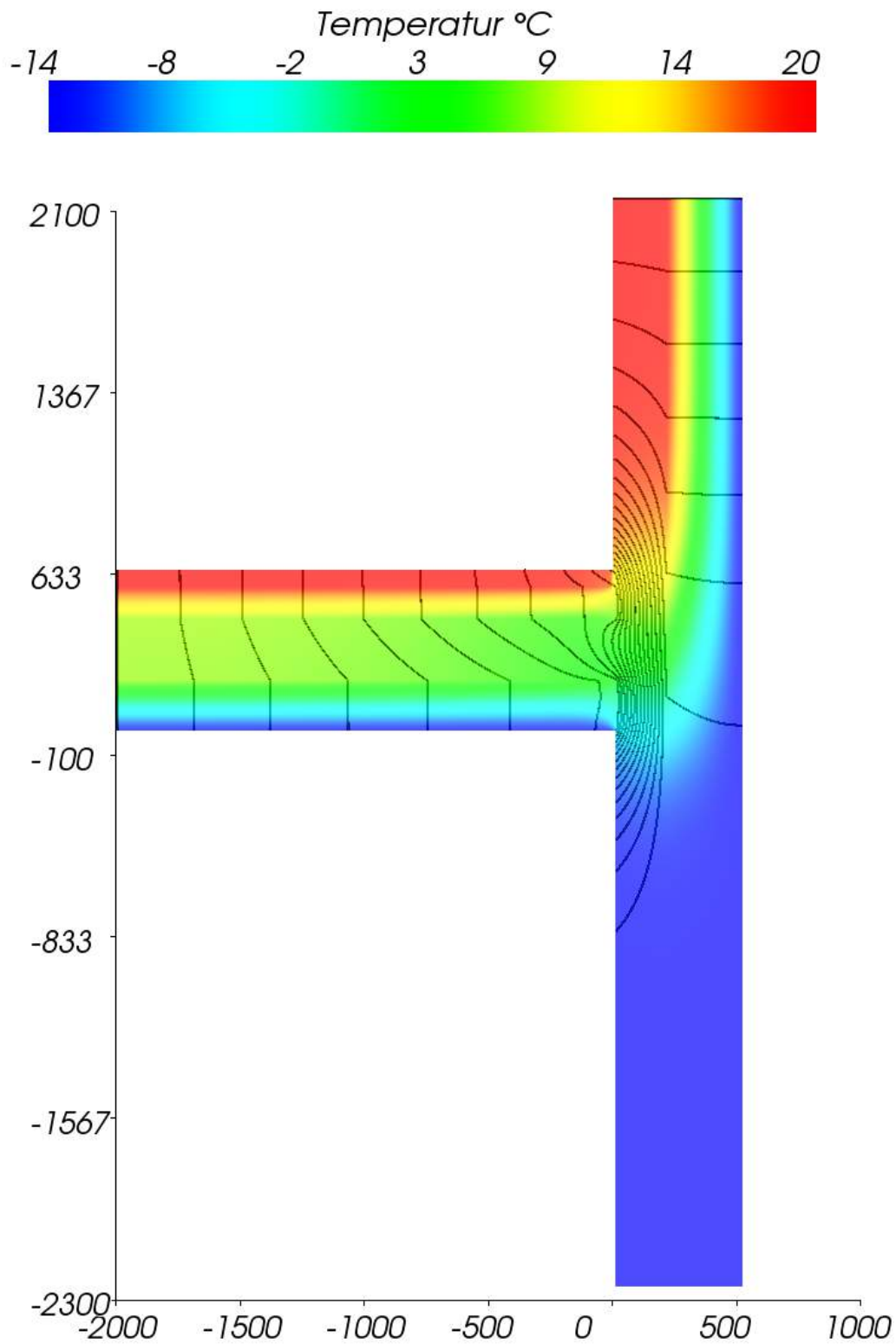


Abb. A.4: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller:
 Darstellung der Wärmestromlinien;
 Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$
 Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $-13,5^\circ\text{C}$,
 Außenluft $-13,5 \text{ }^\circ\text{C}$

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 Abbildung A.3 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.5), 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.

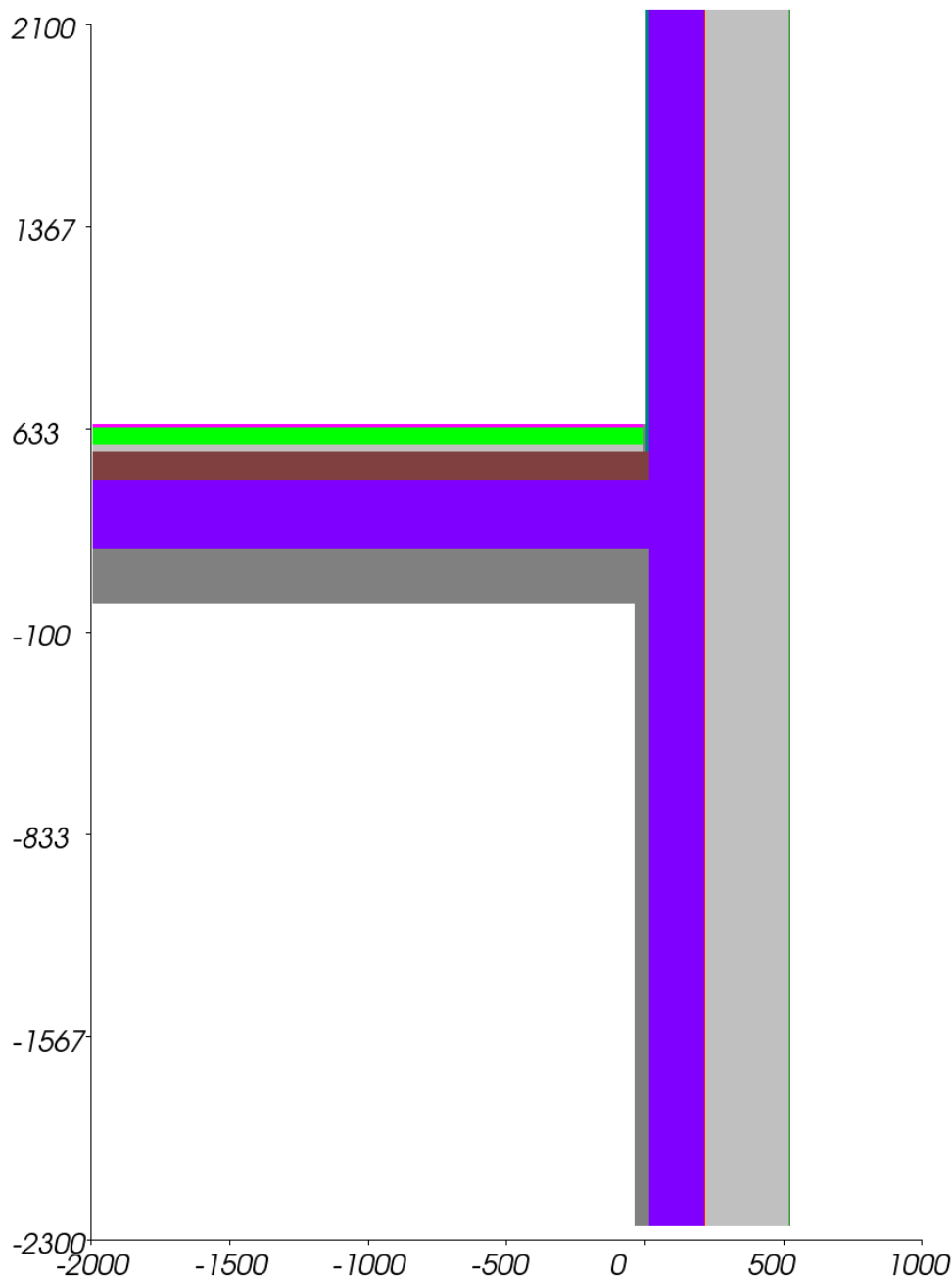


Abb. A.5: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller:
 Berechnungsmodell für den Anschluss Kellerdecke – Außenwand;
Variante 1: 5 cm Innendämmung der Kellerwand

Das Bild der Wärmestromlinien der nächsten Abbildung zeigt die Wirksamkeit der Innendämmung der Kellerwand.

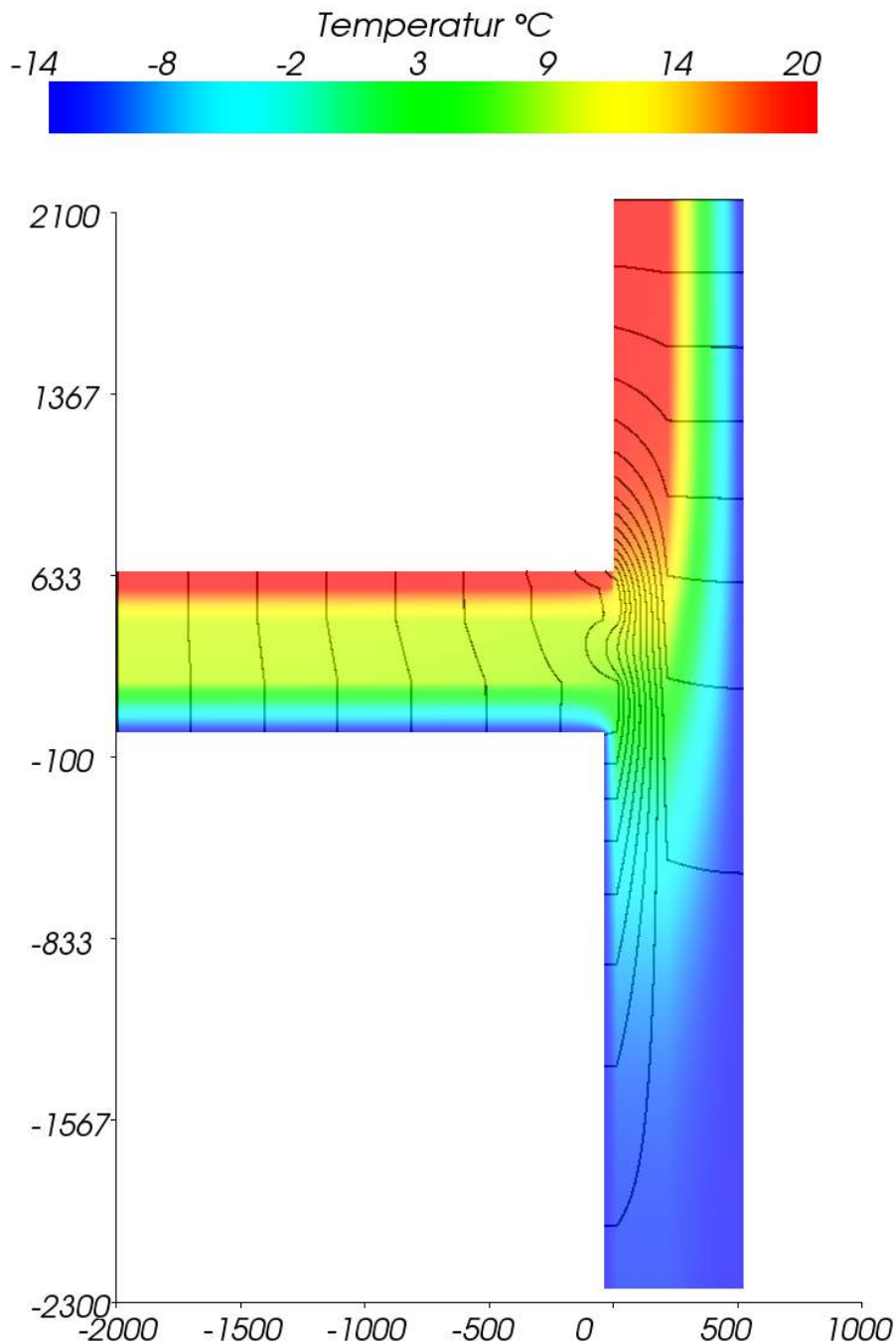


Abb. A.6: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller, Variante 1:
 Darstellung der Wärmestromlinien;
 Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$
 Variante 1: 5 cm dicke Innendämmung der Kellerwand
 Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $-13,5^\circ\text{C}$,
 Außenluft $-13,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Im Vergleich zu Abb. A.4 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 Verzichtes auf die Innendämmung der Kellerwand wie folgt.

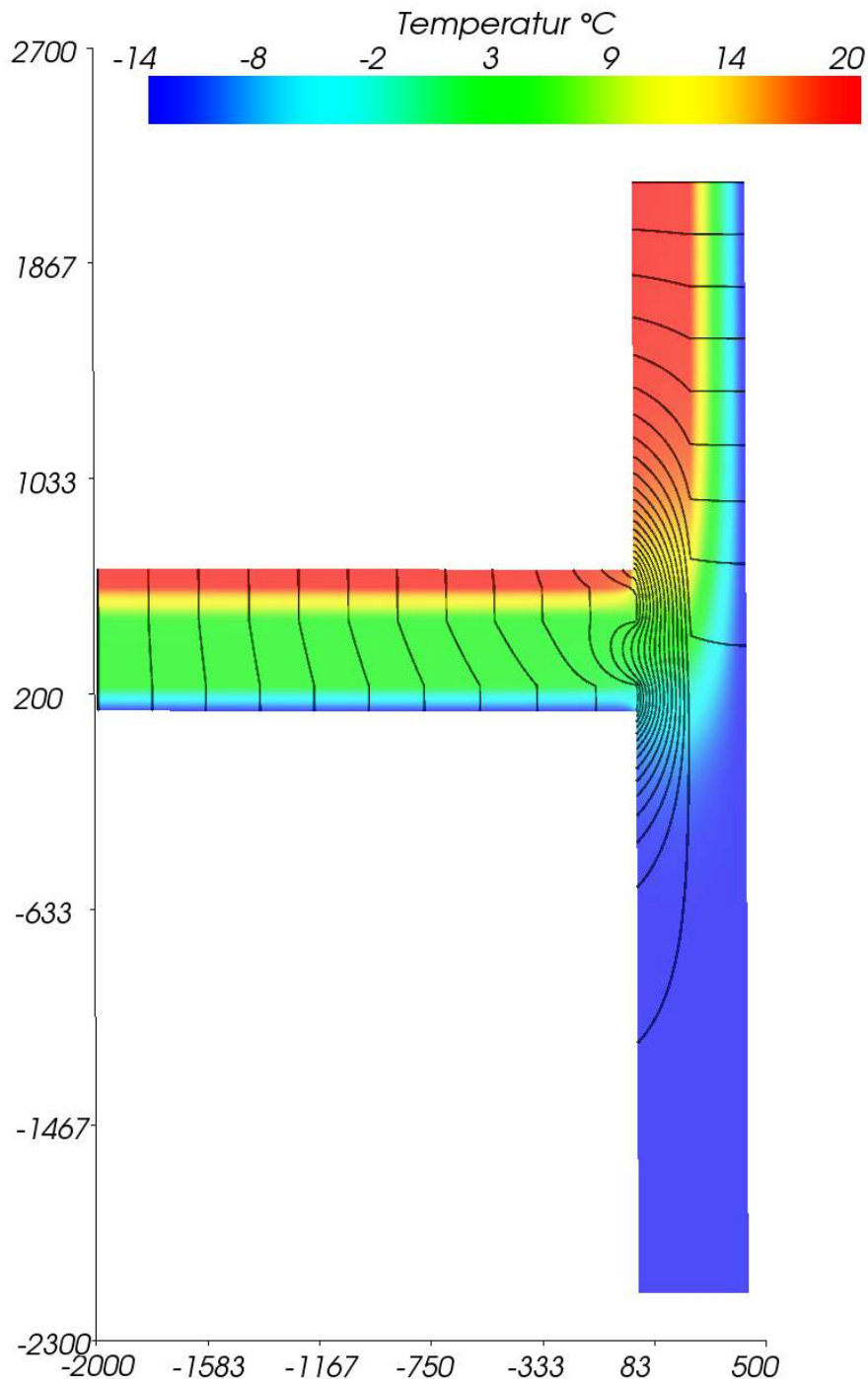


Abb. A.7: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, offener Keller:

Darstellung der Wärmestromlinien;

Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$

Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Kellerraum $-13,5 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 innenseitiger Dämmung der Kellerwand keine zu tiefen Temperaturen auftreten. Im Fall der Passivhausqualität liegt der Temperaturgewichtungsfaktor mit $f_{\text{Rsi}}^* = 0,78$ auch im Fall der Kellerwand ohne Innendämmung (V0) weit über der von der ÖNorm B8110-2 [19] gesetzten Untergrenze von 0,71. Auch im Fall der Niedrigenergiehausqualität (V0) ist der Bauteilanschluss mit $f_{\text{Rsi}}^* = 0,74$ 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 gegenüber gestellt wird. Im Fall des Passivhaus-Standards beträgt der Leitwert der Kellerdecke d. h. des Fußbodens des Modellraums

$$L_f = U_f \cdot A_f = 0,10 \cdot 43,343 = 4,334 \text{ WK}^{-1} \quad , \quad (\text{A.1})$$

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 Länge¹⁴ zu

$$\Delta L = \psi \cdot l = 0,321 \cdot 13,167 = 4,227 \text{ WK}^{-1} \quad . \quad (\text{A.2})$$

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.3). 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) gegenüber gestellt. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der dynamischen Heizlastberechnung für eine Gebäudehülle in Passivhausqualität.

¹⁴ 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.

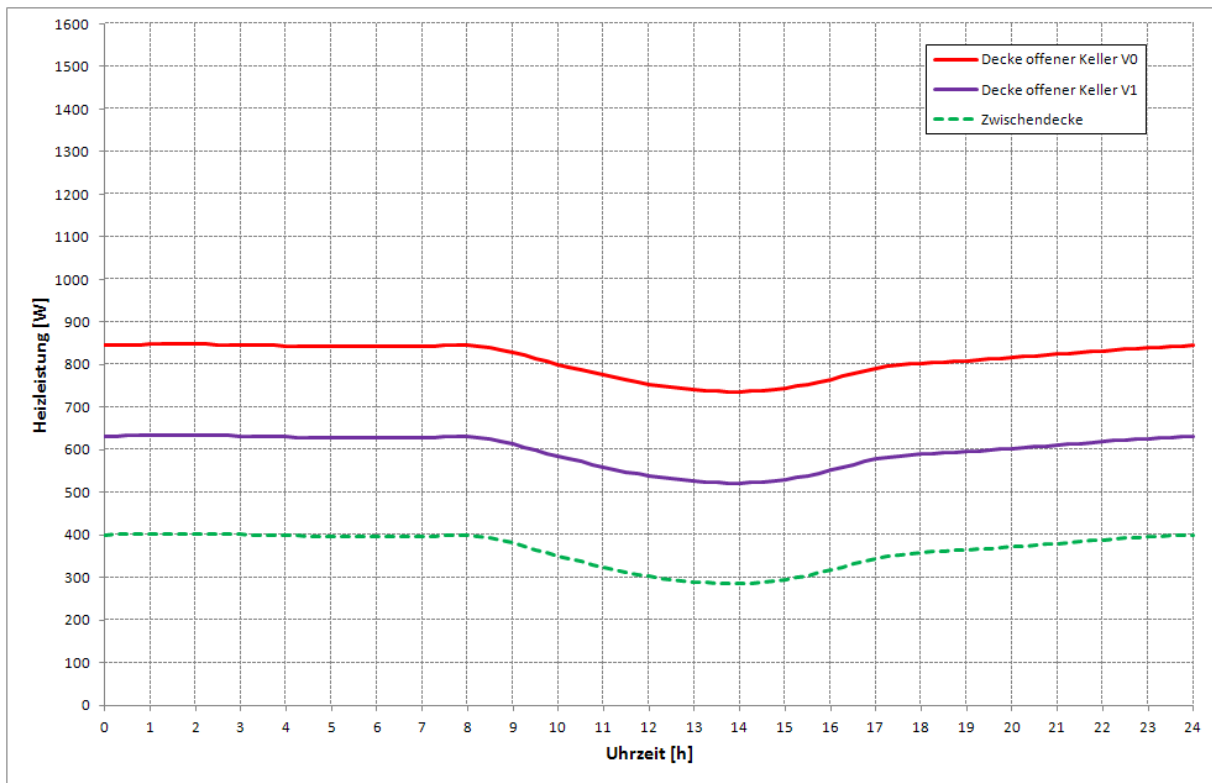


Abb. A.8: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Passivhausniveau**; Modellraum über offenem Keller
V0 ... keine Innendämmung der Kellerwand
V1 ... Kellerwand mit 5 cm innen liegender Wärmedämmung

Im Vergleich zum Modellraum im Regelgeschoß (strichlierte Linie in Abb. A.8) 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 Niedrigenergiehausniveau.

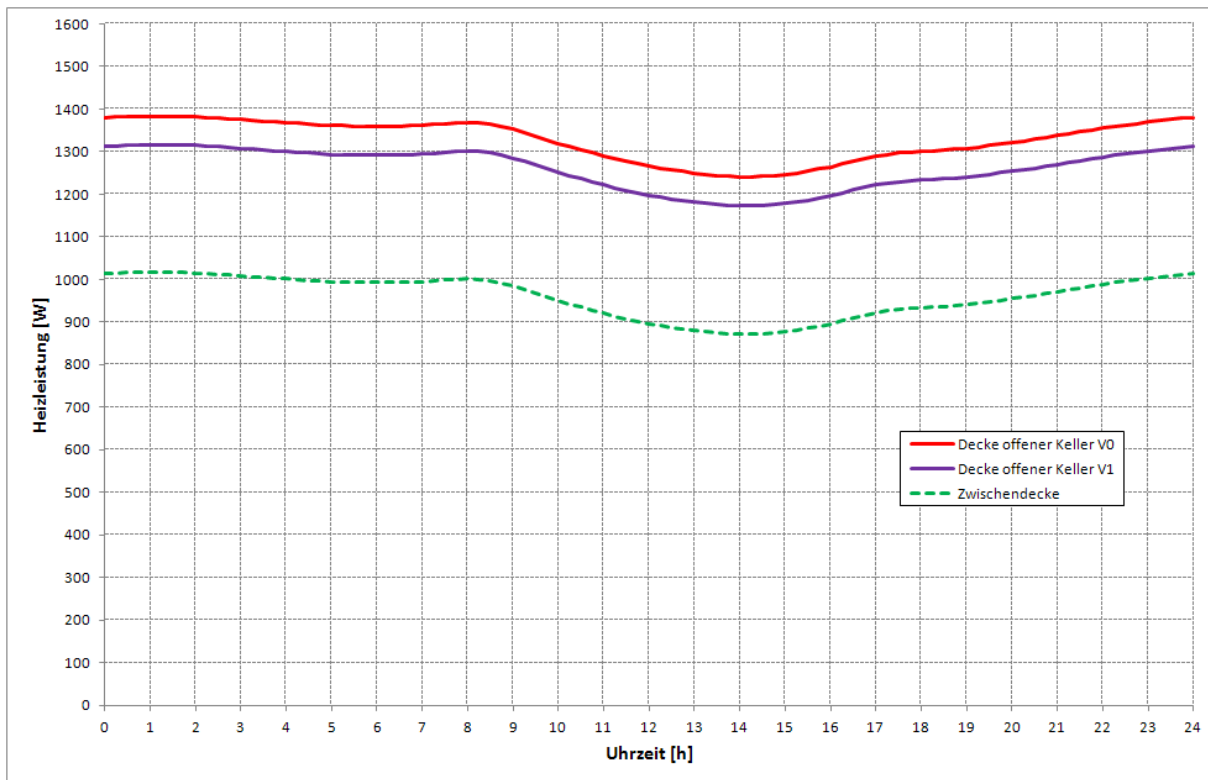


Abb. A.9: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Niedrigenergiehausniveau**; Modellraum über offenem Keller
V0 ... keine Innendämmung der Kellerwand
V1 ... Kellerwand mit 5 cm innen liegender Wärmedämmung

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.4: Für den Modellraum berechnete Heizlasten in Watt; Standort Klagenfurt

Für die Berechnung der erforderlichen Registerflächen werden die Annahmen des Abschnitts III.4 übernommen. Die Solltemperatur im Modellraum wird somit mit $\Theta_u = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, die maximal erreichbare Heizmitteltemperatur mit $\Theta_r = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 Rohrregister und Modellraum mittels Zugriff auf die Regressionskoeffizienten der Tabelle 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 Tabelle A.5 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.5: Für den Modellraum aus der Heizlast errechnete Registerflächen in m²

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 m² 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 m² 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 m². Die Verringerung des Rohrabstands allein stellt somit keine Lösung dar.

Bereits eine Erhöhung der maximalen Heizmitteltemperatur auf 31 °C genügt, um bei 10 cm Rohrabstand mit einer Registerfläche von 24,21 m² die Heizlast zu decken. Bleibt der Achsabstand der Rohre hingegen bei 15 cm, so ist eine Erhöhung der Heizmitteltemperatur auf 32 °C notwendig (Registerfläche: 23,86 m²). 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 m² angesetzte Obergrenze. Der Modellraum im EG kann somit problemlos allein über die Decke beheizt werden.

- Eine an der Kellerwand innen aufgebrauchte 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. $1,5 \text{ m}^2$.

VII.2.1.2 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 aufgebrauchten 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.

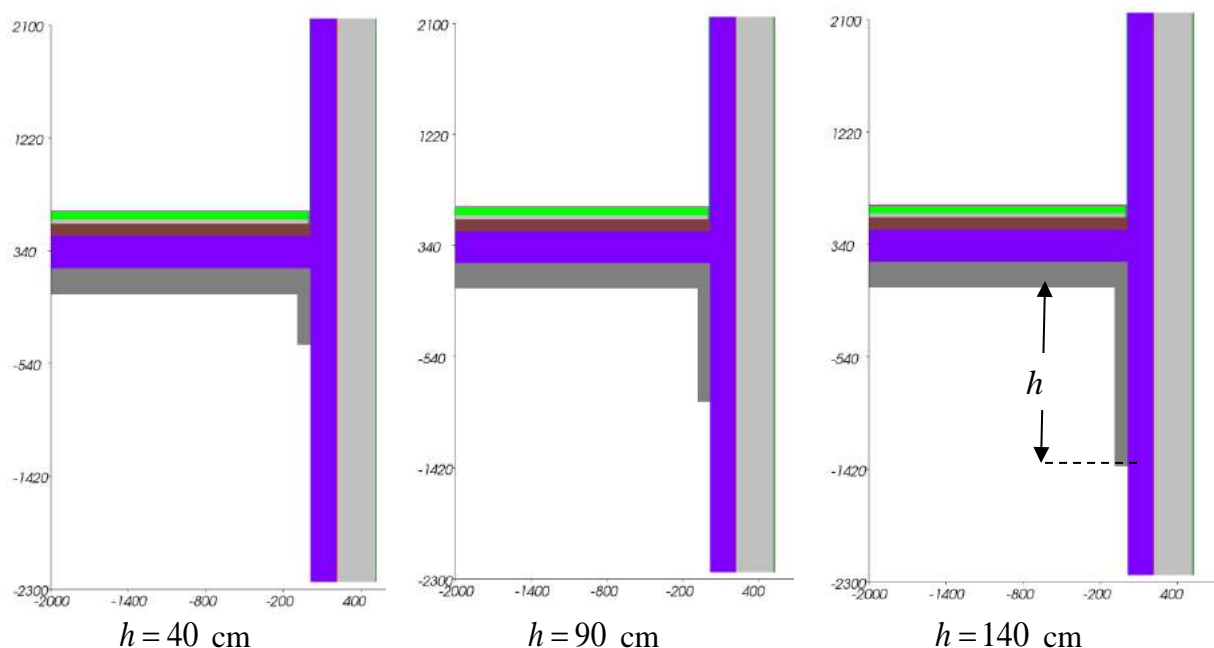


Abb. A.10: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage
Berechnungsmodelle für verschiedene Höhen der innen liegenden Dämmstoffplatte

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. Auch der Aufbau der

Kellerdecke und jener der Außenwand entsprechend in Abschnitt VII.2.1 definierten (Aufbau?)– siehe Tab. A.3.

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.

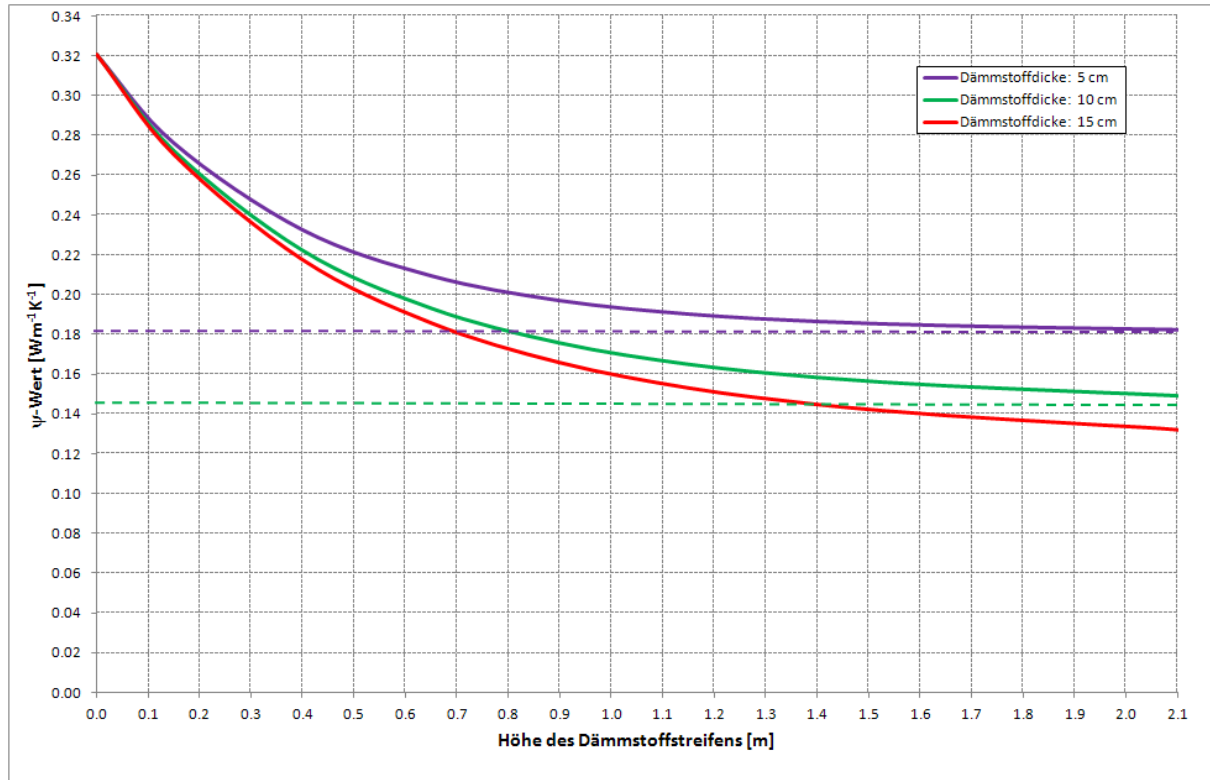


Abb. A.11: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage
Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der innenseitig auf die Kellerwand aufgetragenen Dämmstoffplatte

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.6: Vergleich der errechneten ψ -Werte; **Passivhausniveau**

Die Durchführung der entsprechenden Parameterstudie für ein Gebäude in Niedrigenergiehausniveau 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.

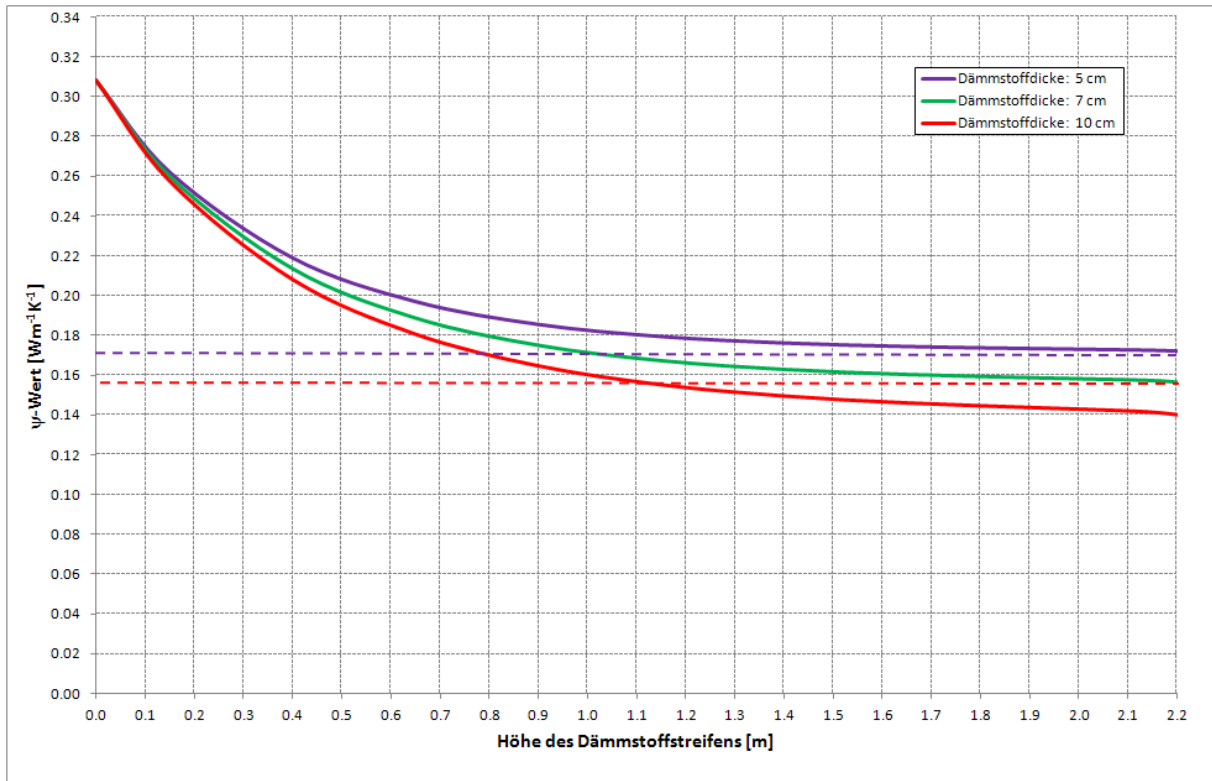


Abb. A.12: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, offener Keller / Tiefgarage
 Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der innenseitig auf die Kellerwand aufgetragenen Dämmstoffplatte

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 [Wm ⁻¹ 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.7: 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.

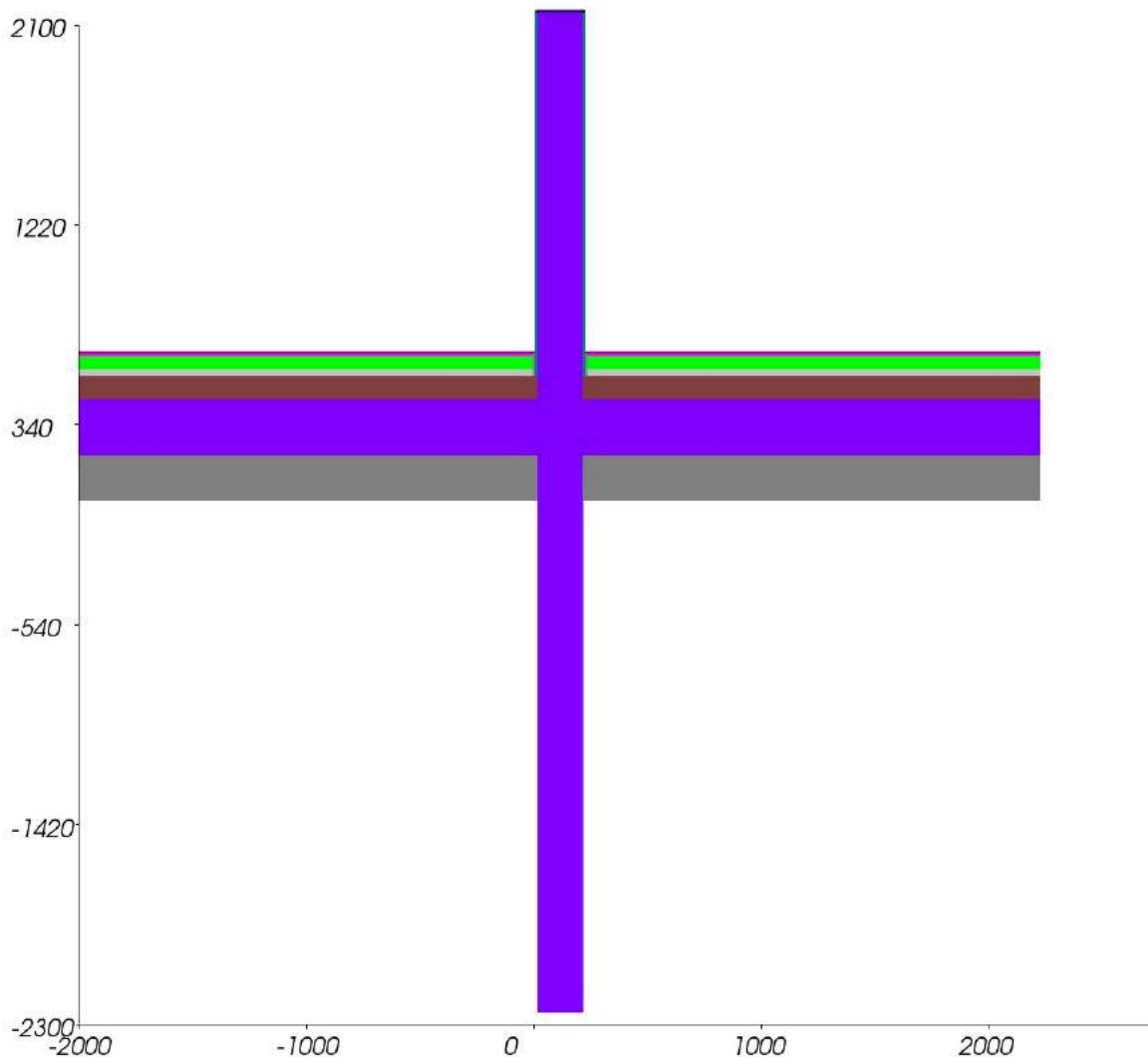


Abb. A.13: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage:
Berechnungsmodell für den Anschluss Kellerdecke – Innenwand

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 gleich gesetzt wird. Die folgende Abbildung zeigt als Ergebnis der zweidimensionalen Berechnung ein Falschfarbenbild mit eingezeichneten Wärmestromlinien für das in Abb. A.13 gezeigte Modell.

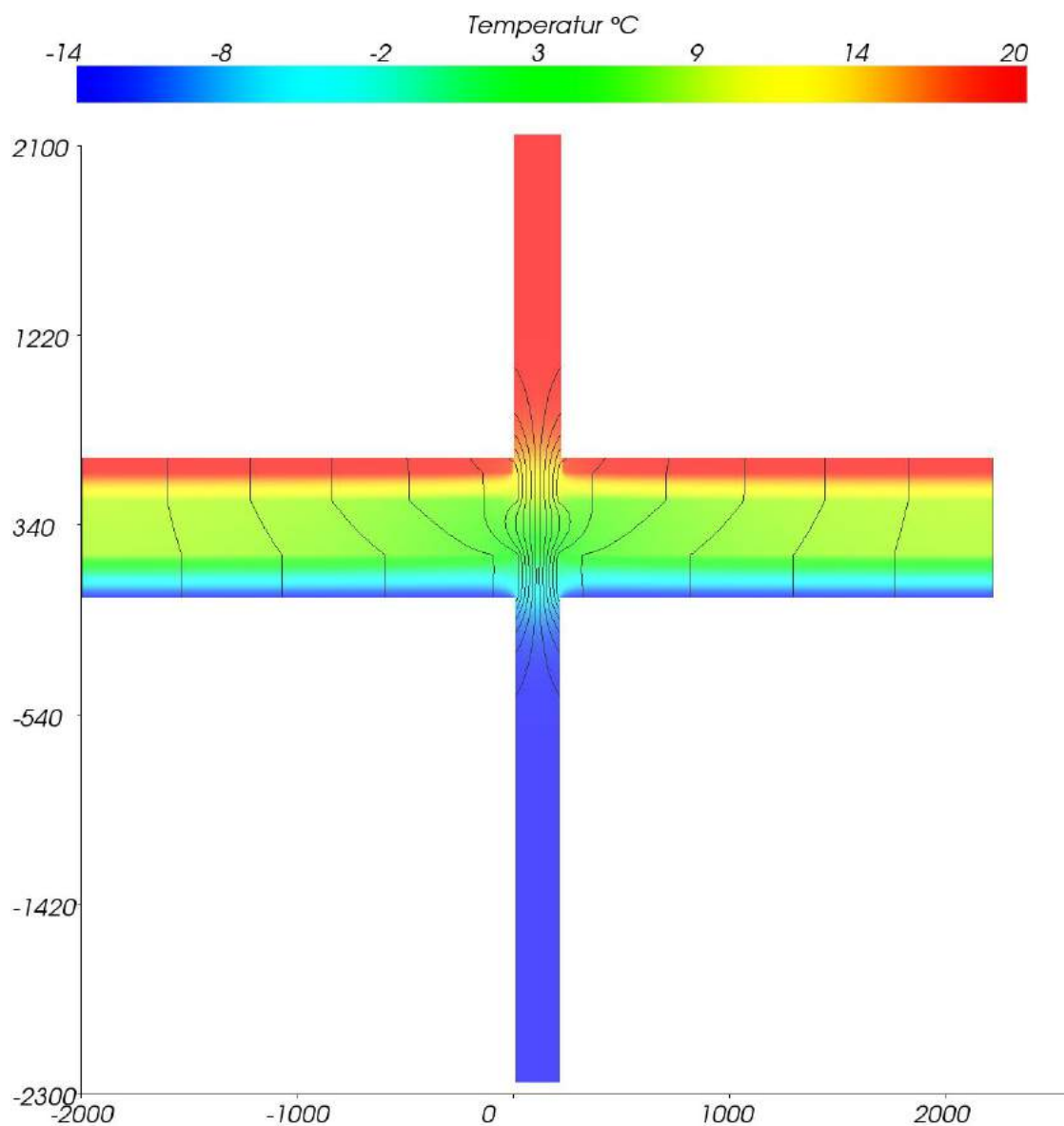


Abb. A.14: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage:

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 durchgeführt. Natürlich wird hierbei angenommen, dass die Dämmstoffplatte an beiden Seiten der Betonscheibe angebracht wird – siehe die folgende Abbildung.

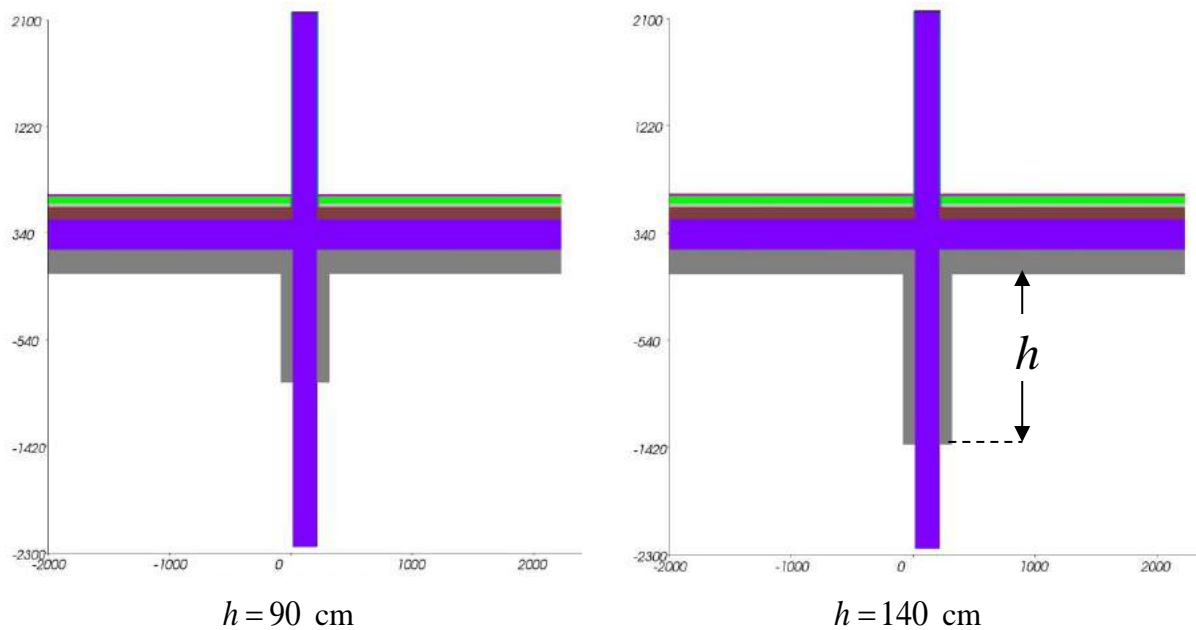


Abb. A.15: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage / Innenwand:
Berechnungsmodelle für verschiedene Höhen der beiden Dämmstoffplatten

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.

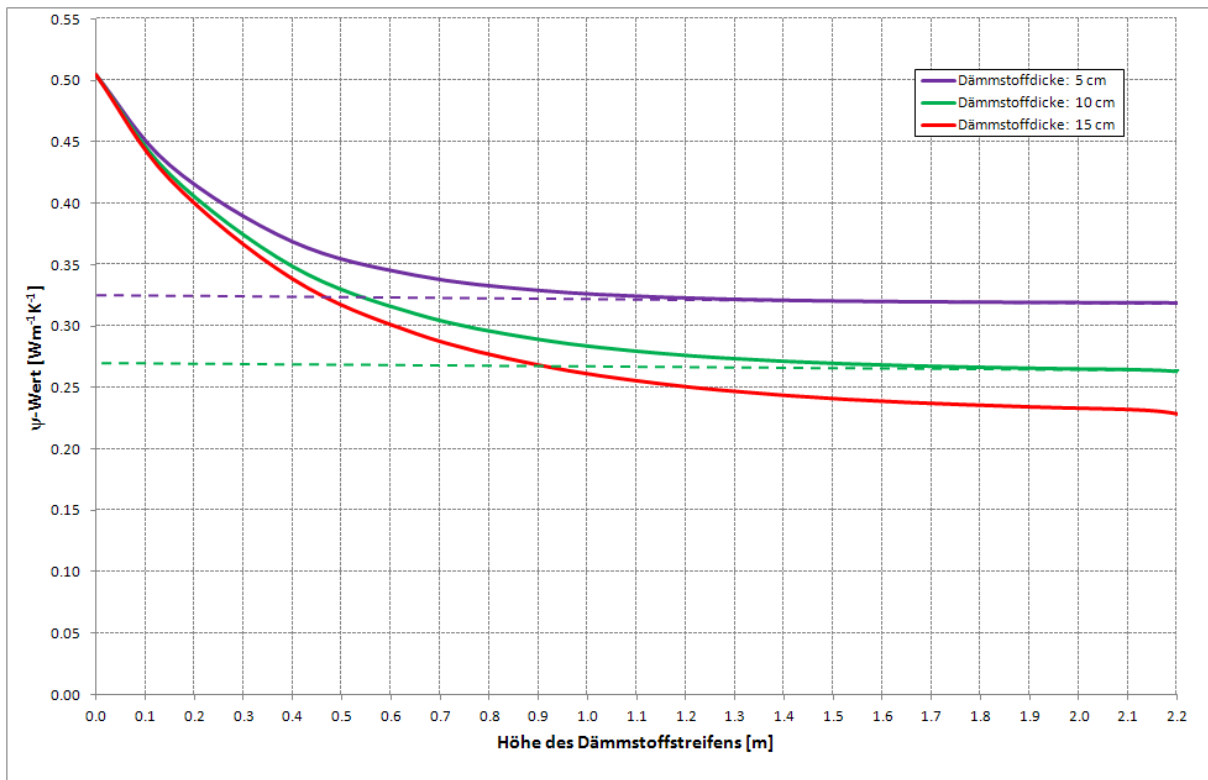


Abb. A.16: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, offener Keller / Tiefgarage / Innenwand:
Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der innenseitig auf die Innenwand beiderseitig aufgetragenen Dämmstoffplatte

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: $\lambda_i = 0,031 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) wärmedämmt 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.

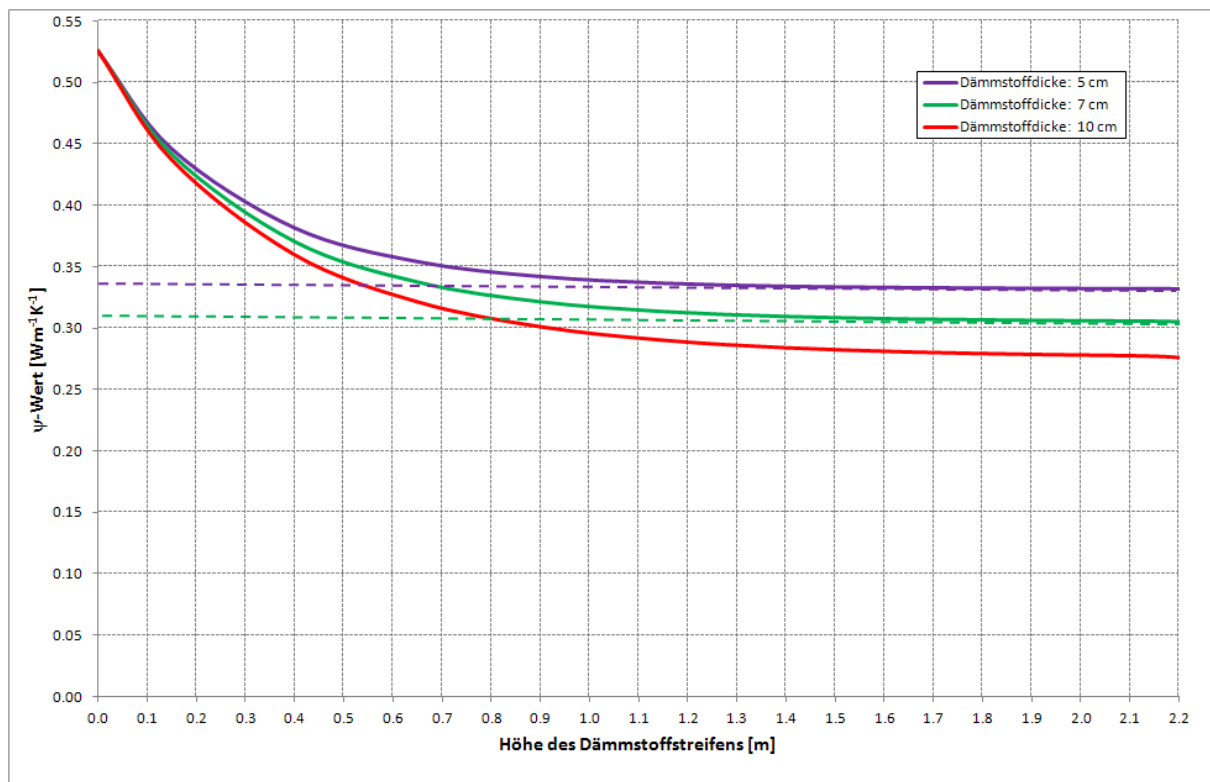


Abb. A.17: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, offener Keller / Tiefgarage / Innenwand: Abhängigkeit des ψ -Werts von Höhe und Dicke der auf die Innenwand beiderseitig aufgetragenen Dämmstoffplatte

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.

Abbildung A.17 zeigt zudem, dass bereits die kleine Erhöhung der Dämmstoffdicke von 5 cm auf 7 cm eine deutliche Reduzierung der Höhe des Dämmstoffstreifens bei gleich bleibender 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 bringt eine Reduktion der Plattenhöhe auf 50 cm nur unwesentlich höheren Wärmeverlust.

Die Wirkung einer vollflächigen Dämmung mit 7 cm Plattendicke (grüne, strichlierte Linie) lässt sich gemäß Abb. A.17 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 VII.2.1.1 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 wärmedämmend 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 Dämmfordernisse 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.

VII.2.1.3 *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 [20] 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 Kellers¹⁵ ist der Korrekturfaktor für die Temperaturdifferenz mit $f_{i,h} = 0,5$ festgesetzt.

Die von der ÖNorm B8110-6 [20] angenommene Lufttemperatur im Keller Θ_k errechnet sich gemäß

$$\Theta_k = \Theta_i - f_{i,h} \cdot (\Theta_i - \Theta_e) \quad . \quad (A.3)$$

¹⁵ 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 $\Theta_e = -13,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ergibt sich bei einer Solltemperatur im Modellraum von $\Theta_i = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ somit eine Kellertemperatur von $\Theta_k = +3,25 \text{ }^\circ\text{C}$.

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 [20] 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 U-Wert der Kellerdecke von $0,20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 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).

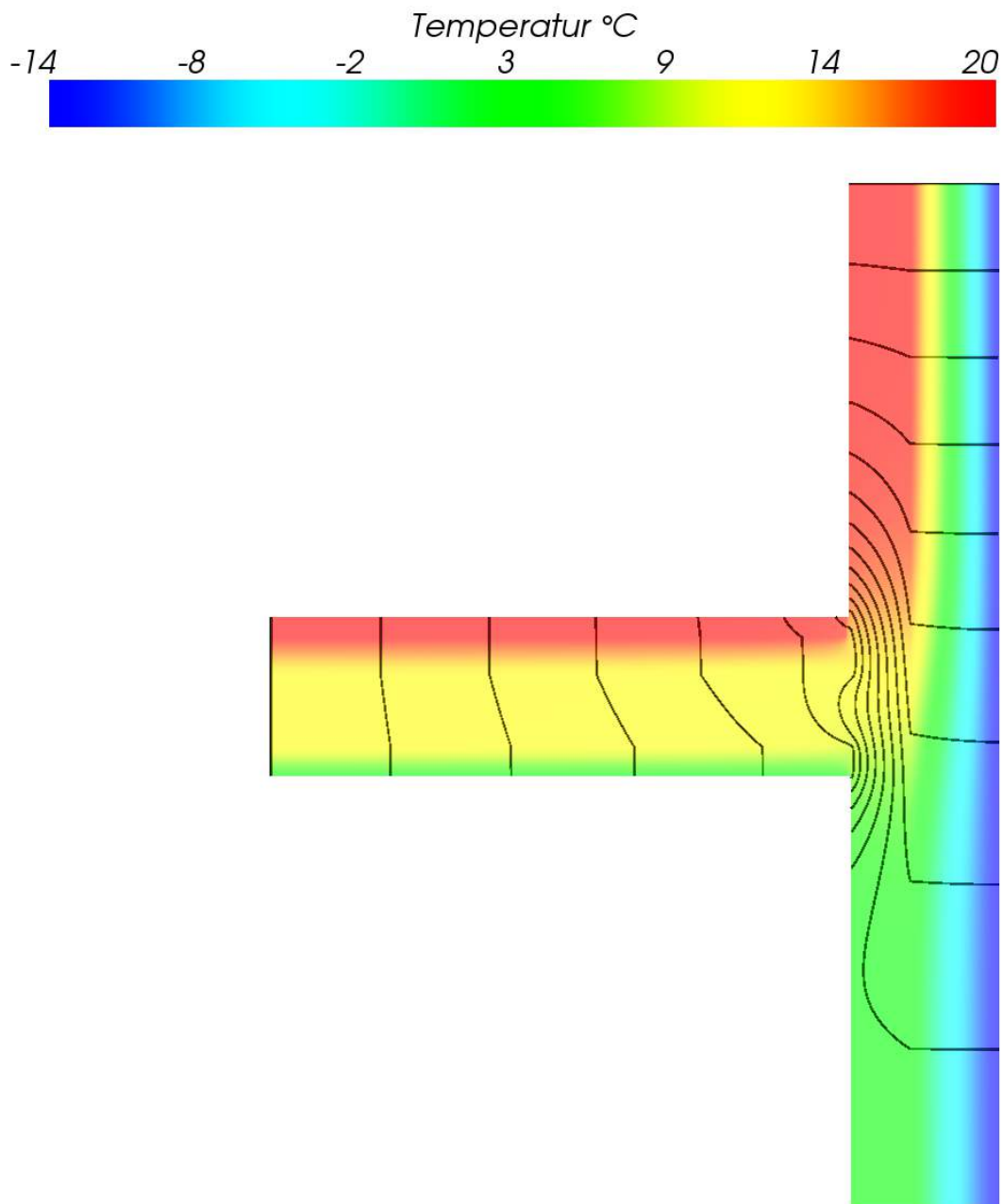
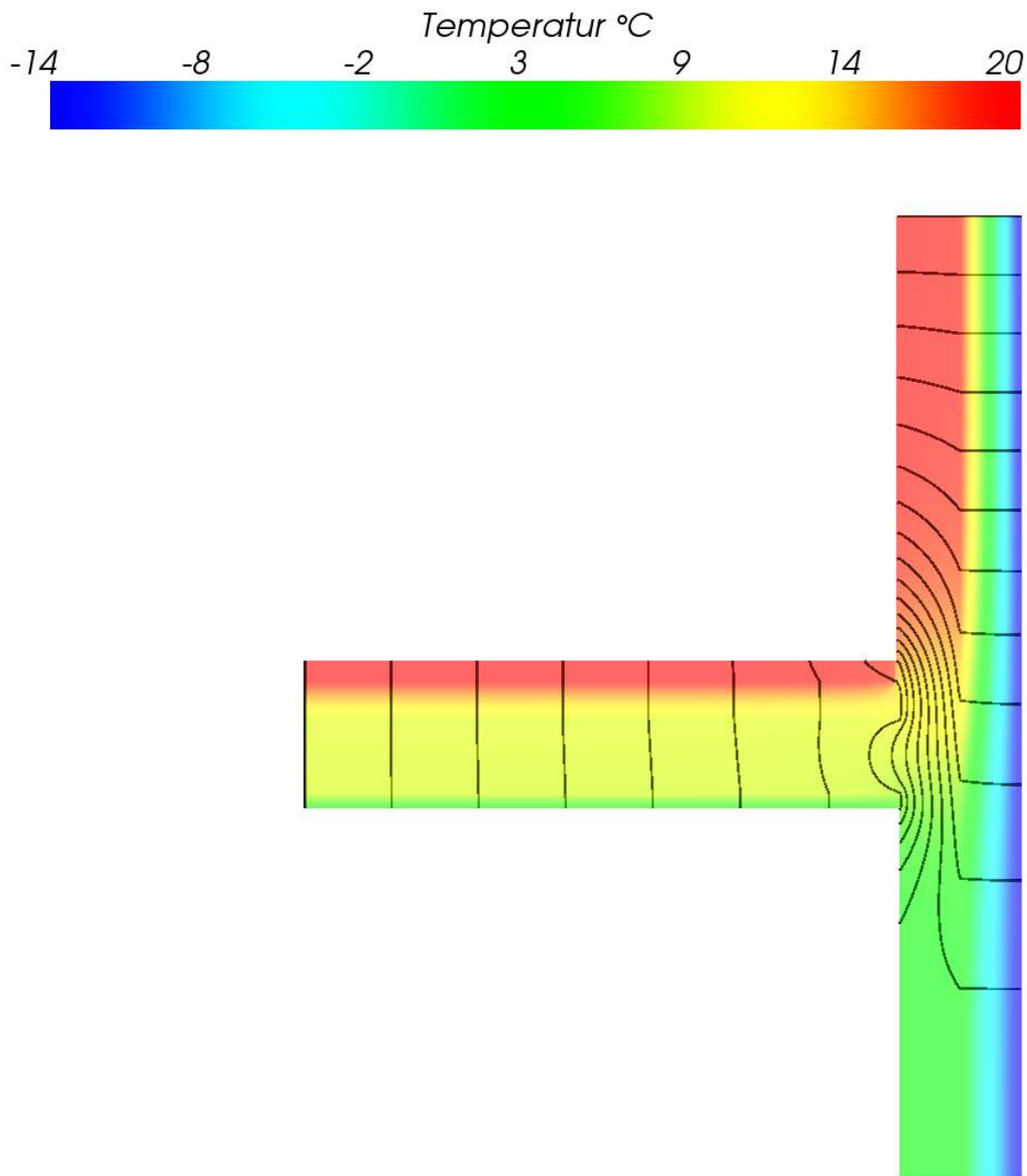


Abb. A.18: unterkellertes Gebäude, Passivhausniveau, geschlossener Keller, Variante 0:
 Darstellung der Wärmestromlinien;
 Wärmestrom zwischen je 2 Wärmestromlinien: $1,0 \text{ Wm}^{-1}$
 Angenommene Lufttemperaturen: Modellraum 20 °C , Kellerraum $+3,25 \text{ °C}$,
 Außenluft $-13,5 \text{ °C}$



AnTherm V.7.126 2014.10.01 © M.Kornicki www.kornicki.com

Abb. A.19: unterkellertes Gebäude, Niedrigenergiehausniveau, geschlossener Keller; Var. 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 $-13,5 \text{ °C}$

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 [21] - 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. die Abbildungen A.3 und A.5) 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 beliebige gewählte Temperaturkombinationen errechnet werden:

$$\Phi = L_{i,e} \cdot (\Theta_i - \Theta_e) + L_{i,k} \cdot (\Theta_i - \Theta_k) \quad . \quad (\text{A.4})$$

Die folgende Tabelle zeigt die für das Einsetzen in Gleichung (A.4) benötigten, von AnTherm [22] berechneten längenbezogenen, thermischen Leitwerte.

	$L_{i,e}$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$L_{i,k}$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
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.8: Von Programmpaket AnTherm [22] 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.9: 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 [22] 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.

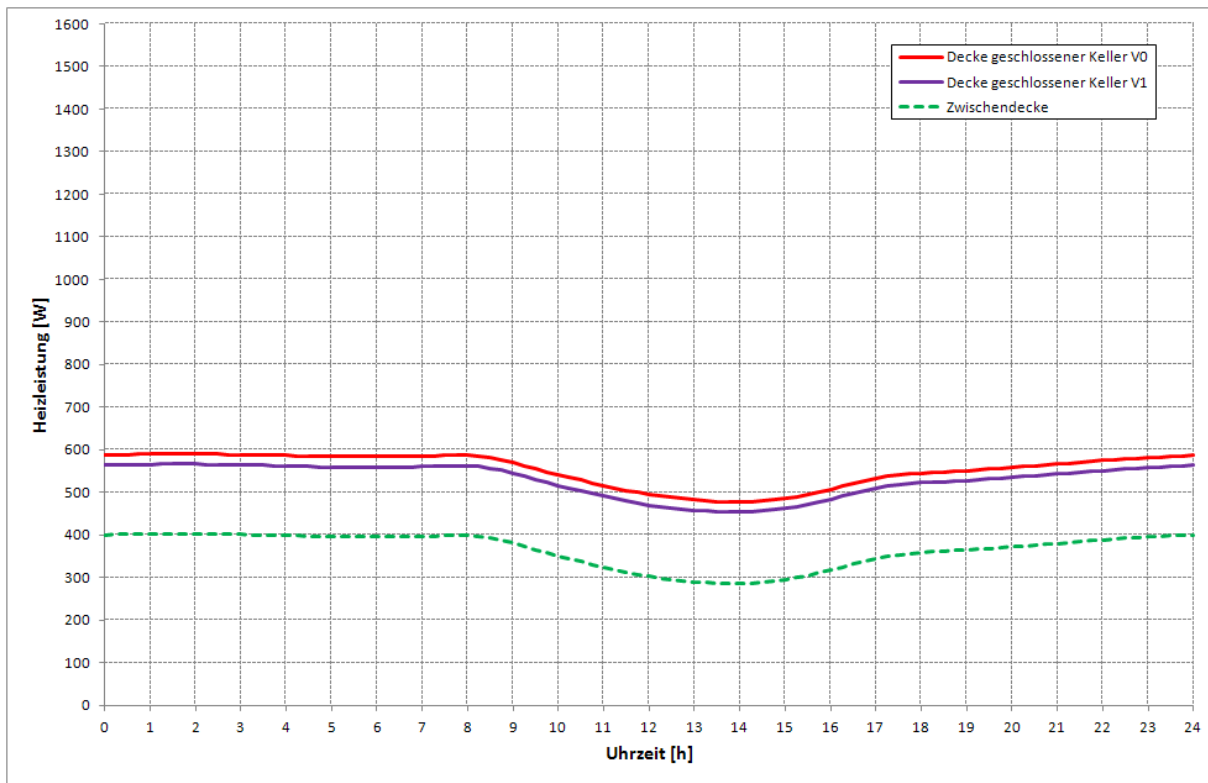


Abb. A.20: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Passivhausniveau**; Modellraum über geschlossenem Keller

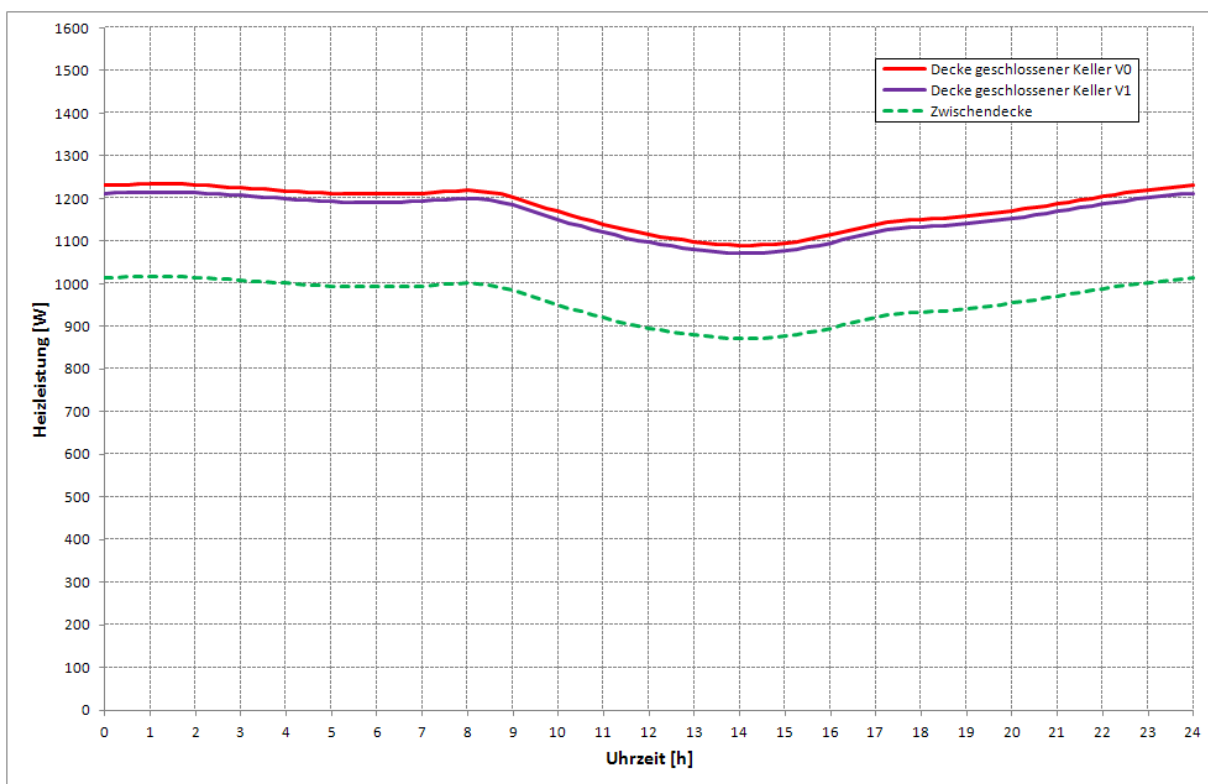


Abb. A.21: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Niedrigenergiehausniveau**; Modellraum über geschlossenem Keller
 V0 ... keine Innendämmung der Kellerwand
 V1 ... Kellerwand mit 5 cm innen liegender Wärmedämmung

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.10: 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 Tabelle A.11 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.11: 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 angenommen, 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.

VII.2.2 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 [23] 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.12: 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 abgedämmt ist. Der in folgender Abbildung dargestellte Vertikalschnitt durch den Modellraum zeigt exemplarisch die Art des modellierten Aufbaus.

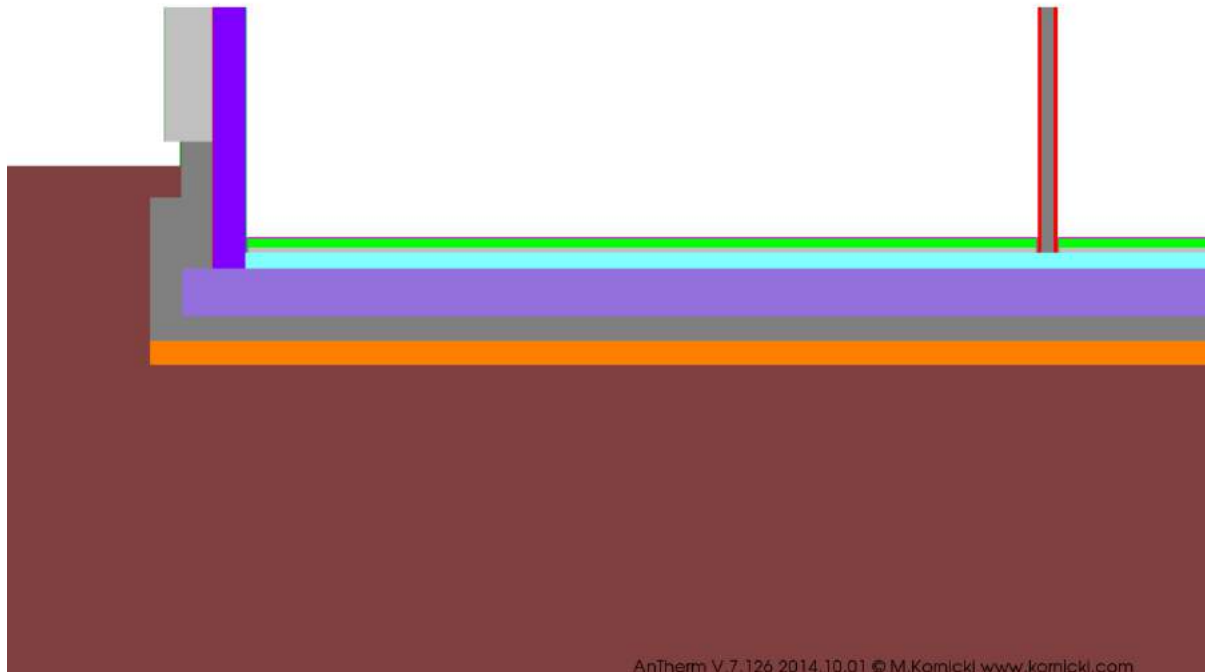


Abb. A.22: Ausschnitt aus dem mit Programm AnTherm [22] erzeugten Berechnungsmodell; Vertikalschnitt durch die Fundamentplatte in Ost-West-Richtung

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“ [24] 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 [21] entsprechend gewählt.

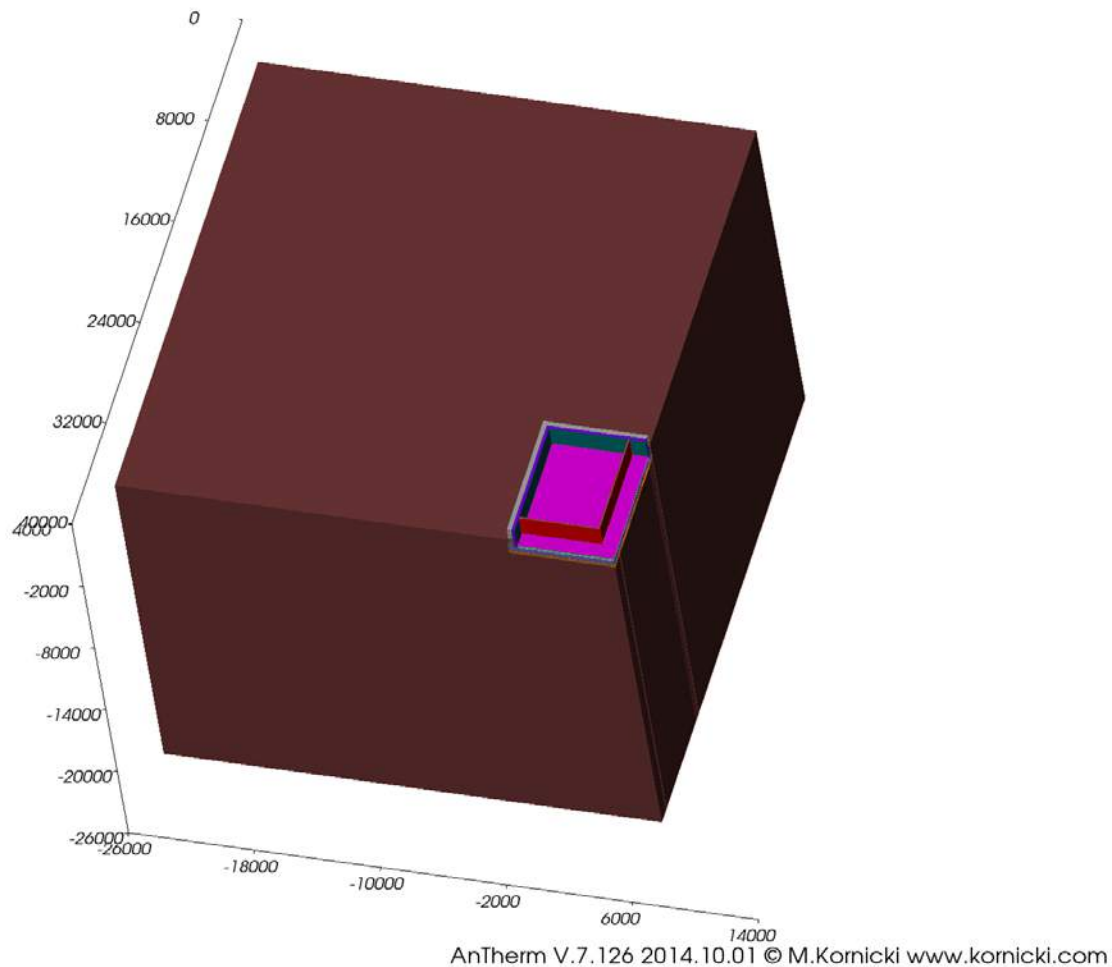


Abb. A.23: Dreidimensionales, mit Programm AnTherm [22] erzeugtes Berechnungsmodell: Modellraum in der Gebäudekante, EG; Maße in mm

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 [17] entnommen und der Jahresverlauf mittels Fourier-Kontinuierung [25] 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 [22] die Matrizen harmonischer thermischer Leitwerte errechnet. Neben der stationären Leitwert-Matrix erweist es sich hierbei als ausreichend, mit 6 Harmonischen zu rechnen. Im zweiten Schritt wird mit Programmpaket THESIM [26] 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.

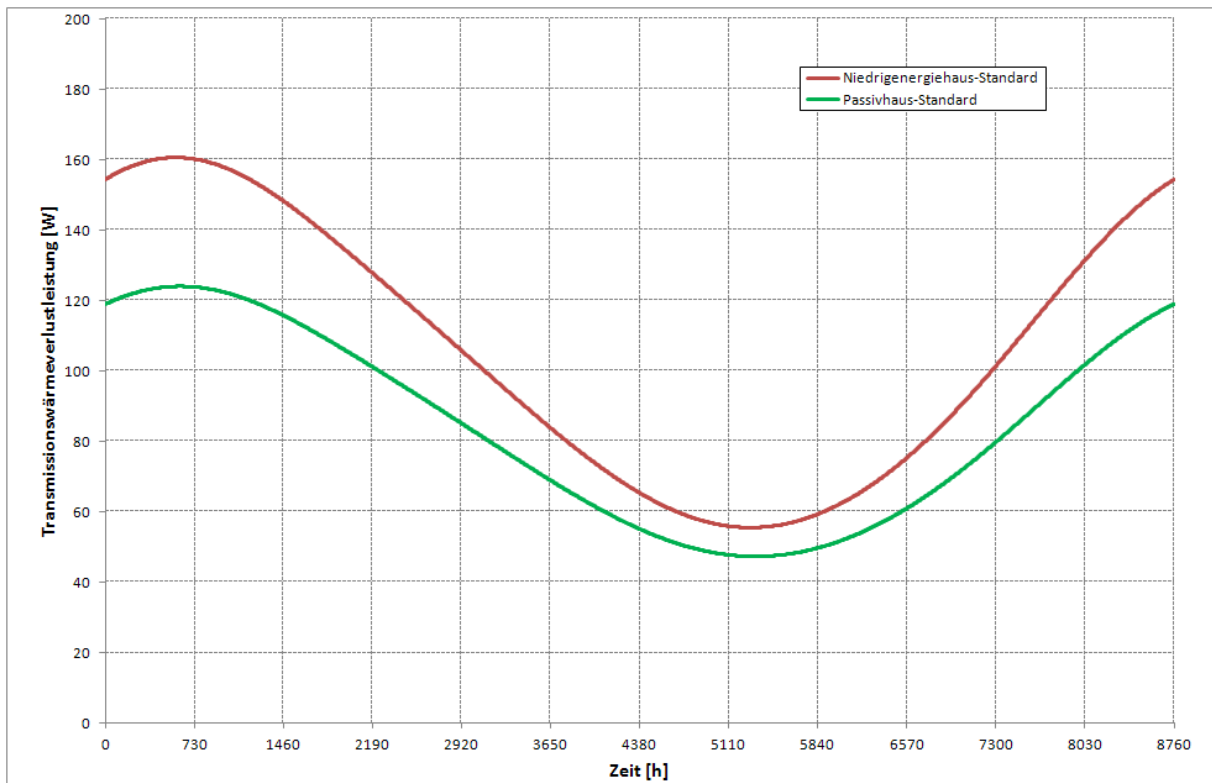


Abb. A.24: Mit AnTherm [22] und THESIM [26] errechnete Jahresverläufe der Wärmeverlustleistung

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 $-13,5\text{ °C}$ Tagesmittelwert durchgeführt. Für die Wärmeverlustleistung über die Fundamentplatte wird der Monatsmittelwert für Januar, wie er aus Abb. A.24 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.

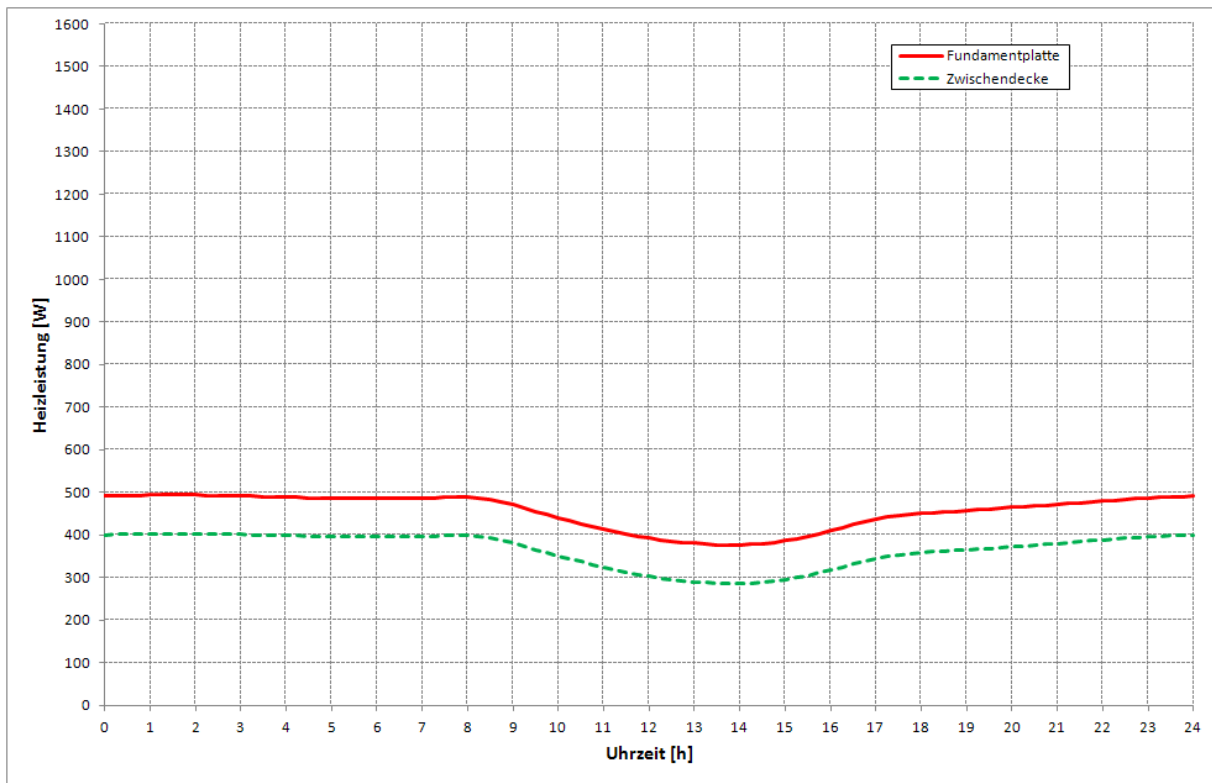


Abb. A.25: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Passivhausniveau**; Modellraum über Fundamentplatte

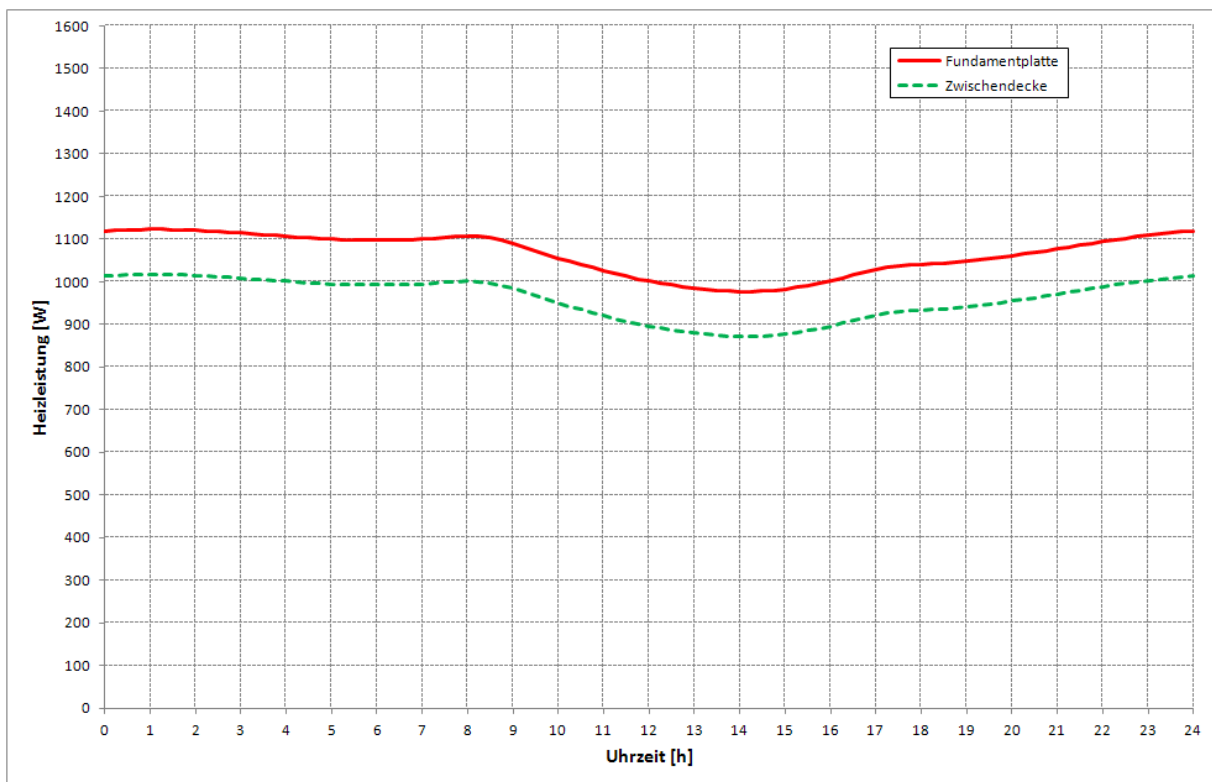


Abb. A.26: Errechnete Tagesverläufe der Heizleistung unter Auslegungsbedingungen für Klagenfurt **Niedrigenergiehausniveau**; Modellraum über Fundamentplatte

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.13: 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 Tabelle A.14 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.14: 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 wärmegeklämt 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 wärmegeklämt (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.

VII.3 Detailuntersuchung: Unterbrechung der Heiz- bzw. Kühlmittelzufuhr

Die in Kapitel II.3 („Instationäre Parameterstudien“) präsentierten Berechnungsergebnisse sollen nun insofern erweitert werden, als die Auswirkung einer Unterbrechung der Heiz- oder Kühlmittelzufuhr auf die Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke näher untersucht wird. Der Unterschied zwischen den bereits durchgeführten Berechnungen und den hier ins Auge gefassten Untersuchungen besteht darin, dass in Kapitel II.3 ein Zeitverlauf der mittleren Temperatur im Rohrregister vorgegeben wurde. Dieser Ansatz wird nun insofern verändert und damit den Fragestellungen aus der Praxis angepasst, als neben der Heiz- bzw. Kühlmitteltemperatur auch der Massenstrom des Heiz- bzw. Kühlmittels während eines gewissen Zeitintervalls innerhalb des Tages vorgegeben wird. Außerhalb dieses Zeitintervalls wird der Massenstrom auf null gesetzt und somit eine Heizungs- bzw. Kühlungsunterbrechung simuliert.

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 (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 konstant ist. Im Falle dass die Rohre des Rohrregisters die Dimension 17 x 2,0 haben und die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids im Rohr während des Betriebs konstant $0,5 \text{ ms}^{-1}$ beträgt¹⁶, ergibt sich der Massenstrom in einem Rohr zu ca. 24 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.

VII.3.1 Heizfall

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. Bei der Interpretation der im Folgenden gezeigten Ergebnisse ist zu beachten, dass die getroffene Annahme sich auf den Auslegungsfall – also auf eine Extremsituation – bezieht. Im Normalbetrieb wird die Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke deutlich niedriger liegen.

Die Länge der Heizungsunterbrechung – d. h. des Stillstands der Umwälzpumpe – wird in drei Schritten variiert: 8, 12 und 16 Stunden. Um die Ergebnisse leichter vergleichbar zu

¹⁶ Diese Annahmen werden für alle folgenden Berechnungen getroffen und nicht geändert.

machen, wird der Zeitpunkt des Ausschaltens der Pumpe mit 6⁰⁰ früh für alle Berechnungsvarianten konstant gehalten.

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

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.

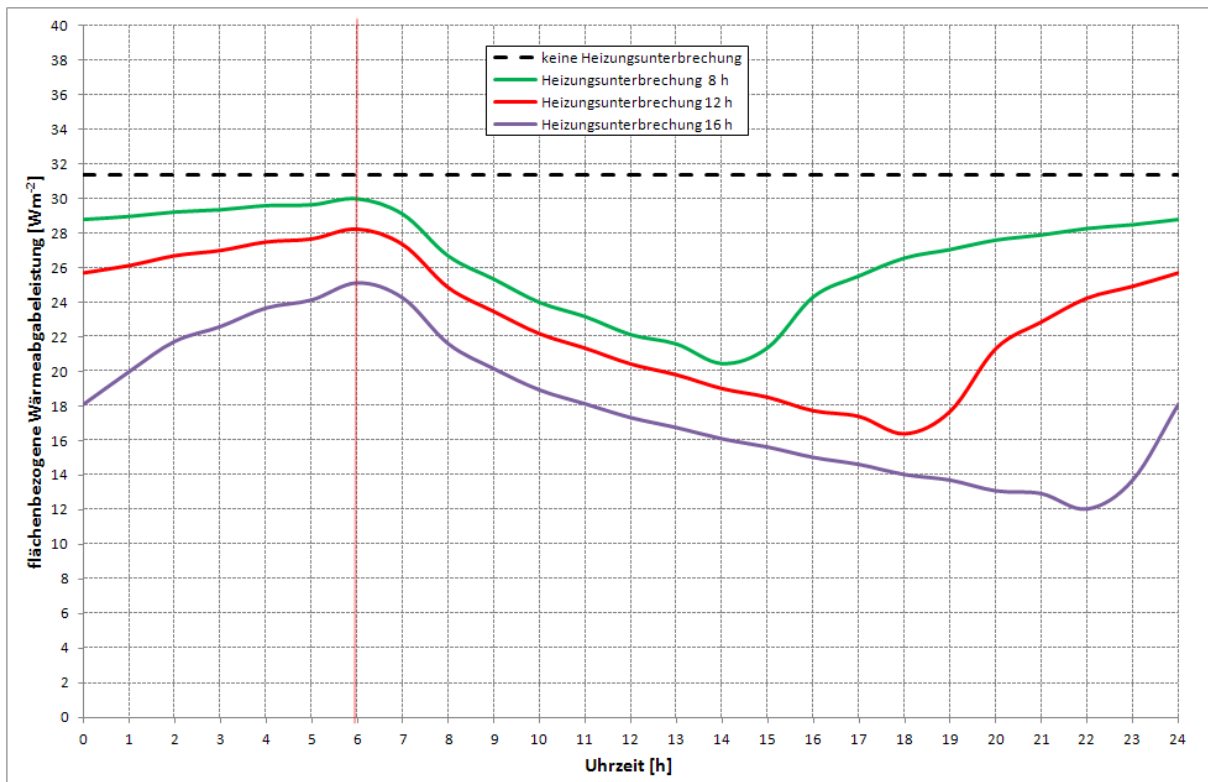


Abb. A.27: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei nicht durchlaufender Umwälzpumpe

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. A.27) und wird in den untersuchten Fällen der Heizungsunterbrechung nicht erreicht.

Anmerkung: Da im Gegensatz zu den Untersuchungen von Abschnitt II.3 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 Wärmemenge¹⁷ ergibt sich durch Integration der in Abb. A.27 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 ohne Heizungsunterbrechung ausgewiesen.

Heizungsunterbrechung [h]	flächenbezogene Wärmemenge [Whm^{-2}]	
0	752,8	100%
8	634,8	84%
12	548,1	73%
16	433,6	58%

Tab. A.15: 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.

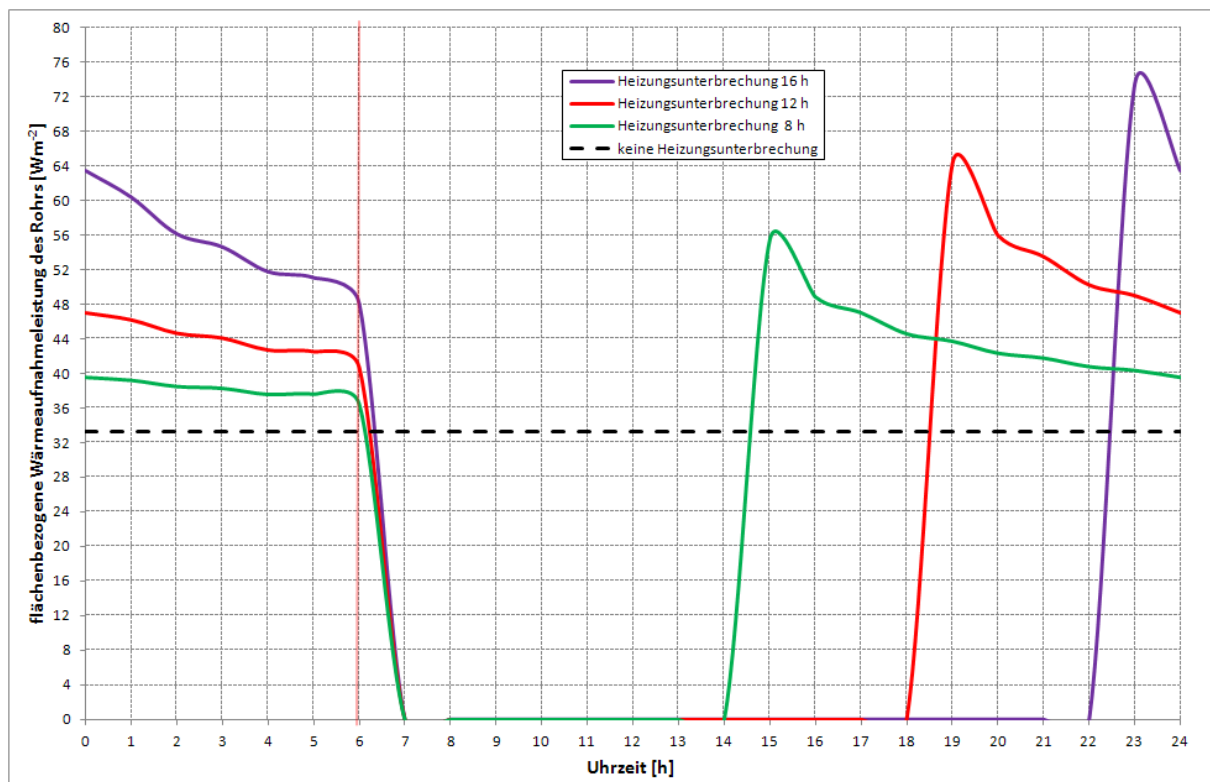


Abb. A.28: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung des Heizmittels an das Rohrregister bei unterschiedlicher Dauer der Heizungsunterbrechung

¹⁷ Die Wärmemenge ist auf die Registerfläche bezogen.

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 Wiederanlaufen der Pumpe ist die Differenz zwischen Heizmitteltemperatur und Oberflächentemperatur an der Rohrinneenseite größer als im Fall ohne Heizungsunterbrechung. Es wird somit deutlich mehr Wärme an das Rohrregister übertragen – siehe Abb. A.28.

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 (3) zu berechnen.

$$\bar{\Theta}_{s,u} = \Theta_u + \frac{q_{r,u}}{\alpha_{s,u}} \quad (A.5)$$

$q_{r,u}$ in Gleichung (A.5) ist die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum wie sie z. B. in Abb. A.27 in ihrem Tagesverlauf gezeigt ist. Das Ergebnis dieser Berechnung bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Umwälzpumpe für eine Heizmitteltemperatur von jeweils 30 °C zeigt folgende Abbildung.

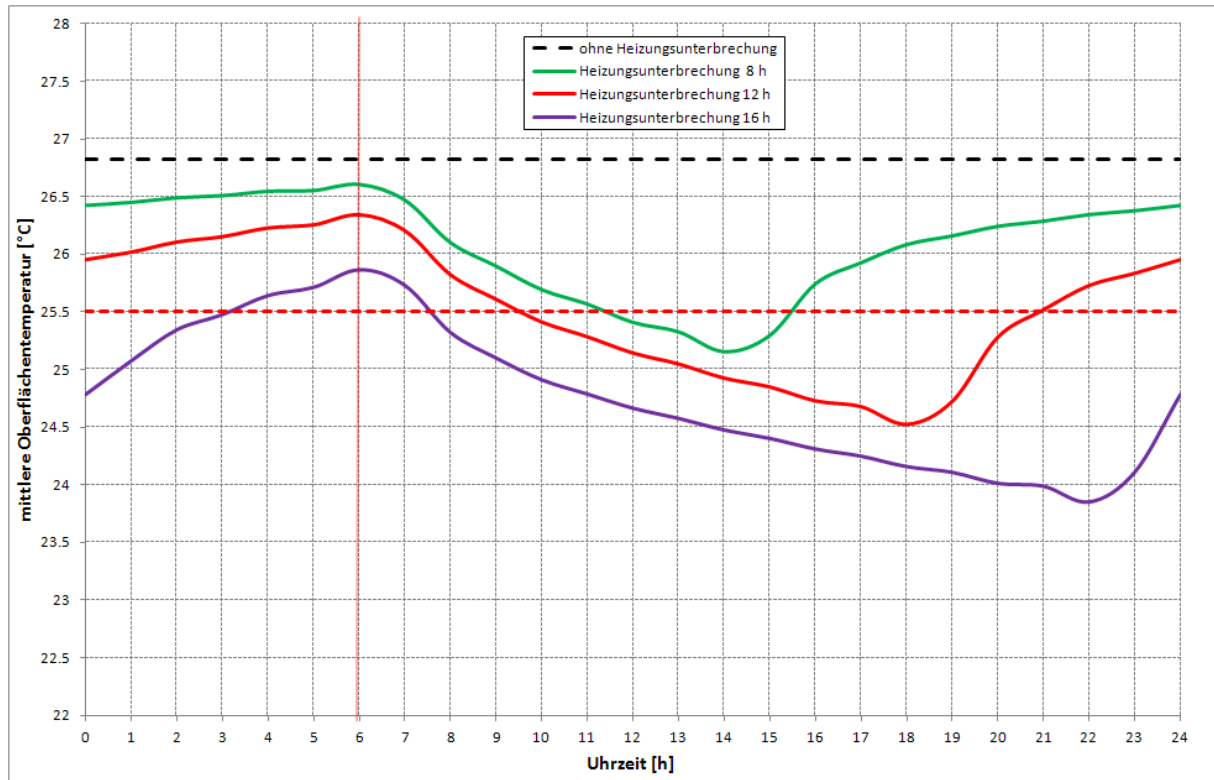


Abb. A.29: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht

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. A.29 gezeigten Temperaturverläufen muss allerdings bedacht werden, dass es sich dort um mittlere Oberflächentemperaturen handelt. Wie die Detailuntersuchung in Abschnitt II.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 25,5 °C. Diese Grenze ist in Abb. A.29 rot punktiert eingetragen.

Die 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. A.29). Im Fall einer Heizungsunterbrechung fällt die Oberflächentemperatur zeitweise unter die gesetzte Obergrenze. Bei einer Heizungsunterbrechung von 16 Stunden Dauer (lila Linie in Abb. A.29) wird die gesetzte Obergrenze nur zwischen 3⁰⁰ und 7³⁰ 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.

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

Tab. A.16: Maximal zulässige Heizmitteltemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe

Wird die errechnete maximal zulässige Heizmitteltemperatur gemäß Tab. A.16 den Simulationen zugrunde gelegt, so ergeben sich folgende Tagesverläufe der Oberflächentemperatur für die Deckenuntersicht.

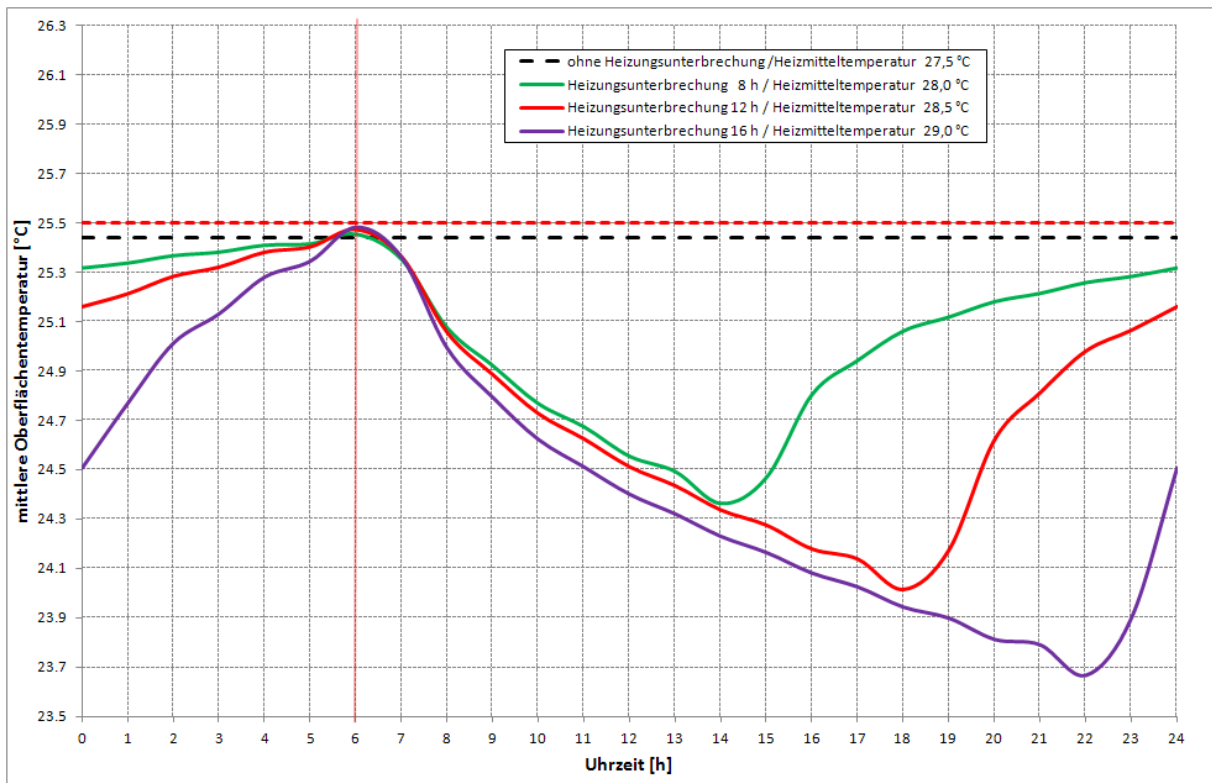


Abb. A.30: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht bei maximaler Heizmitteltemperatur

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. A.15 – führt unter diesen Annahmen auf folgendes Ergebnis.

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

Tab. A.17: 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.

Abbildung A.30 zeigt, dass auch bei unterbrochenem Heizungsbetrieb die Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht nicht zu hoch werden, sodass der Komfort im Raum nicht beeinträchtigt wird.

Abschließend wird das Verhalten einer thermisch aktivierten Decke nach einer endgültigen Abschaltung der Umwälzpumpe untersucht.

Vor der Abschaltung soll das Rohrregister permanent mit einer Heizmitteltemperatur von 27,7 °C durchströmt werden (siehe Tab. A.17). Damit wird angenommen, dass die Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke nur knapp unter dem gesetzten Maximalwert von 25,5 °C liegt. Die thermische Aktivierung wird nur dann derart betrieben werden, wenn aufgrund extremer außenklimatischer Bedingungen die Auslegungsleistung der Decke abgerufen werden muss. Im Folgenden wird somit das Auskühlverhalten unter der Annahme untersucht, dass die Decke vor Abschaltung der Umwälzpumpe mit maximaler Wärmeabgabeleistung betrieben wird.

Die folgende Abbildung zeigt die Abnahme der mittleren Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht nach der Beendigung der Heizmittelzufuhr bei konstant auf 22 °C gehaltener Lufttemperatur im Raum.

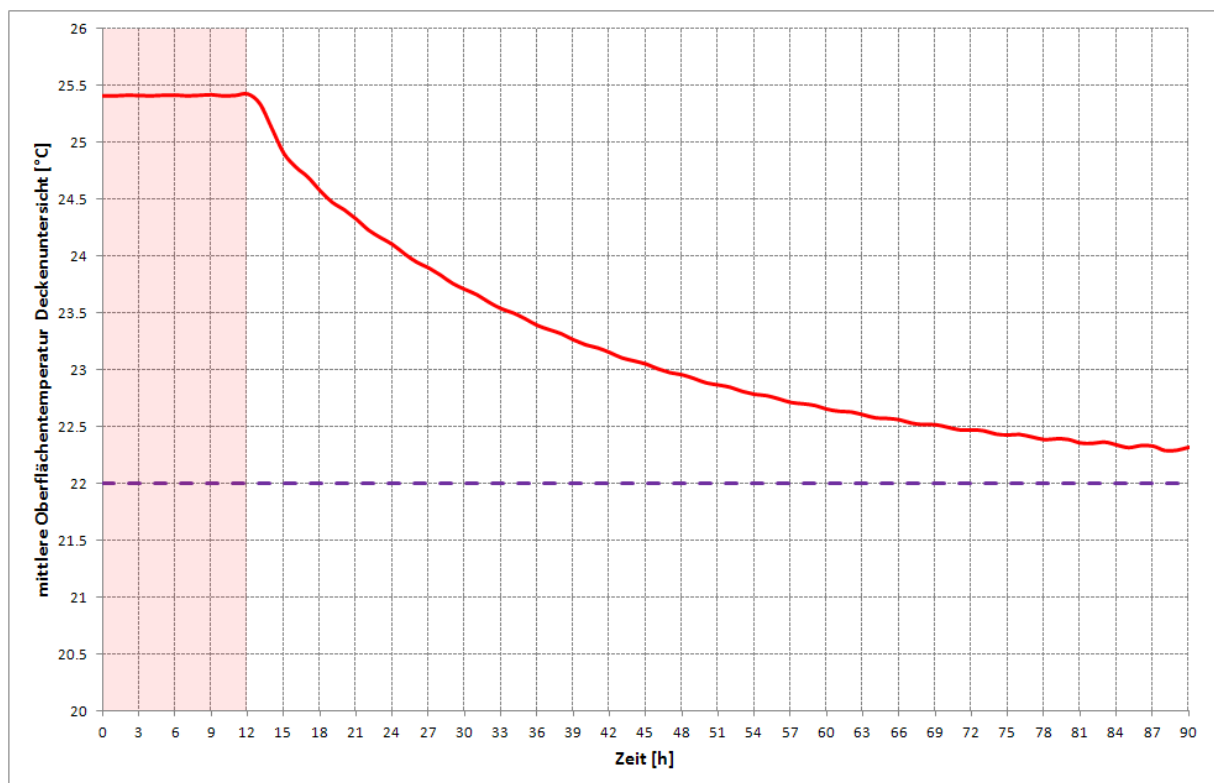


Abb. A.31: Auskühlverhalten der Deckenuntersicht nach Abschaltung der Umwälzpumpe zur Stunde 12

Es zeigt sich, dass die Oberflächentemperatur der Decke nur langsam abnimmt und gegen die Raumlufttemperatur strebt. 24 Stunden nach Abschaltung der Pumpe ist die Oberflächentemperatur von 25,4 °C auf 23,4 °C abgesunken. Nach weiteren 24 Stunden liegt die Oberflächentemperatur aber immer noch bei 22,7 °C. Wie aus Abb. A.31 ersichtlich, verlangsamt sich die Abkühlung mit fortschreitender Zeit deutlich.

Mit dem Absinken der Oberflächentemperatur wird natürlich auch die Wärmeabgabe an den unter der Decke liegenden Raum reduziert. Die folgende Abbildung zeigt den berechneten zeitlichen Verlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung nach Abschaltung der Umwälzpumpe.

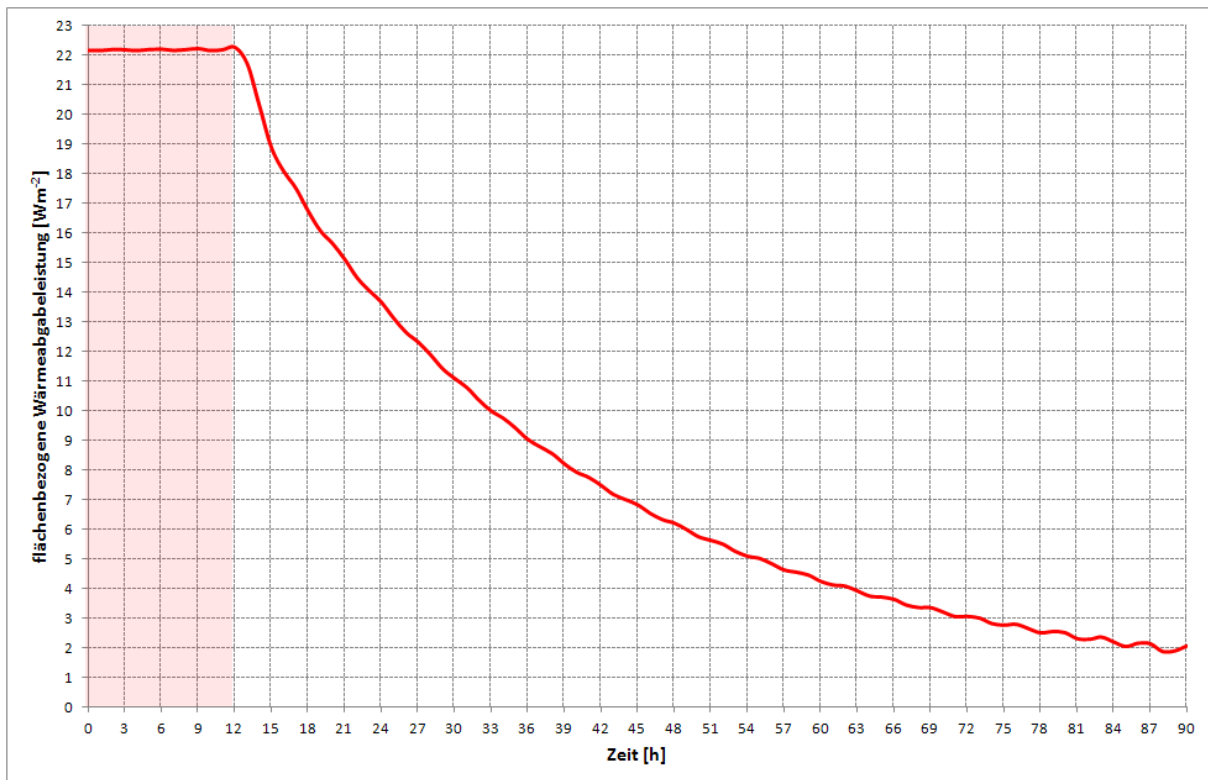


Abb. A.32: Berechneter Zeitverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke nach Abschaltung der Umwälzpumpe zur Stunde 12

Nach Gleichung (A.5) ergibt sich natürlich eine zu Abbildung A.31 gleiche Kurvenform. Die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung der thermisch aktivierten Decke geht unmittelbar nach dem Abschalten der Pumpe stärker zurück als im weiteren Zeitverlauf. Die Wärmeabgabe sinkt von $22,3 \text{ Wm}^{-2}$ zur Stunde 12 auf $11,1 \text{ Wm}^{-2}$ zur Stunde 30 ab und halbiert sich somit binnen 18 Stunden. Nach insgesamt drei Tagen (Stunde 84) gibt die Decke immer noch $2,2 \text{ Wm}^{-2}$ an den Raum ab.

Der in Abbildung A.32 gezeigte Kurvenverlauf eröffnet die Möglichkeit, die in der Decke gespeicherte Wärmemenge abzuschätzen. Die während des Abkühlvorgangs aus einem Quadratmeter der Decke in den Raum austretende Wärmemenge ist mit der Fläche unter der in Abbildung A.32 gezeigten Kurve identisch. Die Ermittlung dieser Fläche erfolgt durch Integration, wobei der Anfangszeitpunkt mit 12^{00} – also dem Zeitpunkt der Abschaltung – und der Endzeitpunkt beim Erreichen verschwindender Wärmeabgabeleistung zu setzen ist.

Als Ergebnis der rechnerischen Abschätzung ergibt sich die flächenbezogene Wärmeabgabemenge zu 633 Whm^{-2} . Dividiert man diesen Wert durch die Differenz zwischen der Heizmitteltemperatur bei laufender Umwälzpumpe von $27,7 \text{ °C}$ und der Solltemperatur des Raums von 22 °C , so ergibt sich mit $111 \text{ Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ein Wert, der seiner Dimension nach eine Wärmekapazität darstellt. Um diesen Wert interpretieren zu können, wird vorerst die flächenbezogene Wärmekapazität χ einer 25 cm dicken Stahlbetonplatte unter Anwendung des einfachen Ansatzes $\chi = c \cdot \rho \cdot d$ berechnet. Mit der spezifischen Wärmekapazität $c = 0,278 \text{ Whkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, der Massendichte $\rho = 2400 \text{ kgm}^{-3}$ und der Dicke $d = 0,25 \text{ m}$ ergibt sich mit $\chi = 166,7 \text{ Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ein vergleichsweise hoher Wert.

Bei der Interpretation der berechneten flächenbezogenen Wärmekapazität χ ist zu beachten, dass dieser Wert die Wärmeaufnahme der Betonplatte bei isothermer Erwärmung um ein

Grad angibt. Da eine isotherme Erwärmung - also eine Erwärmung ohne jegliche Temperaturdifferenzen in der Betonplatte - in der Realität nicht umsetzbar ist, stellt χ eine hypothetische und in der Realität nicht erreichbare Obergrenze für die flächenbezogene Wärmekapazität dar.

Als weiteres Maß zur Quantifizierung des Wärmespeichervermögens von Baukonstruktionen ist in der ÖNorm EN ISO 13786 [27] die sog. „wirksame Wärmekapazität“ eingeführt. Diese Kenngröße gibt an, wie viel Wärme bei sinusförmiger Schwankung der Lufttemperatur in die Baukonstruktion eindringt und dort gespeichert wird. Üblicherweise wird die Länge der Sinusschwankung – und damit die Periodenlänge – mit 24 h, also einem Tag festgelegt. Für die 25 cm dicke Stahlbetondecke errechnet sich die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität für die Deckenuntersicht zu $20,1 \text{ Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$, wenn gemäß ÖNorm EN 1264-5 [6] der Wärmeübergangswiderstand für die Deckenuntersicht auf $0,154 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ gesetzt wird.

Ein Vergleich des aus Abbildung A.32 abgeleiteten Werts von $111 \text{ Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$ mit der wirksamen Wärmekapazität von $20,1 \text{ Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und der absoluten Obergrenze der flächenbezogenen Wärmekapazität von $166,7 \text{ Whm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zeigt, dass mittels Bauteilaktivierung die Wärmespeicherfähigkeit des Betons offenkundig sehr gut ausgenützt 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. $24 \text{ }^\circ\text{C}$ noch 2 K über der Solltemperatur des Raums von $22 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 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.
- Nach einem gänzlichen Abschalten der Umwälzpumpe kühlt die Decke nur langsam aus. Die Oberflächentemperatur sinkt innerhalb von 24 Stunden nur um ca. 2,0 K ab. Im gleichen Zeitraum (1 Tag) geht die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung auf ca. 41% ihres ursprünglichen Werts zurück.

- Bei thermisch aktivierten Decken wird die sehr hohe Wärmespeicherfähigkeit des Stahlbetons insofern sehr gut ausgenutzt als vergleichsweise große Wärmemengen ohne hohe Temperaturerhöhung gespeichert werden können.

VII.3.1.1 Einfluss der Betonüberdeckung

Bei den bisherigen 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. 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.

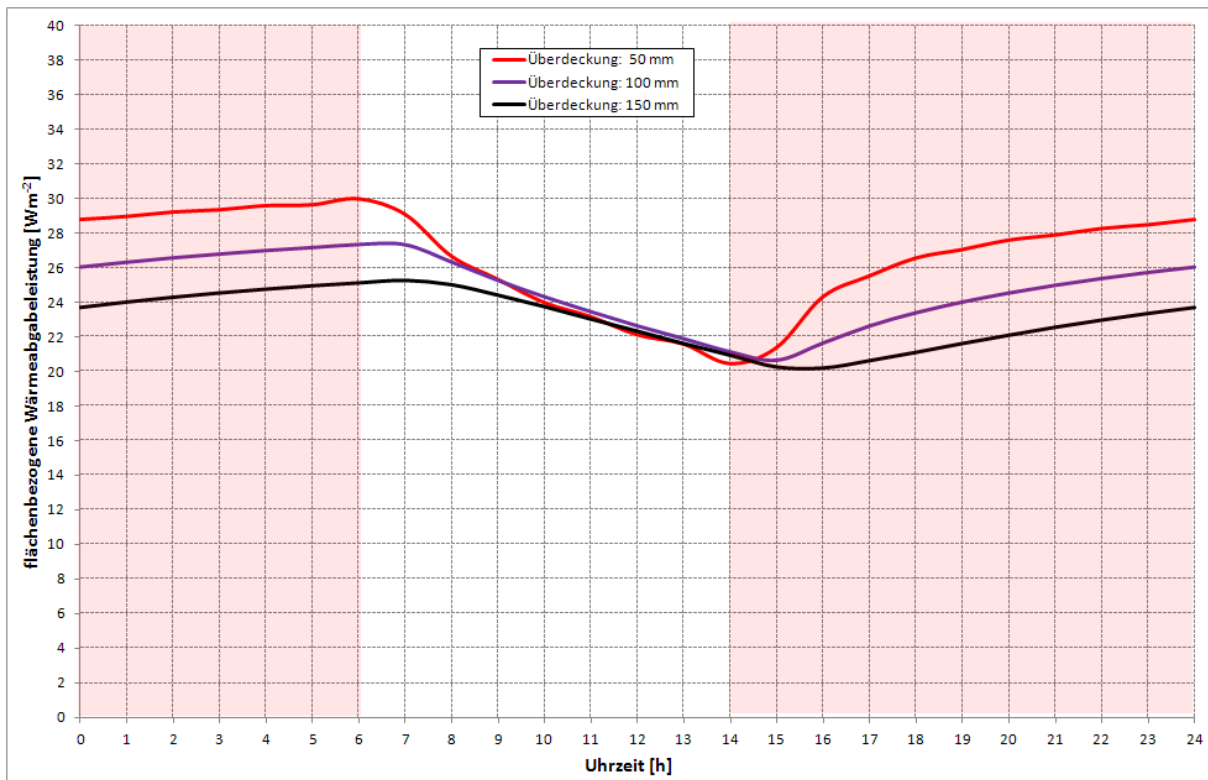


Abb. A.33: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr

Die unterschiedliche Position des Rohrregisters wirkt sich dahin gehend aus, dass während des Betriebs der Umwälzpumpe (in Abb. A.33 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 Wärmeabgabe langsam ab. Bemerkenswert ist, dass ab 10⁰⁰, also ca. 4 Stunden nach dem Zeitpunkt des Abschaltens der Umwälzpumpe, die Wärmeabgabe 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. A.33) etwas schneller abnimmt als bei größerer Betonüberdeckung (siehe die lila und die schwarze Linie in Abb. A.33) des Rohrregisters.

Die folgende Tabelle zeigt als Auswertung der in Abb. A.33 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. A.18: 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.

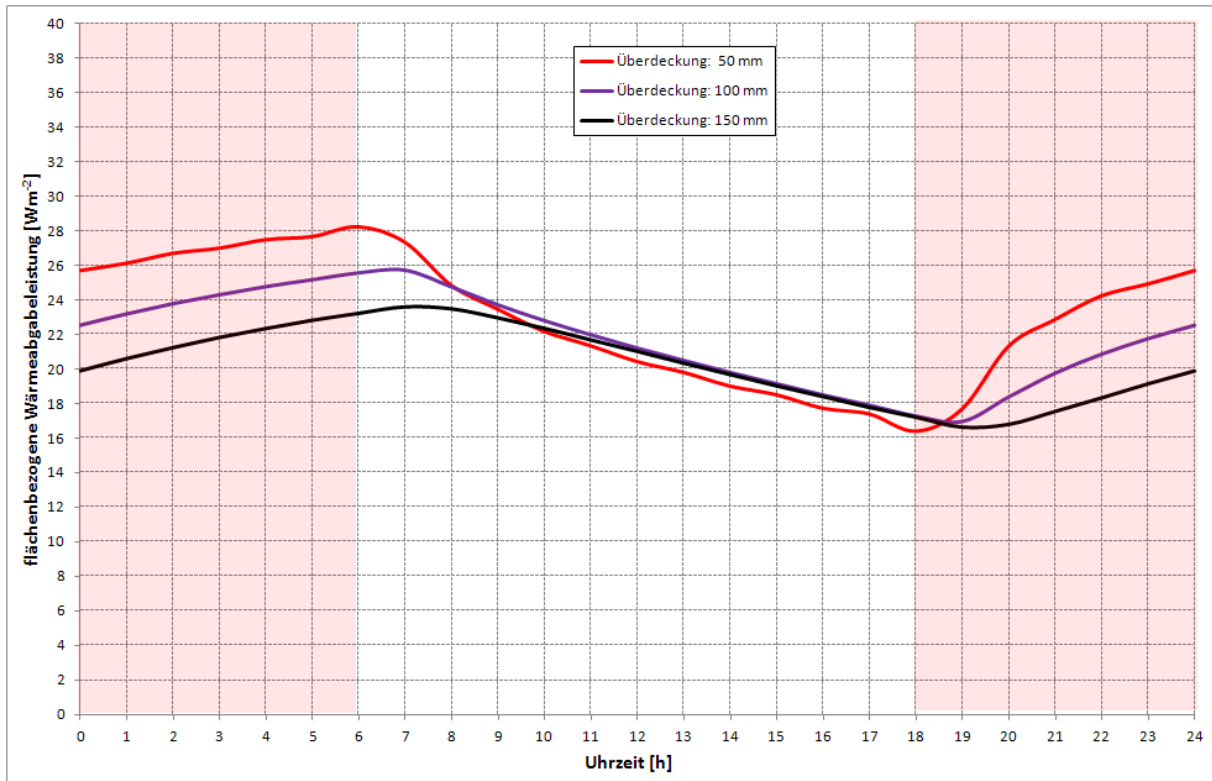


Abb. A.34: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei einer 12-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr

Im Vergleich zu Abb. A.33 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. A.19: 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. A.18).

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.

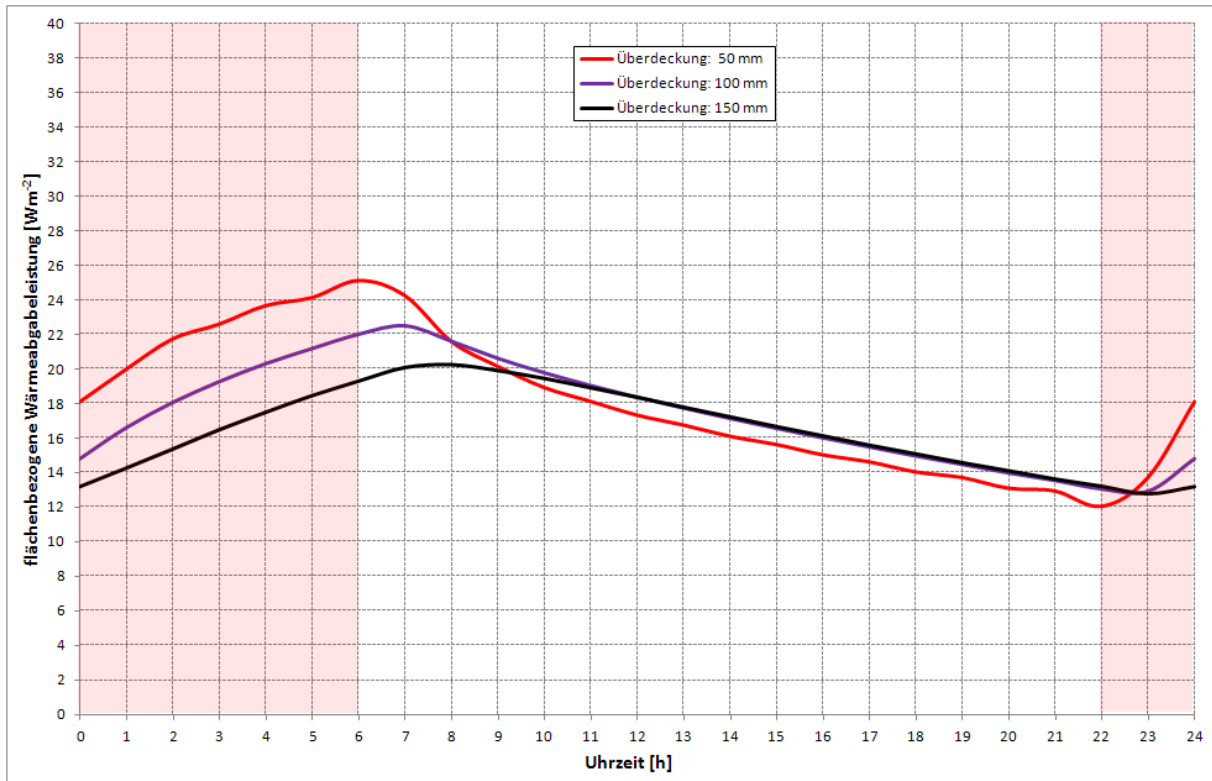


Abb. A.35: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke an den unter der Decke liegenden Raum bei einer 16-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr

Im Vergleich zu den Abbildungen A.33 und A.34 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. A.35 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. A.20: 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.

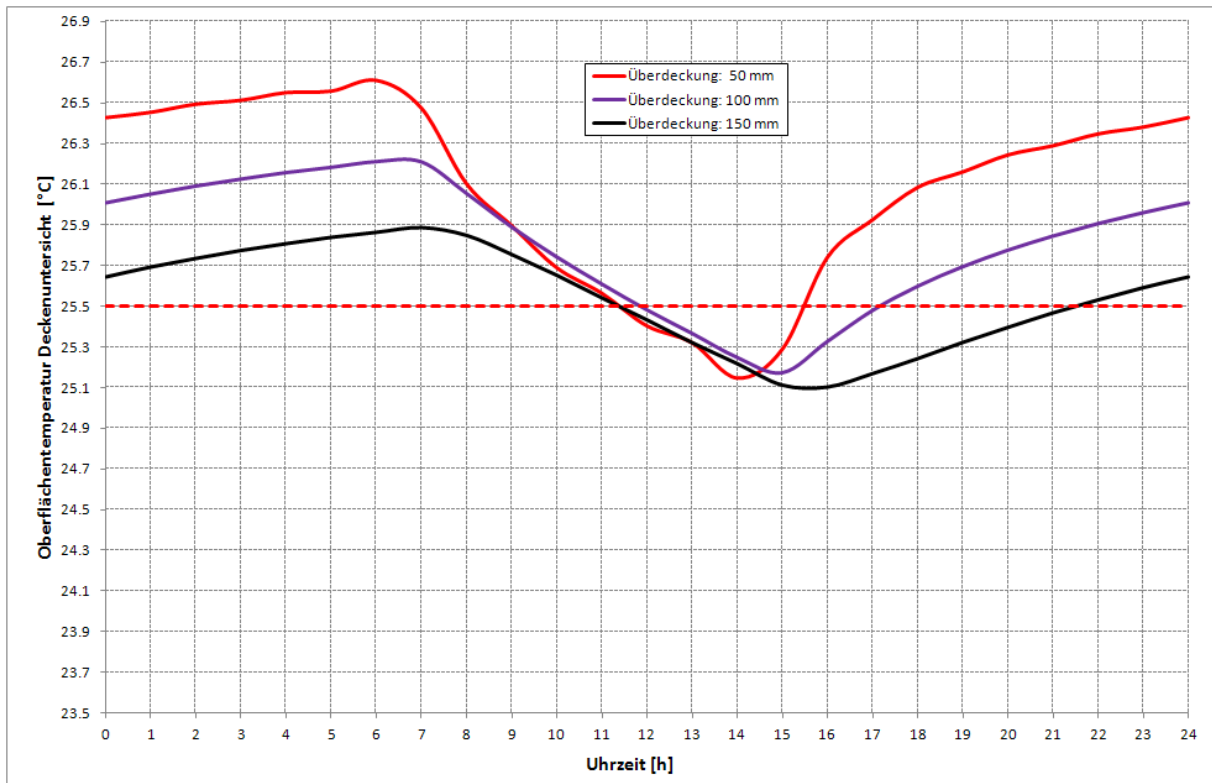


Abb. A.36: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **8-stündigen** Unterbrechung der Heizmittelzufuhr; Heizmitteltemperatur: 30 °C

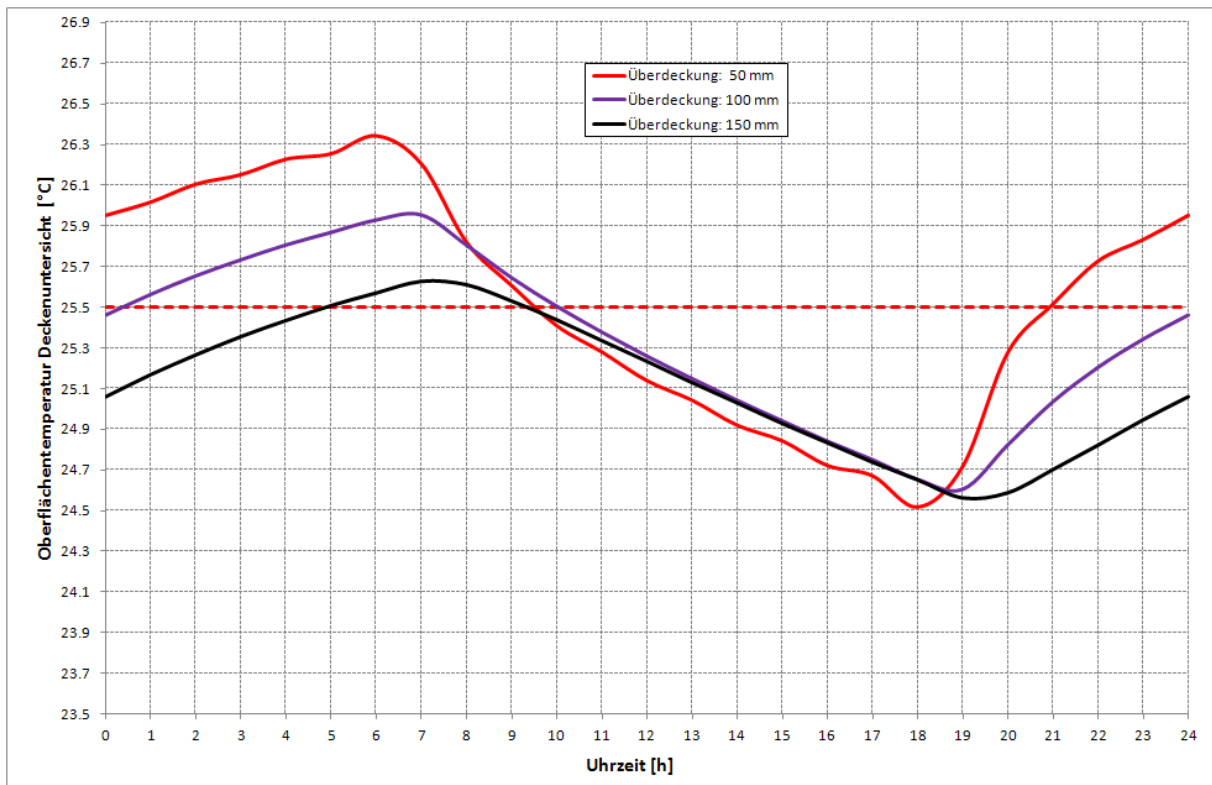


Abb. A.37: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **12-stündigen** Unterbrechung der Heizmittelzufuhr; Heizmitteltemperatur: 30 °C

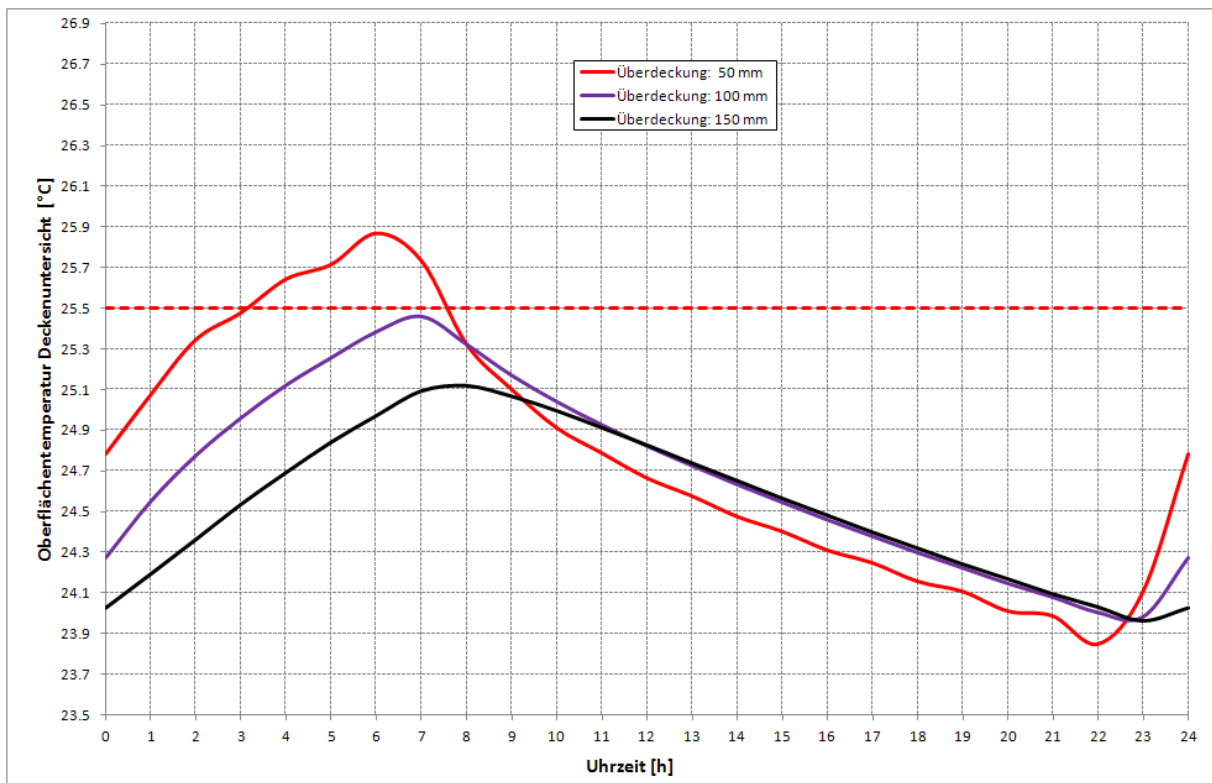


Abb. A.38: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **16-stündigen** Unterbrechung der Heizmittelzufuhr; Heizmitteltemperatur: 30 °C

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. A.38) gantztägig unter der gesetzten Obergrenze (rot strichlierte Kurve in den Abb. A.36 bis A.38) liegt. In allen anderen Fällen muss somit die Heizmitteltemperatur reduziert werden, um den Komfort im Raum hoch zu halten.

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. A.21: 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 beim Sprung der Betonüberdeckung zwischen 0,6 und 0,8 K.

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

Wird die errechnete maximal zulässige Heizmitteltemperatur gemäß Tab. A.21 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. A.22: 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 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. A.22 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 bei einer 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.

VII.3.1.2 Einfluss der Plattendicke

Bisher wurden die Berechnungen für eine Geschoßdecke mit dem in Tab. 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 Tabelle A.21 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 gleich 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 (20 cm, 25 cm und 30 cm) und drei unterschiedliche Unterbrechungsintervalle für die Heizmitteltemperatur (8 h, 12 h und 16 h).

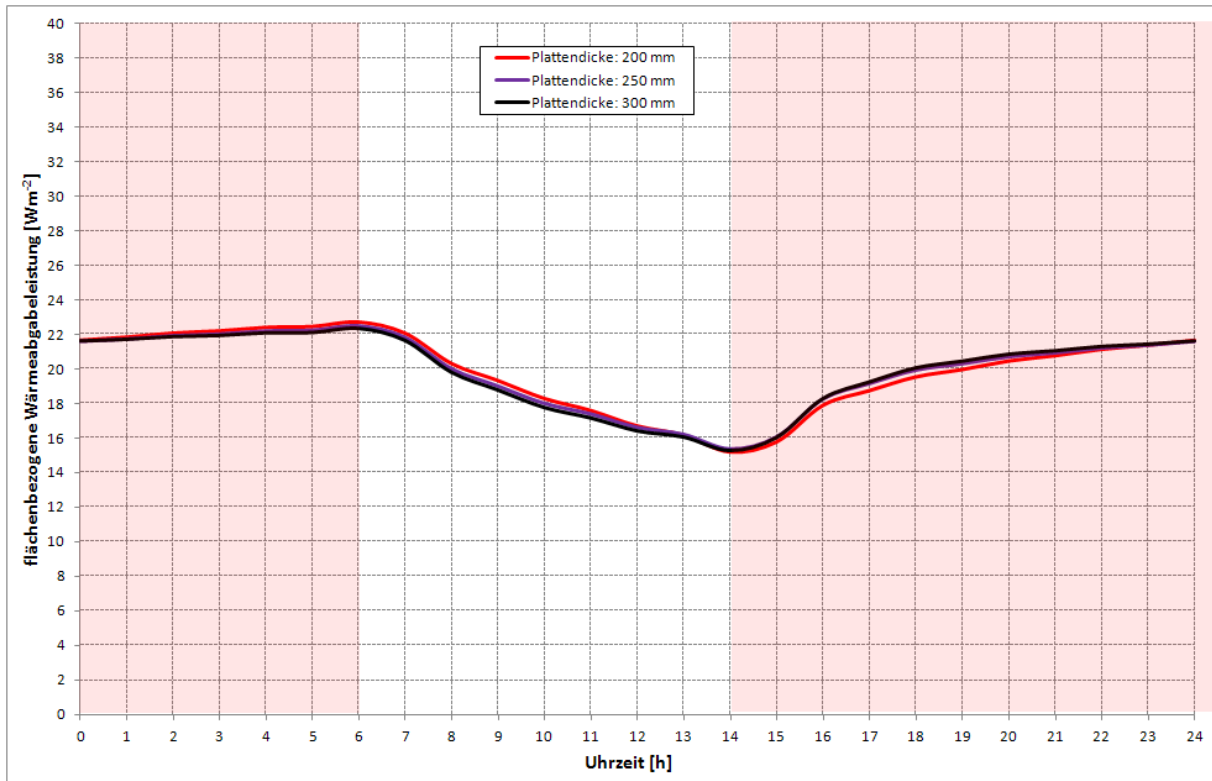


Abb. A.39: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **8 h**

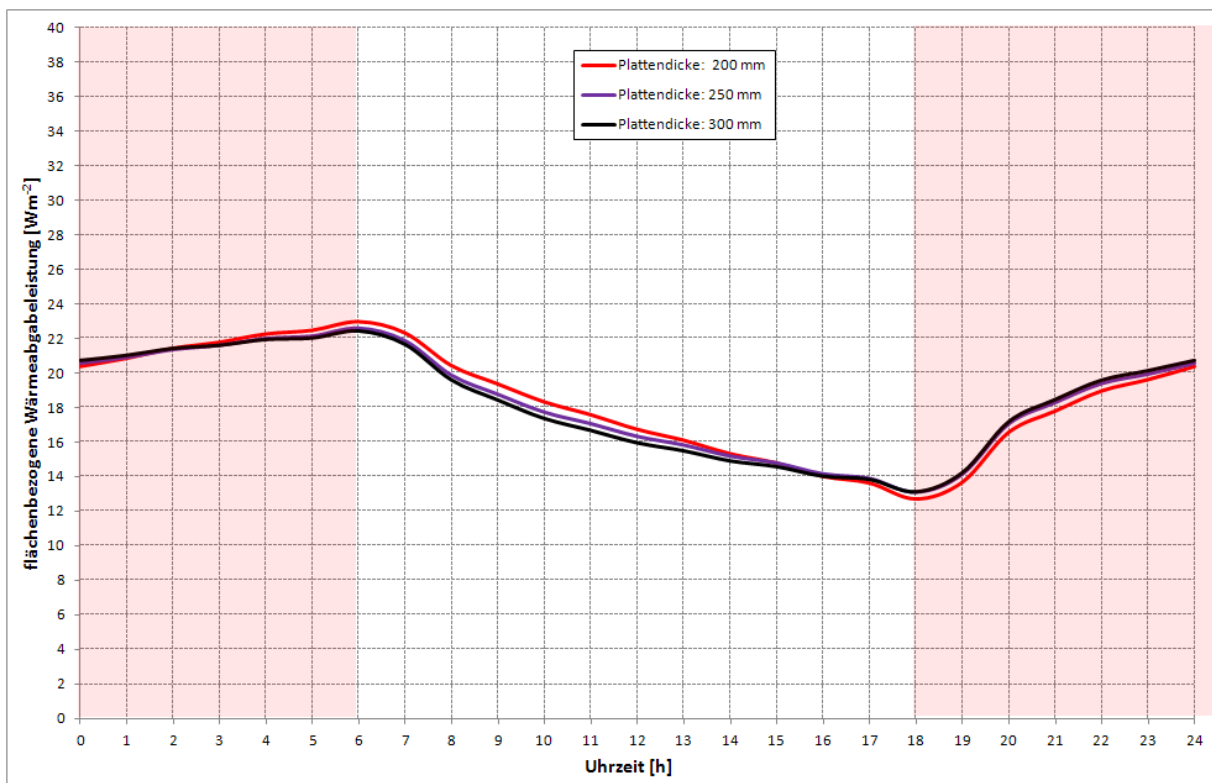


Abb. A.40: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **12 h**

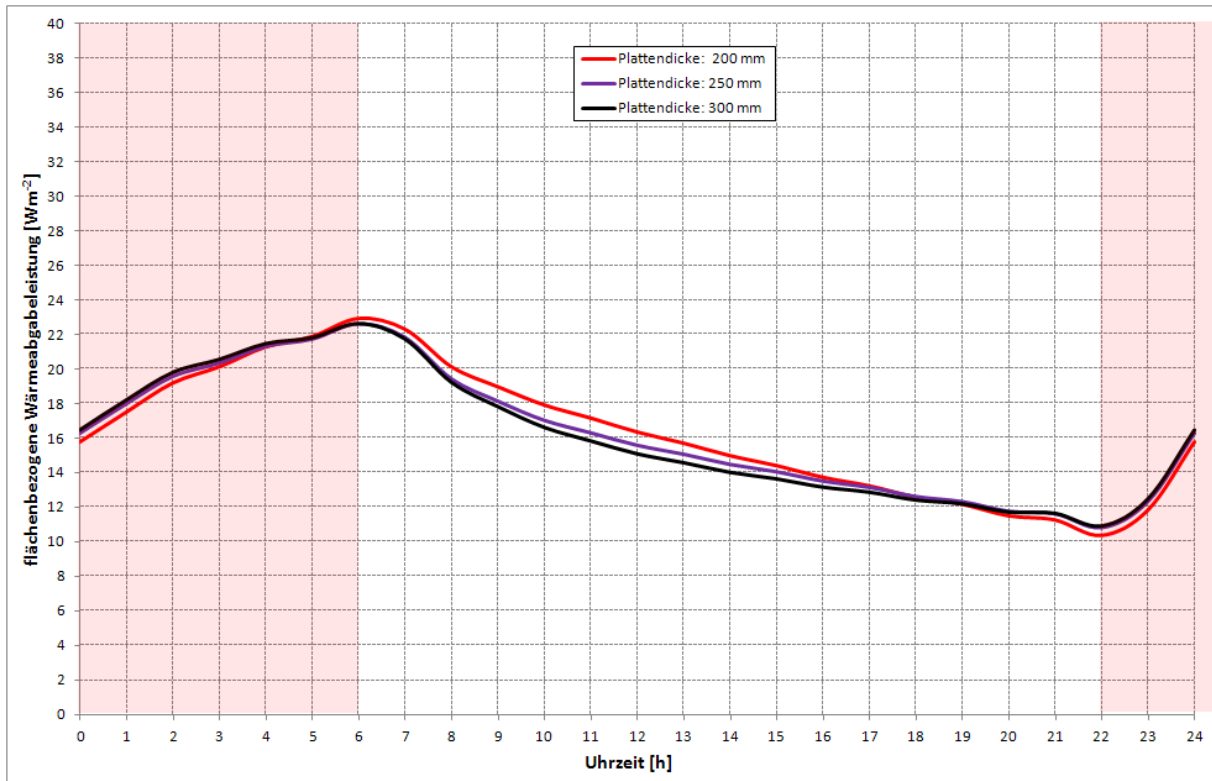


Abb. A.41: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **16 h**

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. 41 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.

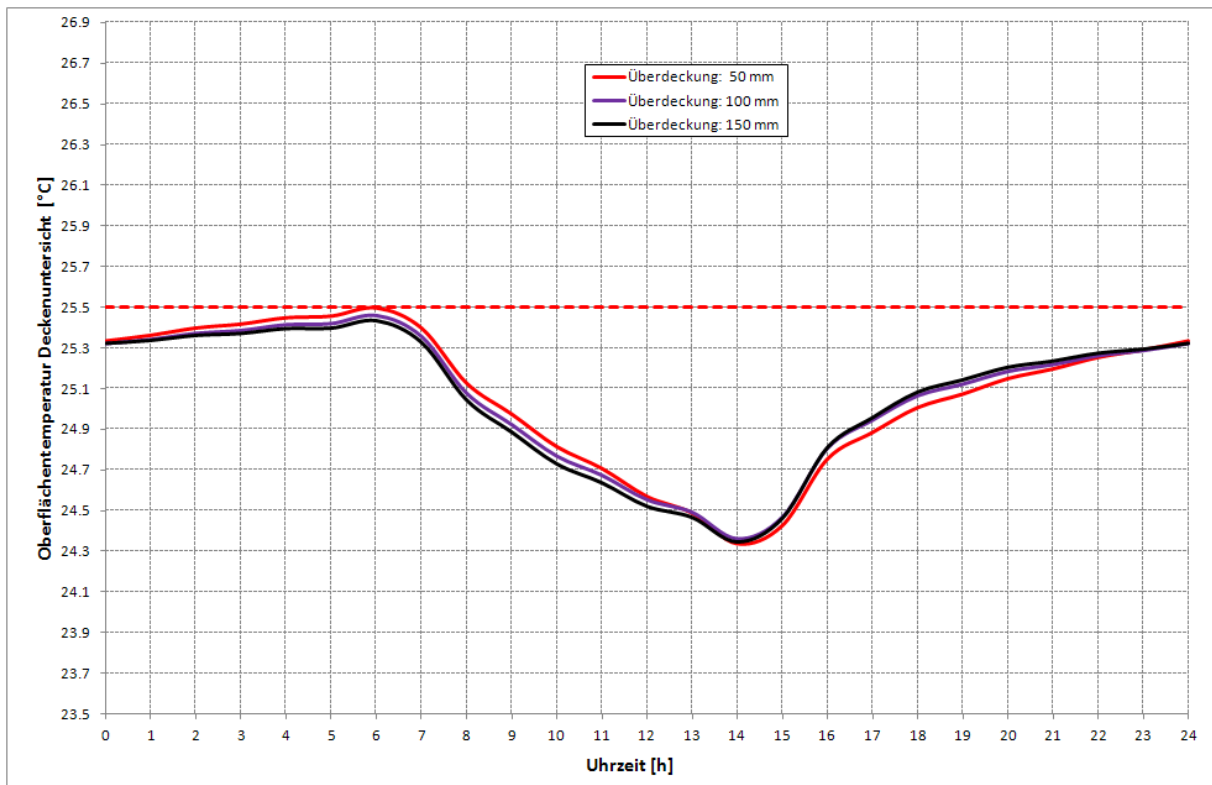


Abb. A.42: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **8 h**

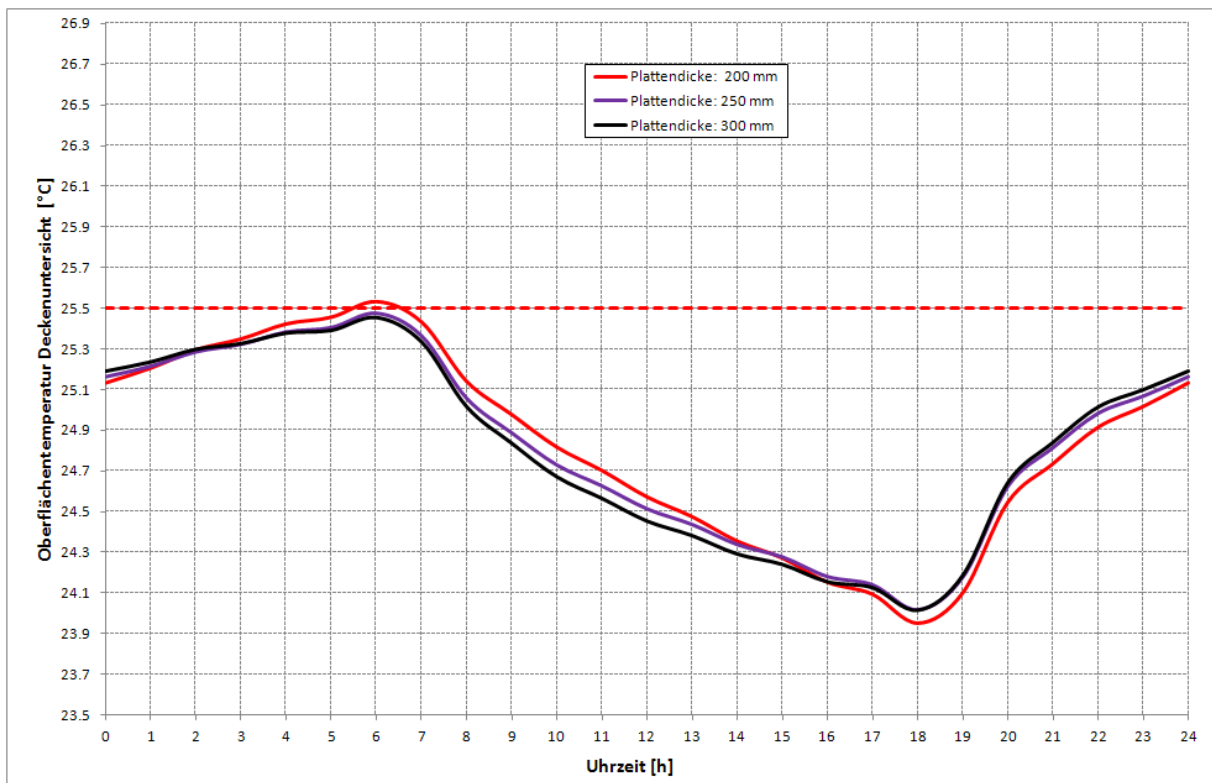


Abb. A.43: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **12 h**

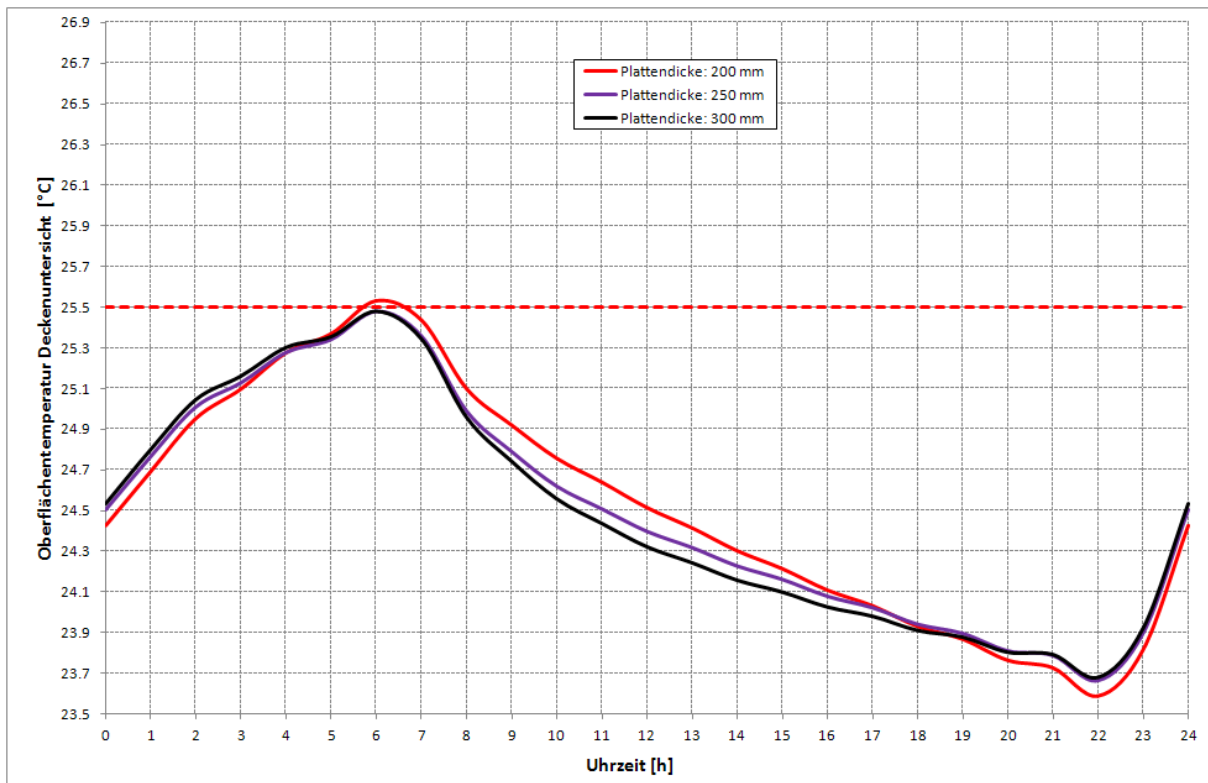


Abb. A.44: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **16 h**

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 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. A.21. 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

unterschiedliche Unterbrechungsintervalle für die Heizmitteltemperatur (8 h, 12 h und 16 h) für eine Rohrregisterposition mit 15 cm Betonüberdeckung.

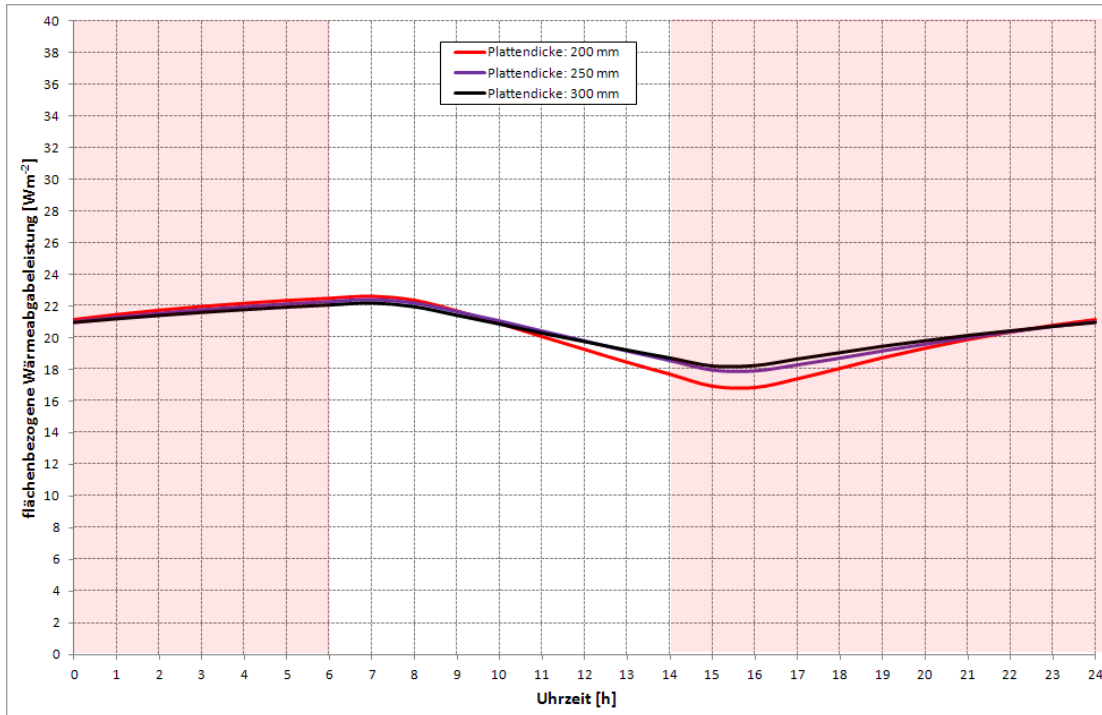


Abb. A.45: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **8 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

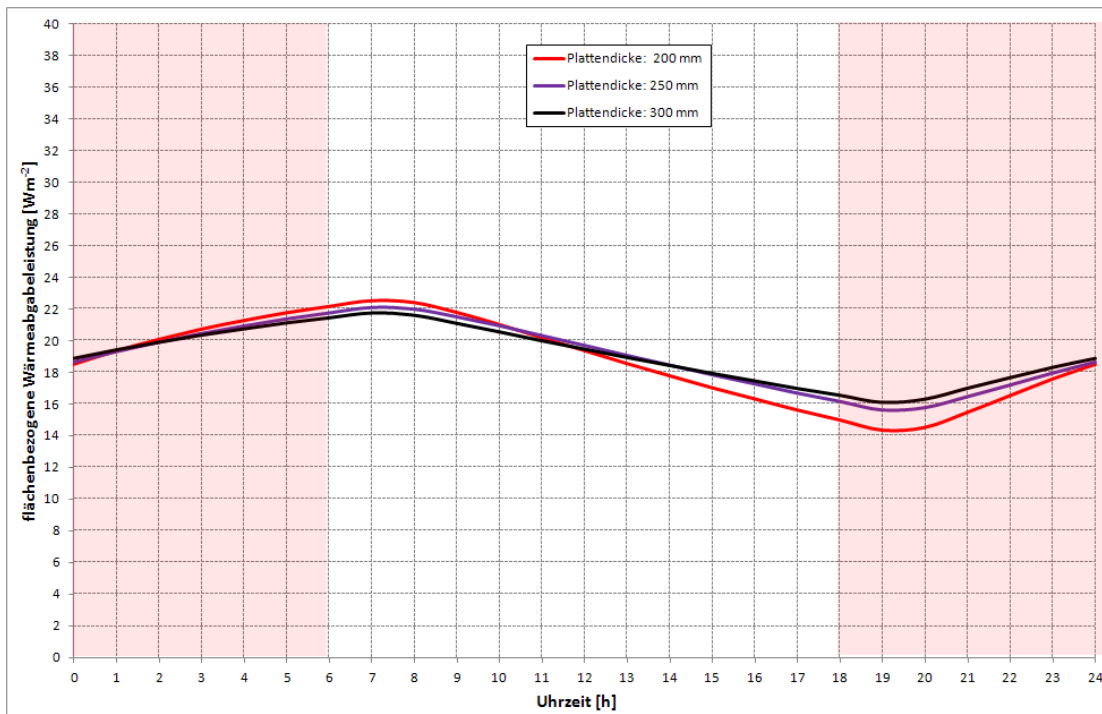


Abb. A.46: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **12 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

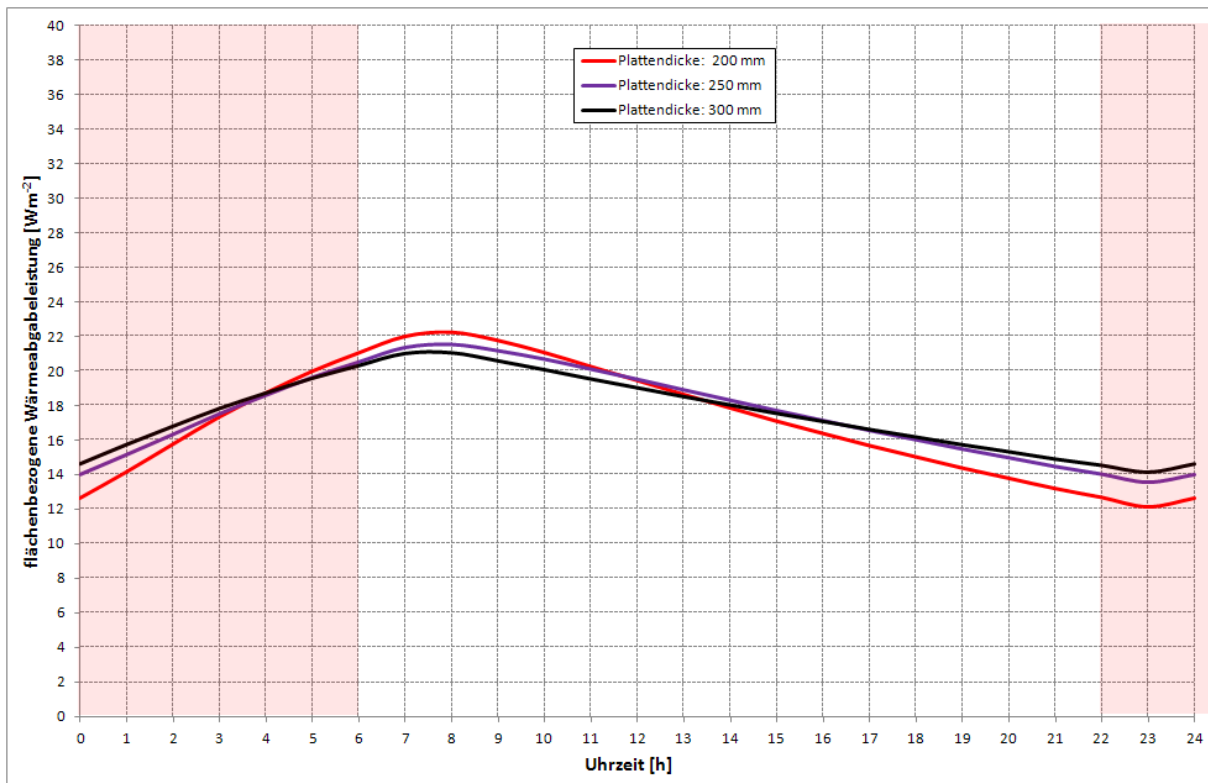


Abb. A.47: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke an den unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **16 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 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 im Fall, dass das Rohrregister mit einer Betonüberdeckung von 15 cm in die Geschoßdecke eingebaut ist.

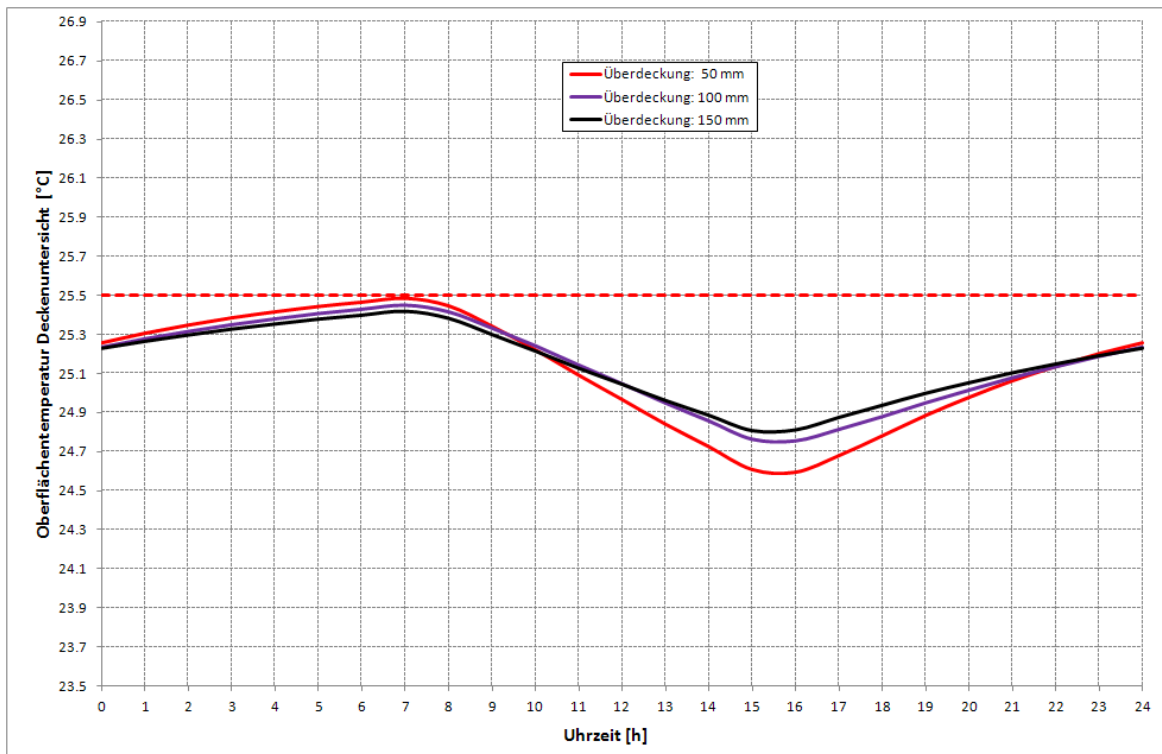


Abb. A.48: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **8 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

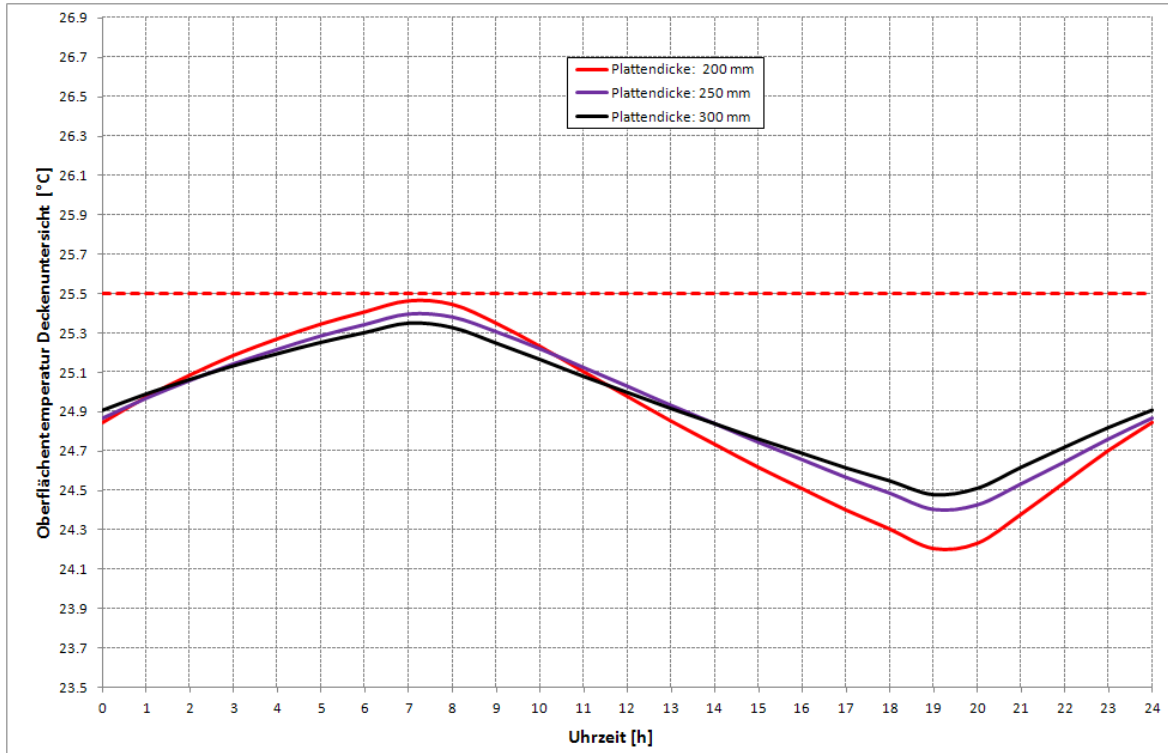


Abb. A.49: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **12 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

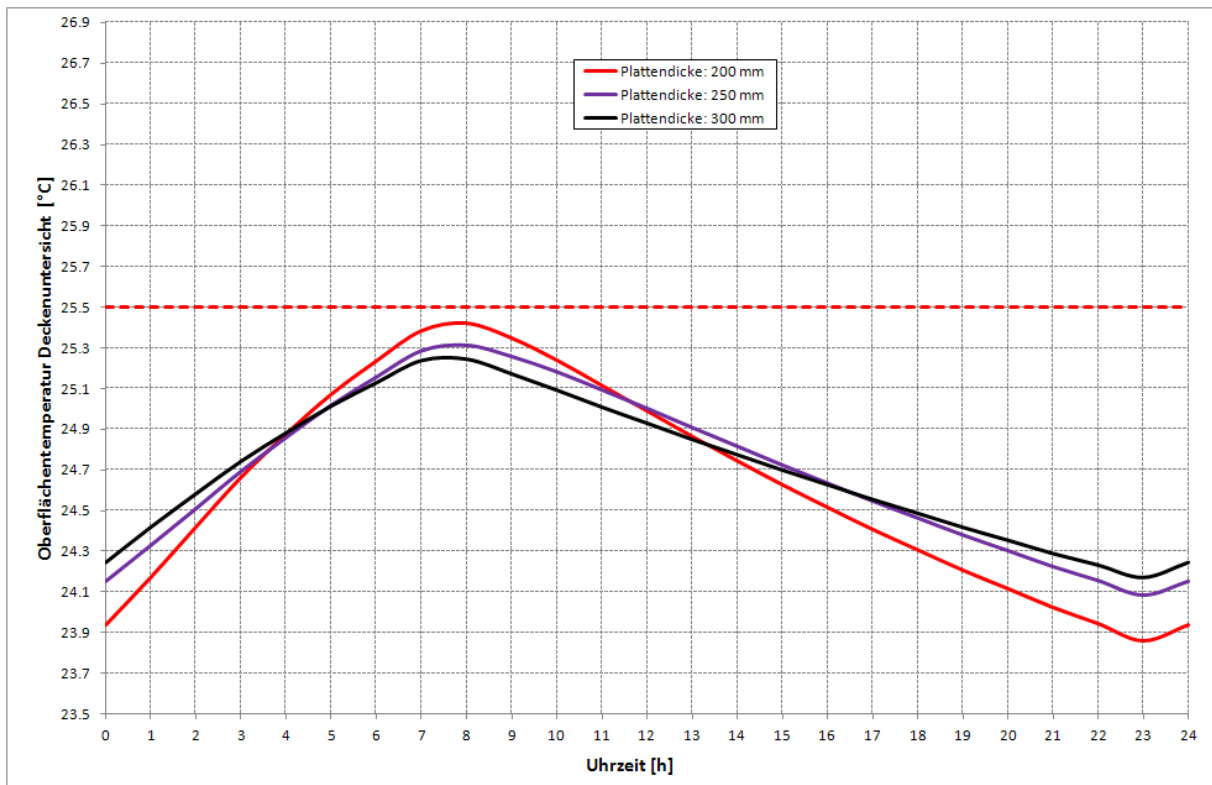


Abb. A.50: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **16 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

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 die Abbildungen A.42 bis A.44), 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 den Abbildungen A.42 bis A.44 und A.48 bis A.50 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.

VII.3.1.3 Auswirkung auf die operative Temperatur

Die bisher in Abschnitt VII.3 durchgeführten Untersuchungen waren bauteilbezogen. Die Lufttemperaturen sowohl im über als auch im unter der Geschoßdecke liegenden Raum wurden dabei tageszeitlich konstant auf 22 °C gesetzt.

Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich eine Unterbrechung der Heizmittelzufuhr auf den thermischen Komfort im zu beheizenden Raum auswirkt. Als Raum soll exemplarisch auch hier der in Abschnitt III.1 vorgestellte Modellraum dienen. In Anlehnung an die in Abschnitt V.1 dargelegten Überlegungen soll sich der Raum in einem Niedrigenergiehaus mit Standort Klagenfurt befinden. Diese Wahl kann als besonders kritisch für den thermischen Komfort im Raum angesehen werden („Worstcase-Szenario“).

Bezüglich der Lage des Rohrregisters wird die Betonüberdeckung mit 5 cm angesetzt. Wie in Abschnitt V.1 wird auch hier ein Achsabstand der Rohre von 20 cm angenommen. Berechnet werden der Tagesgang der Innenlufttemperatur im Raum, sowie die Tagesgänge sämtlicher Oberflächentemperaturen für den Fall eines mittleren Januar-Tags in Klagenfurt.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der inneren Oberflächentemperaturen für alle raumbegrenzenden Bauteile des Modellraums für den Fall, dass die Heizmittelzufuhr von 6⁰⁰ bis 14⁰⁰ unterbrochen ist. Die Temperatur des Heizmittels wurde hierbei tageszeitlich konstant auf 25,6 °C gesetzt. Mit dieser Heizmitteltemperatur ist unter Berücksichtigung der 8-stündigen Unterbrechung der Heizmittelzufuhr garantiert, dass die operative Raumtemperatur im Tagesverlauf nie unter die Solltemperatur von 20 °C fällt.

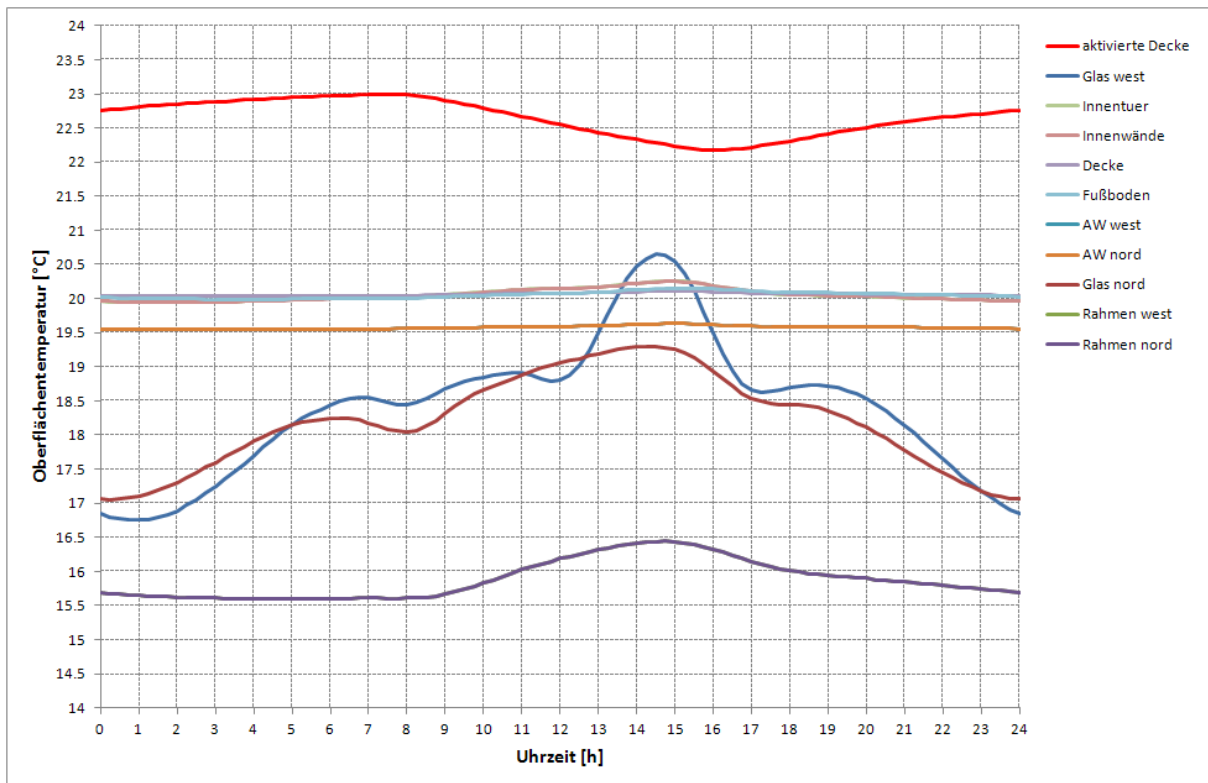


Abb. A.51: Errechnete Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen an den Innenseiten der raumbegrenzenden Bauteile; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **8 h**

Unter Berücksichtigung der in Abb. A.51 gezeigten Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen und des nach der Simulation ebenfalls vorliegenden Tagesverlaufs der Raumlufttemperatur wird in der Folge der Tagesgang der operativen Raumtemperatur berechnet.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der operativen Temperatur für drei verschiedene Lagen des Rohrregisters (Betonüberdeckung 5, 10 und 15 cm). Die Dauer der Unterbrechung der Heizmitteltemperatur wurde hierbei mit 8 Stunden (6⁰⁰ bis 14⁰⁰) unverändert beibehalten.

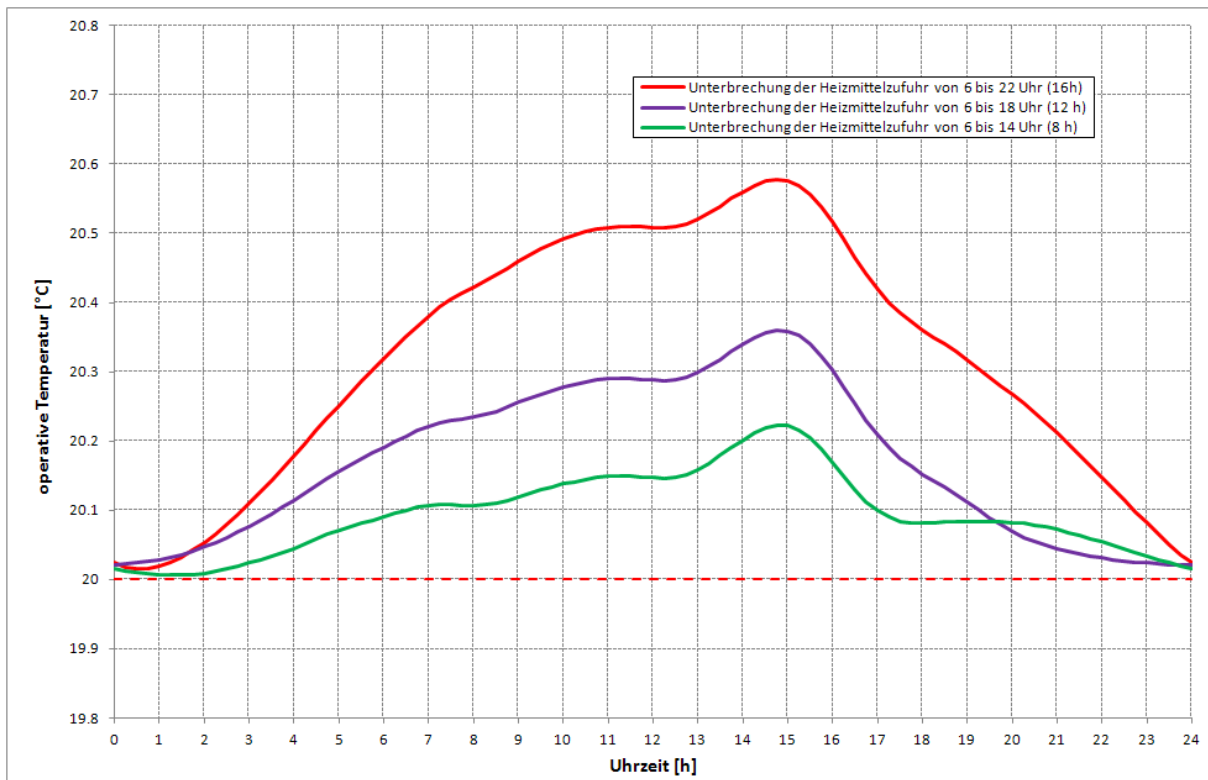


Abb. A.52: Errechnete Tagesverläufe der operativen Temperatur im Raum für einen mittleren Januar-Tag; Betonüberdeckung des Rohrregisters: **5 cm**

Bei Beachtung der Skalierung der operativen Temperatur auf der Ordinate von Abb. A.52 wird klar, dass die operative Temperatur im Raum auch bei länger dauernder Abschaltung der Heizmittelzufuhr eine nur sehr kleine Tagesschwankung aufweist. Das Minimum der operativen Temperatur tritt für alle drei Varianten knapp nach Mitternacht auf und liegt – wie gefordert - bei ca. 20 °C. Dies wurde erreicht, indem die Heizmitteltemperatur in Schritten von 0,1 K solange variiert wurde, bis die Solltemperatur von 20 °C nie unterschritten wird.

Im Zuge dieser Variantenrechnung zeigte sich, dass mit Verlängerung der Unterbrechungsdauer der Heizmittelzufuhr die Heizmitteltemperatur deutlich angehoben werden muss. Wie schon angemerkt, ist bei einer Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 6⁰⁰ bis 14⁰⁰ zur Einhaltung der Solltemperatur eine Heizmitteltemperatur von 25,6 °C notwendig. Für eine 12-stündige Unterbrechungsdauer steigt dieser Wert auf 26,7 °C an. Bei einer nächtlichen Aufladezeit von nur 8 Stunden Dauer, d. h. einem Stillstand der Umwälzpumpe von 6⁰⁰ bis 22⁰⁰, sind 29,0 °C zur Erreichung des in Abb. A.52 gezeigten Tagesgangs der operativen Temperatur notwendig.

Die höheren Heizmitteltemperaturen bewirken, dass sich auch die Tagesschwankungen der operativen Temperatur erhöhen. Allerdings ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass auch die höchste Tagesschwankung der operativen Temperatur mit knapp 0,6 K (bei 16-stündiger Unterbrechung der Heizmittelzufuhr) kaum wahrnehmbar sein wird und jedenfalls den thermischen Komfort im Raum nicht beeinträchtigt.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die entsprechenden Ergebnisse der Simulationen für eine Betonüberdeckung von 10 und 15 cm.

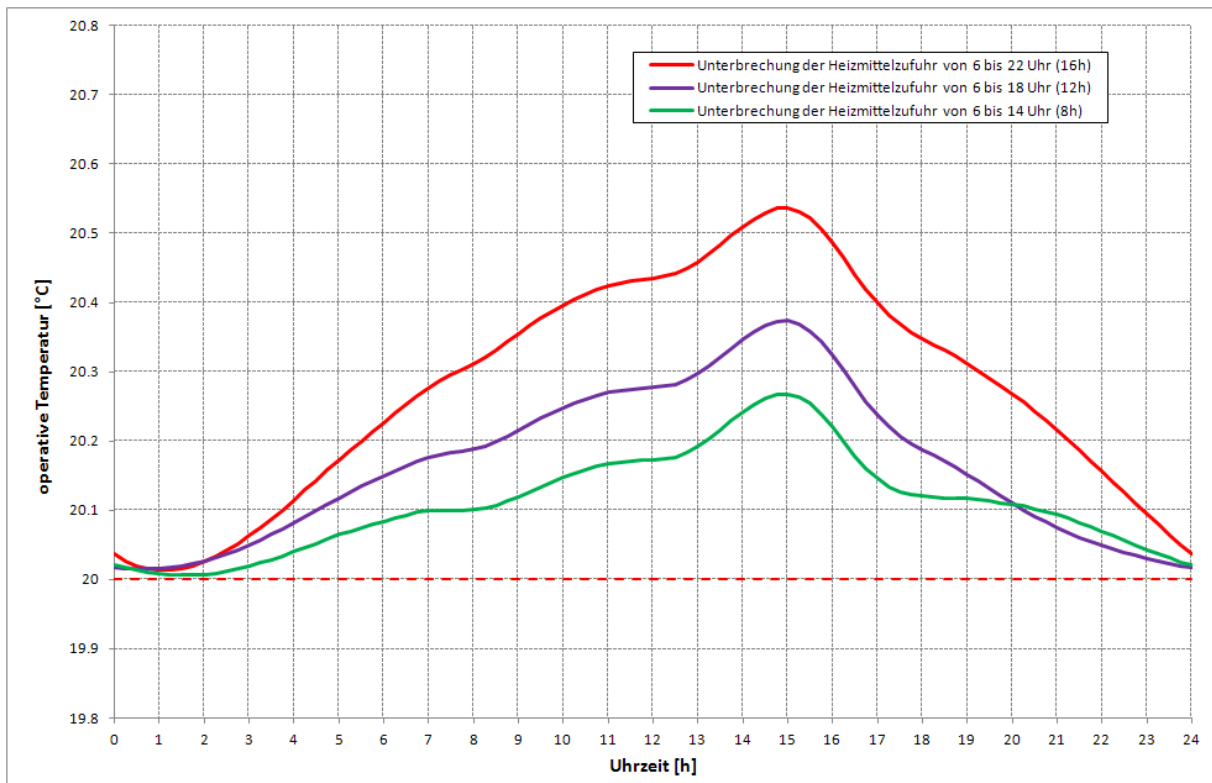


Abb. A.53: Errechnete Tagesverläufe der operativen Temperatur im Raum für einen mittleren Januar-Tag; Betonüberdeckung des Rohrregisters: **10 cm**

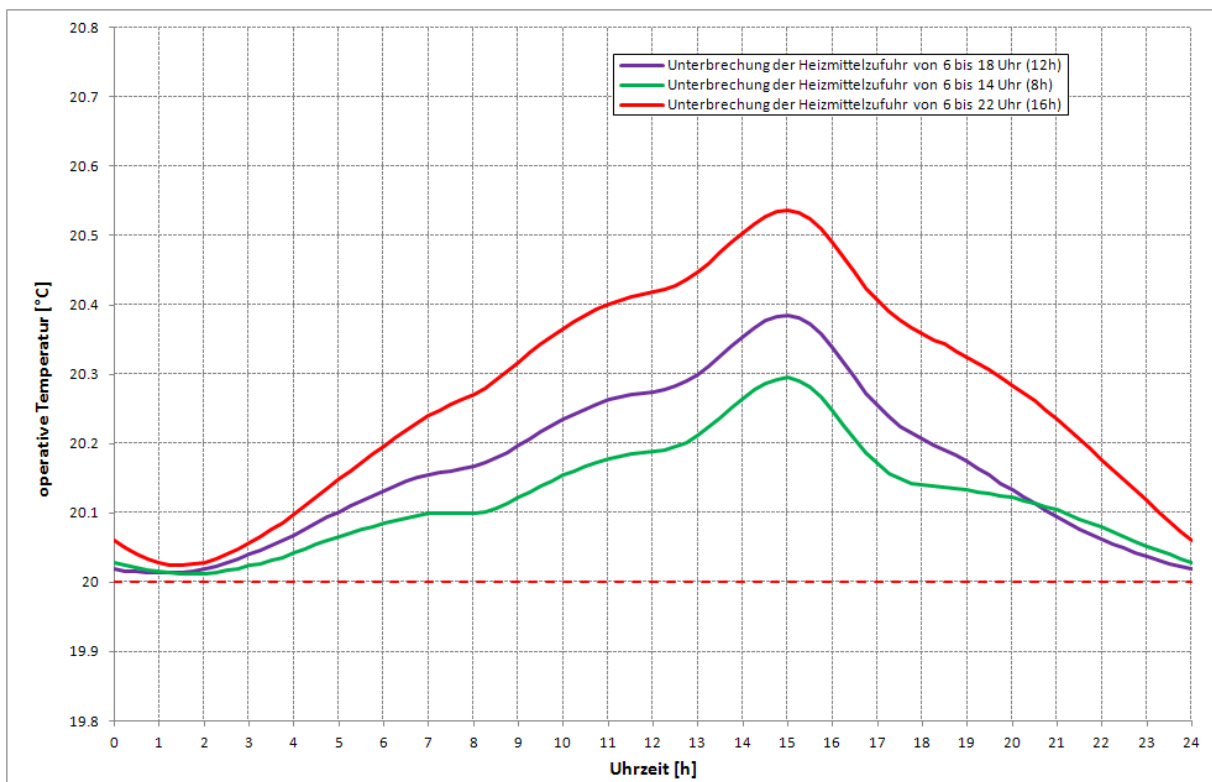


Abb. A.54: Errechnete Tagesverläufe der operativen Temperatur im Raum für einen mittleren Januar-Tag; Betonüberdeckung des Rohrregisters: **15 cm**

Es zeigt sich, dass die Lage des Rohrregisters den Tagesgang der operativen Temperatur nur wenig beeinflusst. Die Einflüsse der Sonneneinstrahlung durch das westorientierte Fenster und der nutzungsbedingten Wärmequellen wirken sich offenbar wesentlich stärker auf die operative Temperatur aus als das thermische Verhalten der aktivierten Decke.

Zusammenfassend sind in folgender Tabelle die zur Erreichung der in den Abbildungen A.52 bis A.54 gezeigten Tagesgänge der operativen Temperatur erforderlichen Heizmitteltemperaturen aufgelistet.

Betonüberdeckung	Heizmitteltemperatur [°C] bei		
	8 h Unterbrechung	12 h Unterbrechung	16 h Unterbrechung
5 cm	25,6	26,7	29,0
10 cm	26,0	27,0	29,1
15 cm	26,4	27,4	29,5

Tab. A.23: Zur Einhaltung einer Soll-Temperatur von 20 °C erforderliche Heizmitteltemperaturen

Bei Vergrößerung der Unterbrechungsdauer der Heizmittelzufuhr muss die Heizmitteltemperatur deutlich erhöht werden. Eine weit weniger ausgeprägte Erhöhung der Heizmitteltemperatur ist notwendig, wenn die Betonüberdeckung vergrößert wird. Bemerkenswert ist, dass in allen untersuchten Fällen die notwendige Heizmitteltemperatur unter 30 °C liegt. Nochmals angemerkt sei in diesem Zusammenhang, dass dieses Ergebnis für einen mittleren Januar-Tag in Klagenfurt, für ein Gebäude in Niedrigenergiehausstandard und für eine Registerfläche von 24,7 m² (70% der Deckenfläche) erhalten wurde.

Conclusio:

Die durchgeführten Simulationsrechnungen zur Beheizung des Modellraums mittels thermischer Aktivierung der Geschoßdecke führen auf folgende Ergebnisse:

- Bei allen Berechnungsvarianten bleibt die Tagesschwankung der operativen Temperatur unter 0,6 K und ist daher kaum merkbar. Der hohe thermische Komfort im Raum bleibt auch bei lang andauernder Unterbrechung der Heizmittelzufuhr erhalten.
- Bei Verlängerung der Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr ist die Heizmitteltemperatur deutlich anzuheben. Diese Maßnahme beeinflusst die operative Temperatur im Raum jedoch nur wenig.
- Bei erhöhter Betonüberdeckung des Rohrregisters ist eine Anpassung der Heizmitteltemperatur notwendig. Bei den hier betrachteten, im Tagesrhythmus schwankenden Betriebsarten hat die Betonüberdeckung kaum einen Einfluss auf die sich im Raum einstellende operative Temperatur.

VII.3.2 Kühlfall

Im Fall einer Kühlung durch die thermisch aktivierte Decke wird vorgegeben, dass die Oberflächentemperatur einen Minimalwert von 22 °C im Tagesverlauf nicht überschreiten darf. Es ist dabei anzunehmen, dass die Lufttemperatur im gekühlten Raum 26 °C nicht übersteigen darf. Bei der Interpretation der im Folgenden gezeigten Ergebnisse ist zu beachten, dass die getroffene Annahme sich auf den Auslegungsfall – also auf eine Extremsituation – bezieht. Im Normalbetrieb wird die Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke deutlich höher liegen.

Die Länge der Kühlungsunterbrechung – d. h. des Stillstands der Umwälzpumpe – wird 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 für alle Berechnungsvarianten konstant gehalten.

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.

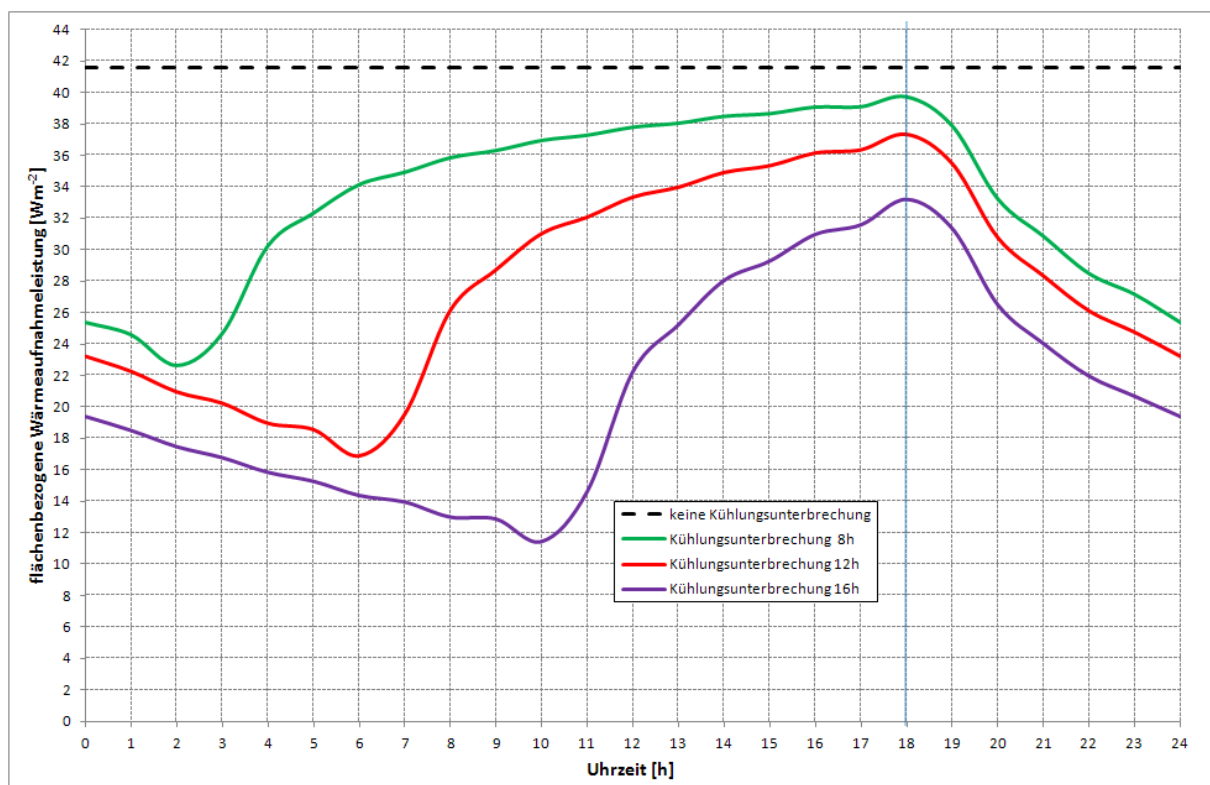


Abb. A.55: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei nicht durchlaufender Umwälzpumpe

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. A.55) und wird in den untersuchten Fällen der Kühlungsunterbrechung nicht erreicht.

Anmerkung: Da im Gegensatz zu den Untersuchungen von Abschnitt II.3 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 °C liegt diese Temperatur, selbst im Fall des durchgehenden Betriebs der Pumpe, mit $19,5 \text{ °C}$ etwas über der Kühlmitteltemperatur.

Die jeweils im Tagesverlauf von dem unter der aktivierten Decke gelegenen Raum aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge¹⁸ ergibt sich durch Integration der in Abb. A.55 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. A.24: Im Tagesverlauf von der Decke aufgenommene flächenbezogene Wärmemenge

Der schon im Falle der Heizungsunterbrechung 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.

¹⁸ Die Wärmemenge ist auf die Registerfläche bezogen.

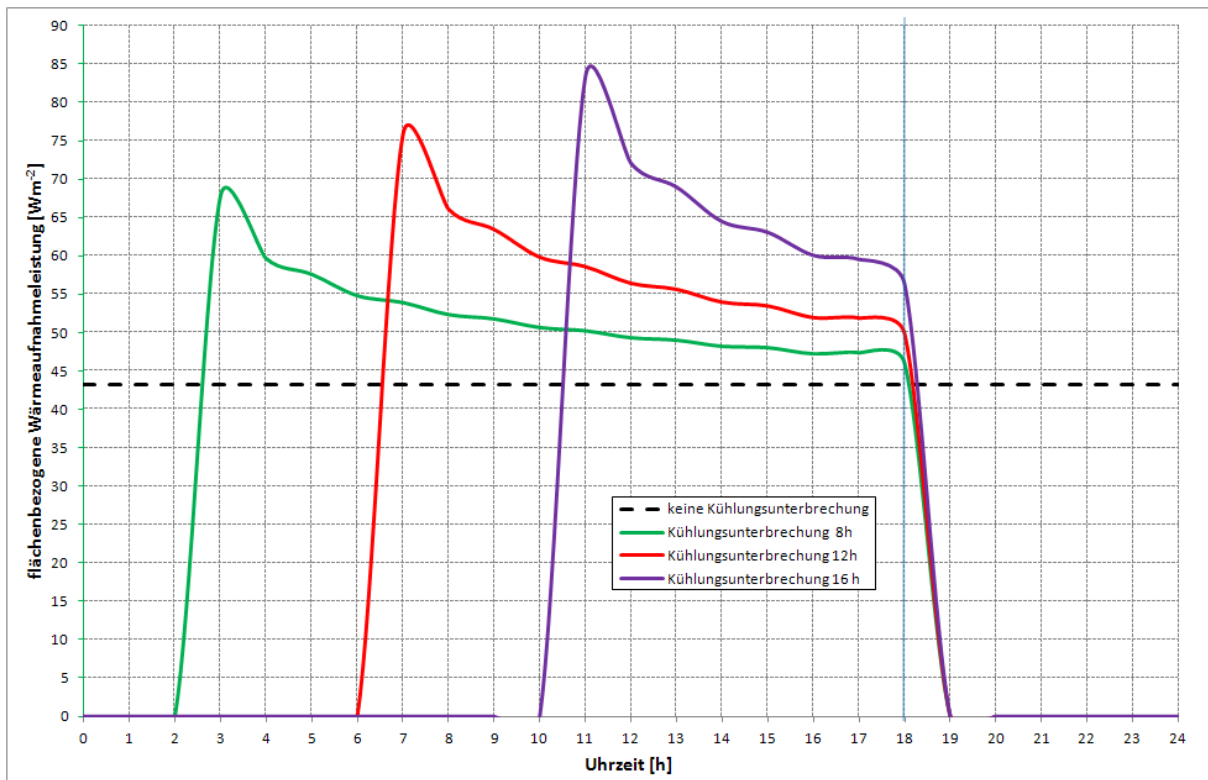


Abb. A.56: Errechnete Tagesverläufe der registerflächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung des Kühlmittels bei unterschiedlicher Dauer der Kühlungsunterbrechung

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 Rohrrinnenseite und Kühlmitteltemperatur größer als im Fall ohne Kühlungsunterbrechung. Es wird somit deutlich mehr Wärme vom Kühlmittel aufgenommen (siehe Abb. A.56).

Wie im Fall der Beheizung kann auch im Fall der Kühlung die mittlere Oberflächentemperatur direkt aus der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung rückgerechnet werden – siehe Gleichung (A.5). 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. 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.

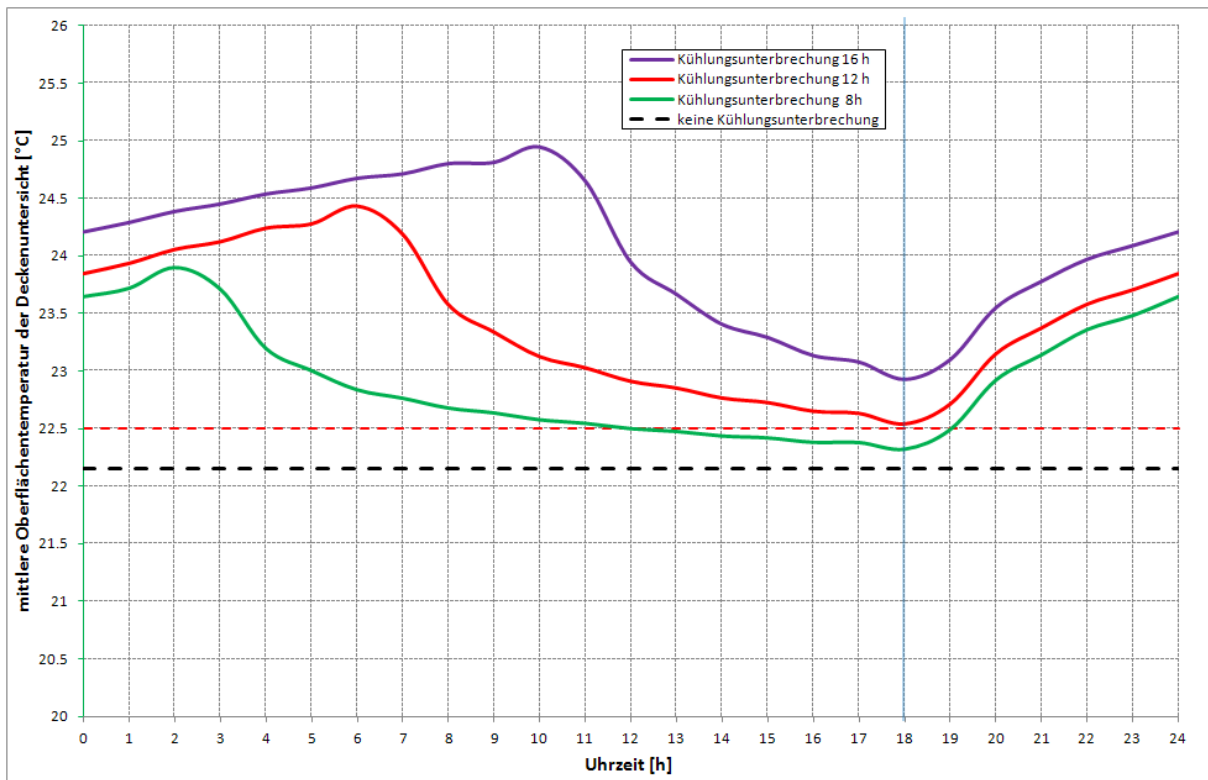


Abb. A.57: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht

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 (26 °C) liegen soll, so ergibt sich für die minimale Oberflächentemperatur ein unterer Grenzwert von 22,0 °C.

Im Zusammenhang mit den in Abb. A.57 gezeigten Temperaturverläufen muss allerdings bedacht werden, dass es sich dort um mittlere Oberflächentemperaturen handelt. Wie die Detailuntersuchung in Abschnitt II.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. A.57 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. A.57). 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. A.57) 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 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 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. A.25: Minimal zulässige Kühlmitteltemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit des Stillstands der Umwälzpumpe

Wird die errechnete minimal zulässige Kühlmitteltemperatur gemäß Tab. A.25 den Simulationen zugrunde gelegt, so ergeben sich folgende Tagesverläufe der Oberflächentemperatur für die Deckenuntersicht.

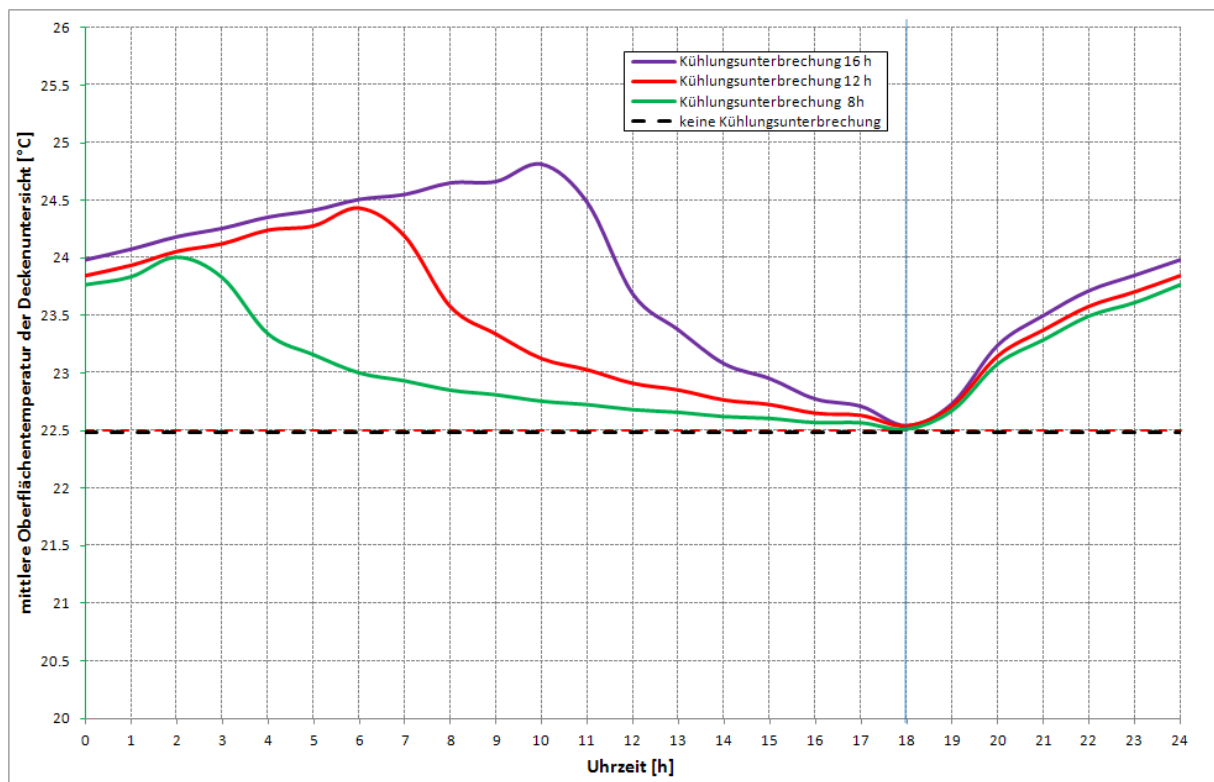


Abb. A.58: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht bei minimaler Kühlmitteltemperatur

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

Ein Vergleich der von dem unter der Decke liegenden Raum während eines Tages aufgenommenen Wärmemengen – siehe zum Vergleich auch Tab. A.24 – 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. A.26: 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.

Abbildung A.58 zeigt, dass auch bei unterbrochenem Kühlungsbetrieb die Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht nicht zu tief abfallen, sodass der Komfort im Raum nicht beeinträchtigt wird.

Abschließend wird das Verhalten einer thermisch aktivierten Decke nach einer endgültigen Abschaltung der Umwälzpumpe untersucht.

Vor der Abschaltung soll das Rohrregister permanent mit einer Kühlmitteltemperatur von 18,7 °C durchströmt werden (siehe Tab. A.25).

Die folgende Abbildung zeigt die Abnahme der mittleren Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht nach der Beendigung der Kühlmittelzufuhr bei auf konstant 26 °C gehaltener Lufttemperatur im Raum.

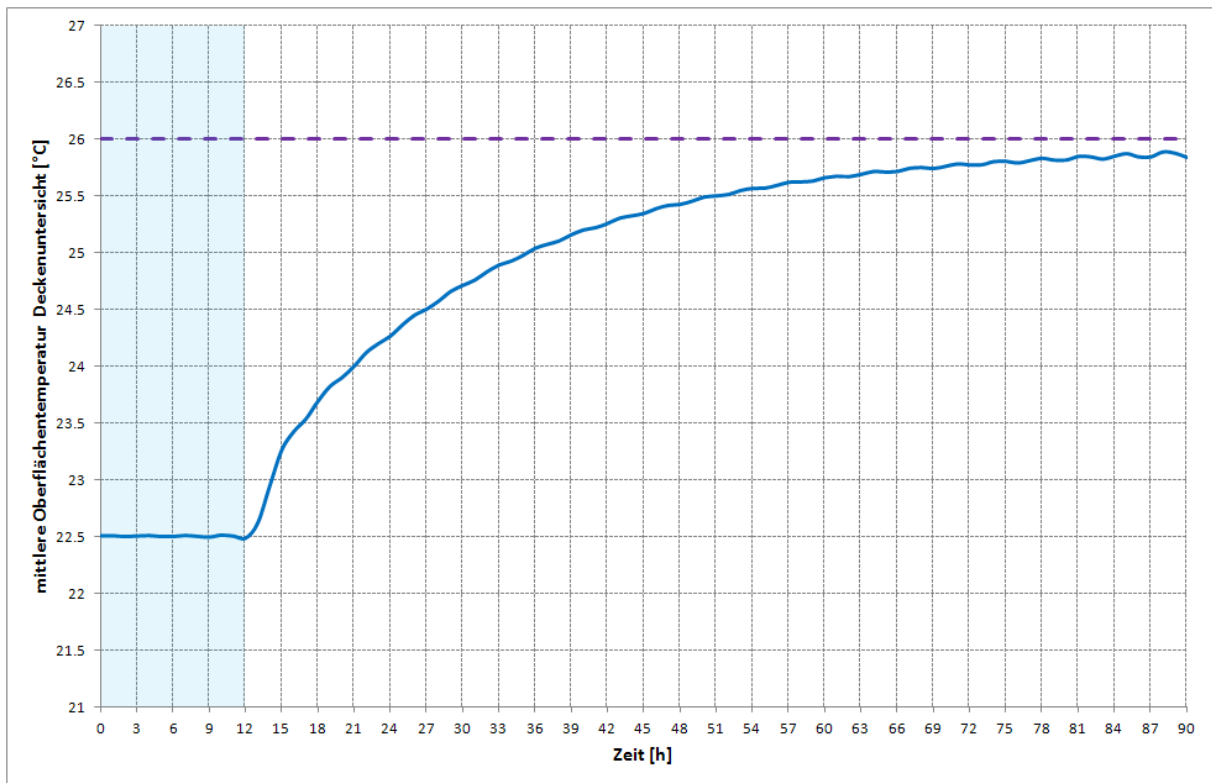


Abb. A.59: Aufheizverhalten der Deckenuntersicht nach Abschaltung der Umwälzpumpe zur Stunde 12

Es zeigt sich, dass die Oberflächentemperatur der Decke nur langsam ansteigt und gegen die Raumlufthtemperatur strebt. 24 Stunden nach Abschaltung der Pumpe ist die Oberflächentemperatur von 22,5 °C auf 25,0 °C angestiegen. Nach weiteren 24 Stunden liegt die Oberflächentemperatur bei 27,7 °C. Wie aus Abb. A.59 ersichtlich, verlangsamt sich die Abkühlung mit fortschreitender Zeit deutlich.

Mit dem Ansteigen der Oberflächentemperatur wird natürlich auch die Wärmeaufnahme aus dem unter der Decke liegenden Raum reduziert. Die folgende Abbildung zeigt den berechneten zeitlichen Verlauf der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung nach Abschaltung der Umwälzpumpe.

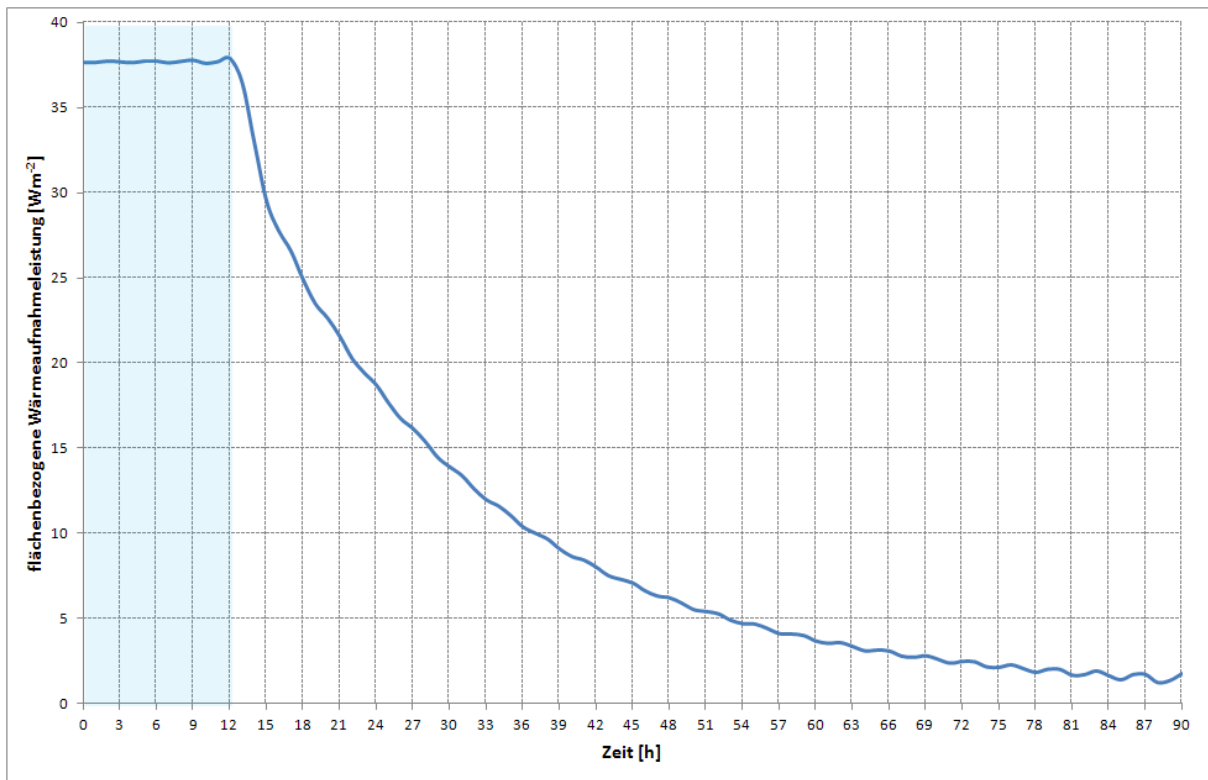


Abb. A.60: Berechneter Zeitverlauf der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke nach Abschaltung der Umwälzpumpe zur Stunde 12

Nach Gleichung (A.5) ergibt sich natürlich eine zu Abbildung A.59 gleiche Kurvenform. Die flächenbezogene Wärmeaufnahmeleistung der thermisch aktivierten Decke geht unmittelbar nach dem Abschalten der Pumpe stärker zurück als im weiteren Zeitverlauf. Die Wärmeaufnahmeleistung sinkt von $37,7 \text{ Wm}^{-2}$ zur Stunde 12 auf $18,7 \text{ Wm}^{-2}$ zur Stunde 24 ab und halbiert sich somit binnen 12 Stunden. Nach insgesamt drei Tagen (Stunde 84) nimmt die Decke immer noch $1,6 \text{ Wm}^{-2}$ aus dem Raum auf.

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. $24,9 \text{ °C}$ noch $1,1 \text{ K}$ 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 Beladungszeit von 8 Stunden (d. h. einer Kühlungsunterbrechung 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.
- Nach einem gänzlichen Abschalten der Umwälzpumpe heizt sich die Decke nur langsam auf. Die Oberflächentemperatur steigt innerhalb von 24 Stunden um ca. 2,5 K an. Im gleichen Zeitraum (1 Tag) geht die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung auf ca. 27% ihres ursprünglichen Werts zurück.

VII.3.2.1 Einfluss der Betonüberdeckung

Bei den bisherigen 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. 10) von 5 cm über 10 cm bis auf 15 cm gesteigert.

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.

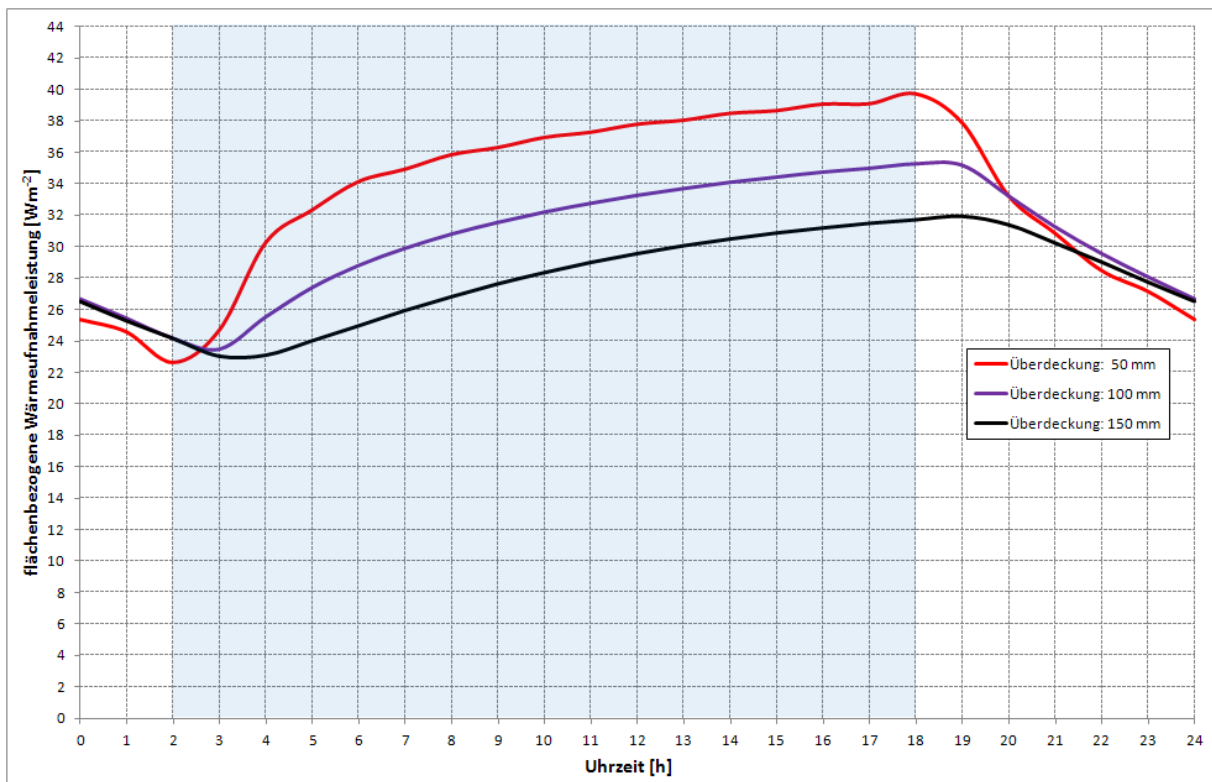


Abb. A.61: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr

Die unterschiedliche Position des Rohrregisters wirkt sich dahin gehend aus, dass während des Betriebs der Umwälzpumpe (in Abb. A.61 blau hinterlegt) die Wärmeaufnahme der Geschoßdecke 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. A.61 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. A.27: 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.

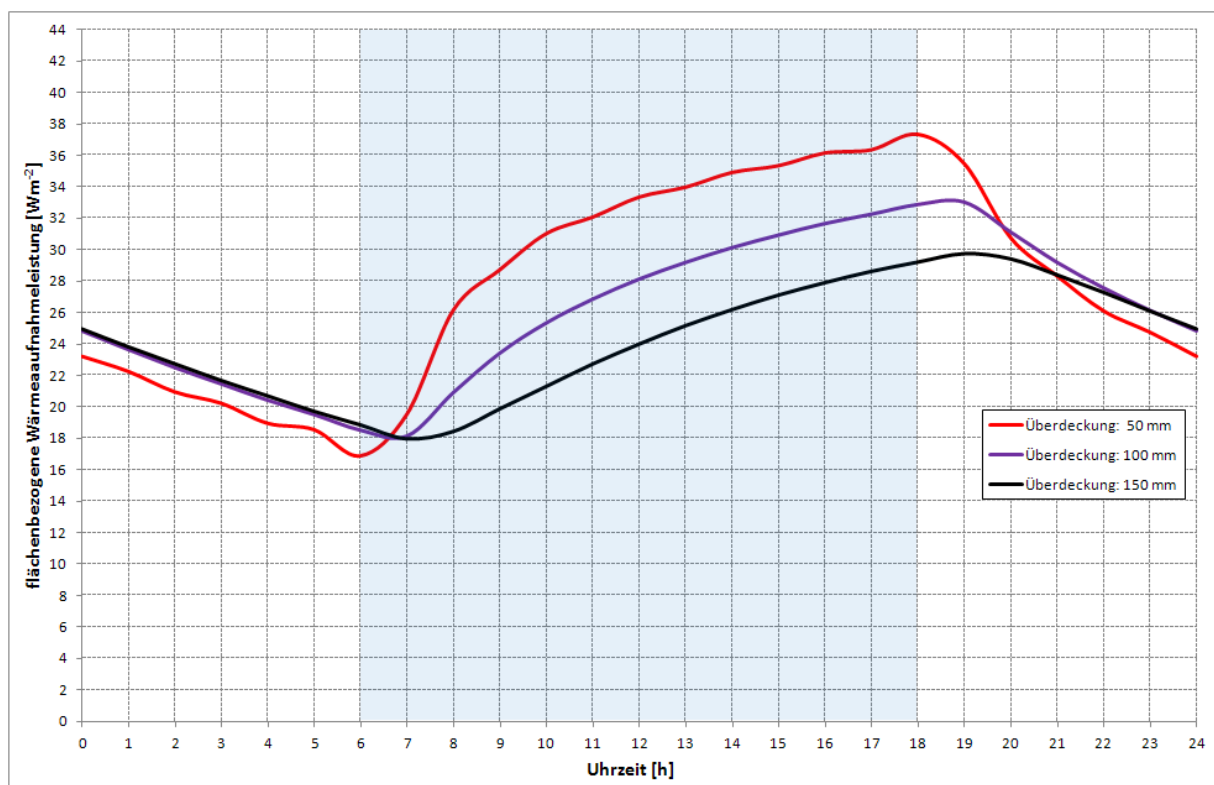


Abb. A.62: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei einer **12-stündigen** Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr

Im Vergleich zu Abb. A.61 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 an den unter der aktivierten Decke gelegenen Raum abgegebenen flächenbezogenen Wärmemengen angegeben.

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

Tab. A.28 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. A.27).

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

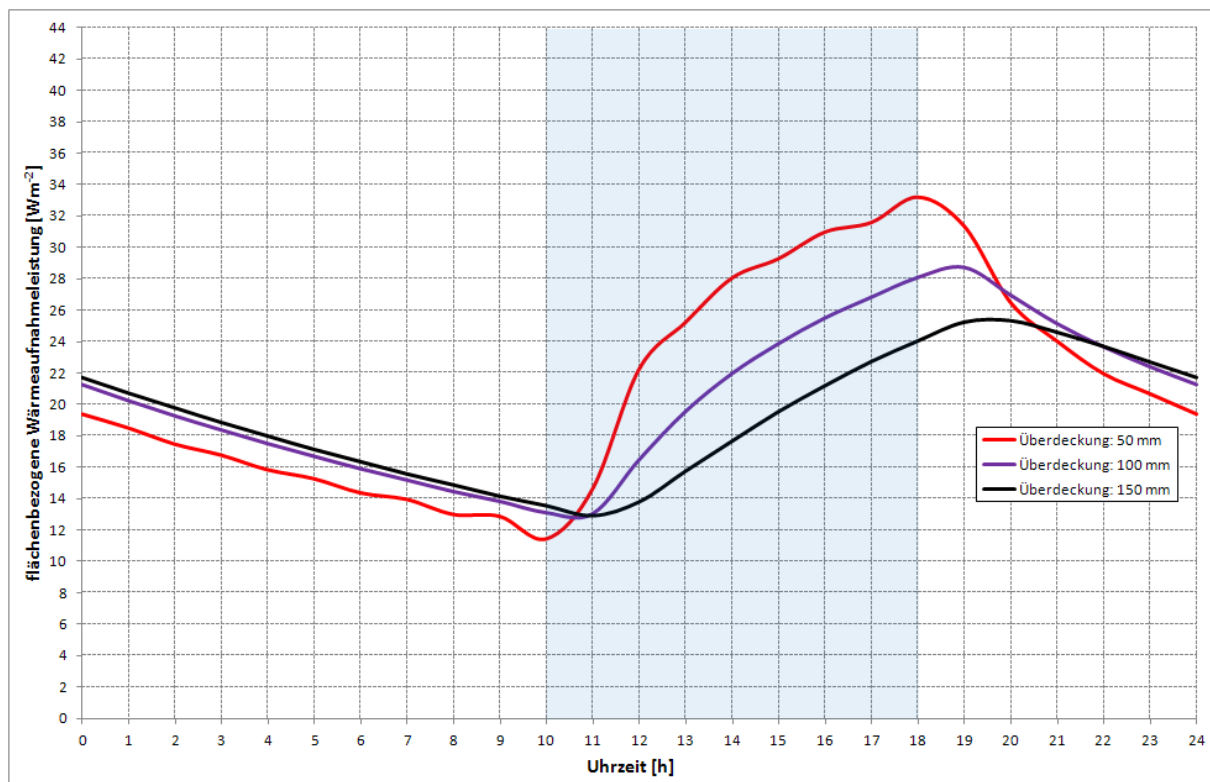


Abb. A.63: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Decke aus dem unter der Decke liegenden Raum bei einer **16-stündigen** Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr

Im Vergleich zu den Abbildungen A.61 und A.62 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. A.29: 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.

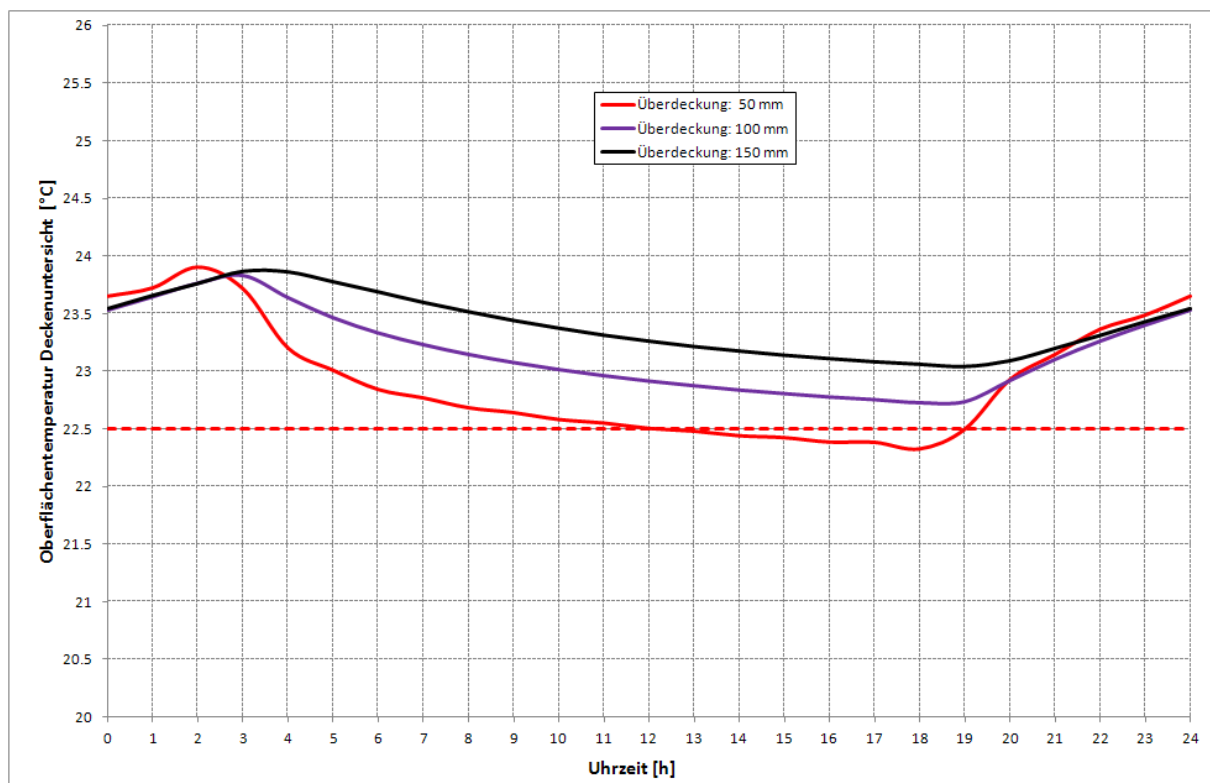


Abb. A.64: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **8-stündigen** Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr; Kühlmitteltemperatur: 18 °C

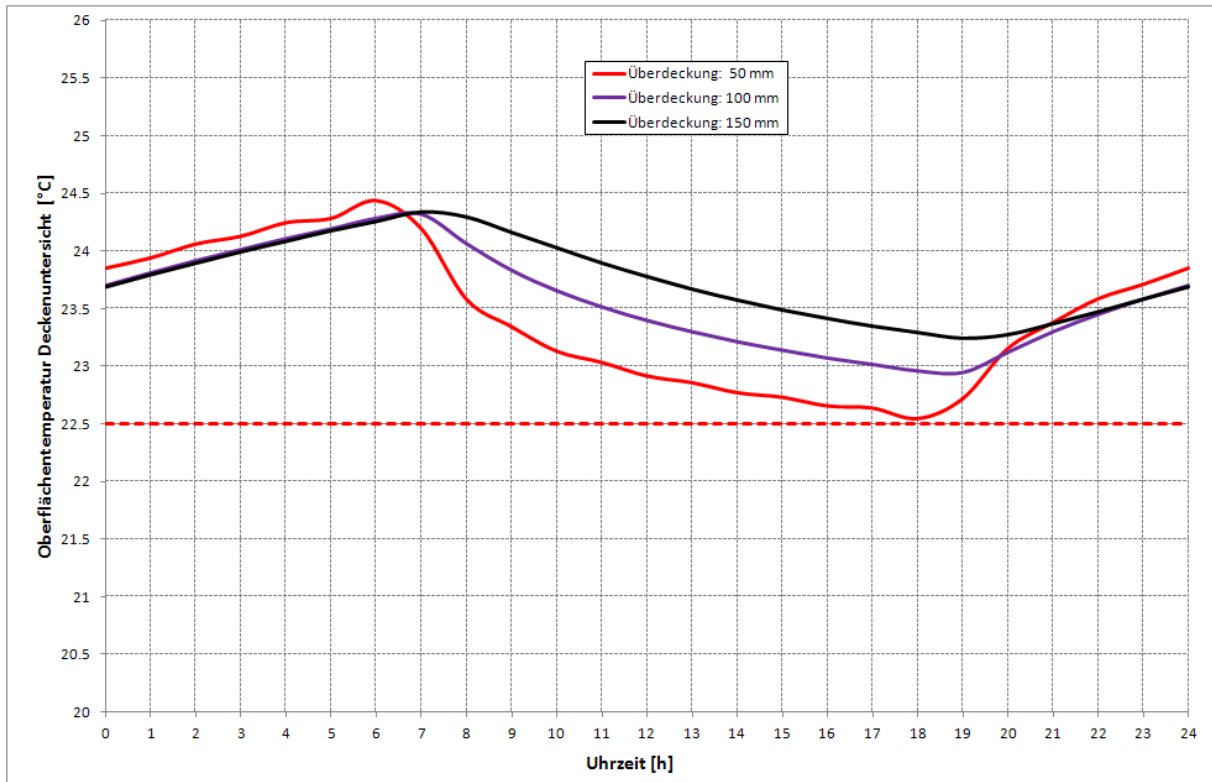


Abb. A.65: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **12-stündigen** Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr; Kühlmitteltemperatur: 18 °C

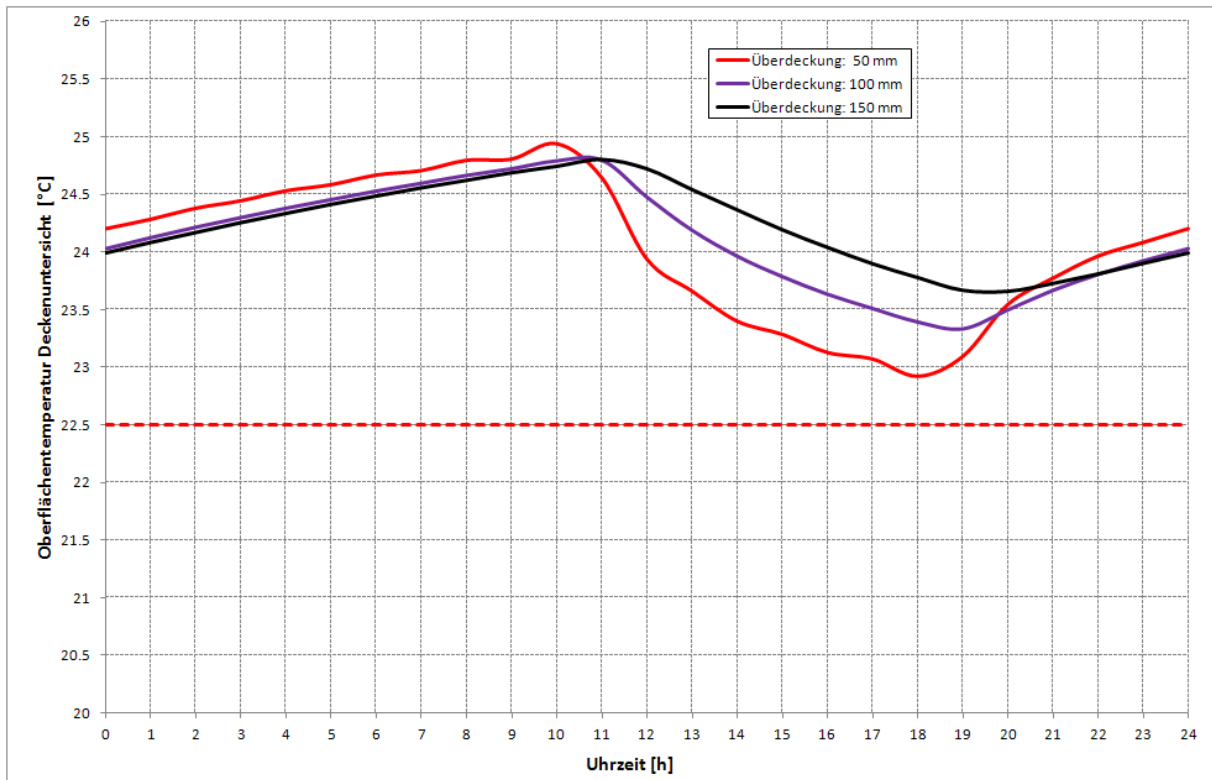


Abb. A.66: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur einer thermisch aktivierten Decke bei einer **16-stündigen** Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr; Kühlmitteltemperatur: 18 °C

Es zeigt sich, dass die gewählte Kühlmitteltemperatur von 18 °C bei einer 8-stündigen Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr (Abb. A.64) 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. A.65) 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. A.66) 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. A.30: 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 12-stündiger 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. A.30 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. A.31: 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. A.31 dienen der leichteren Orientierung und beziehen sich auf die maximale für einen Tag errechnete Wärmeaufnahmemenge. 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 Wärmeaufnahmeleistung 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 Wärmeaufnahmeleistung aus dem unter der thermisch aktivierten Decke gelegenen Raum.
- Die pro Tag dem Raum entzogene flächenbezogene Wärmemenge 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 Deckenunterseite 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 Deckenunterseite im Tagesverlauf nicht unterschritten wird, so ist die während eines Tages von der thermisch aktivierten Decke aufgenommene Wärmemenge 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.

VII.3.2.2 Einfluss der Plattendicke

Bisher wurden die Berechnungen der Wärmeaufnahmeleistungen für eine Geschoßdecke mit dem in Tab. 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 Verhalten der thermisch aktivierten Decke bei unregelmäßiger Wärmeabfuhr beeinflusst.

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 Tabelle A.30 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).

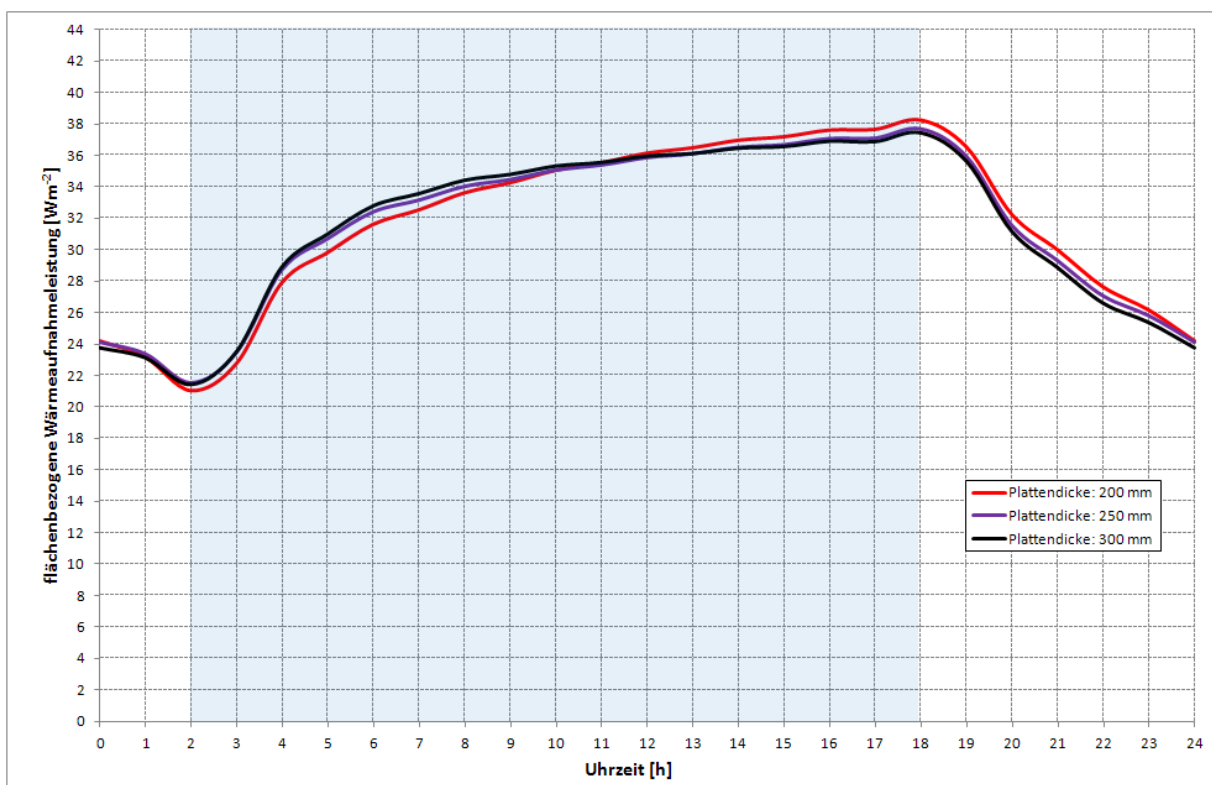


Abb. A.67: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **8 h**

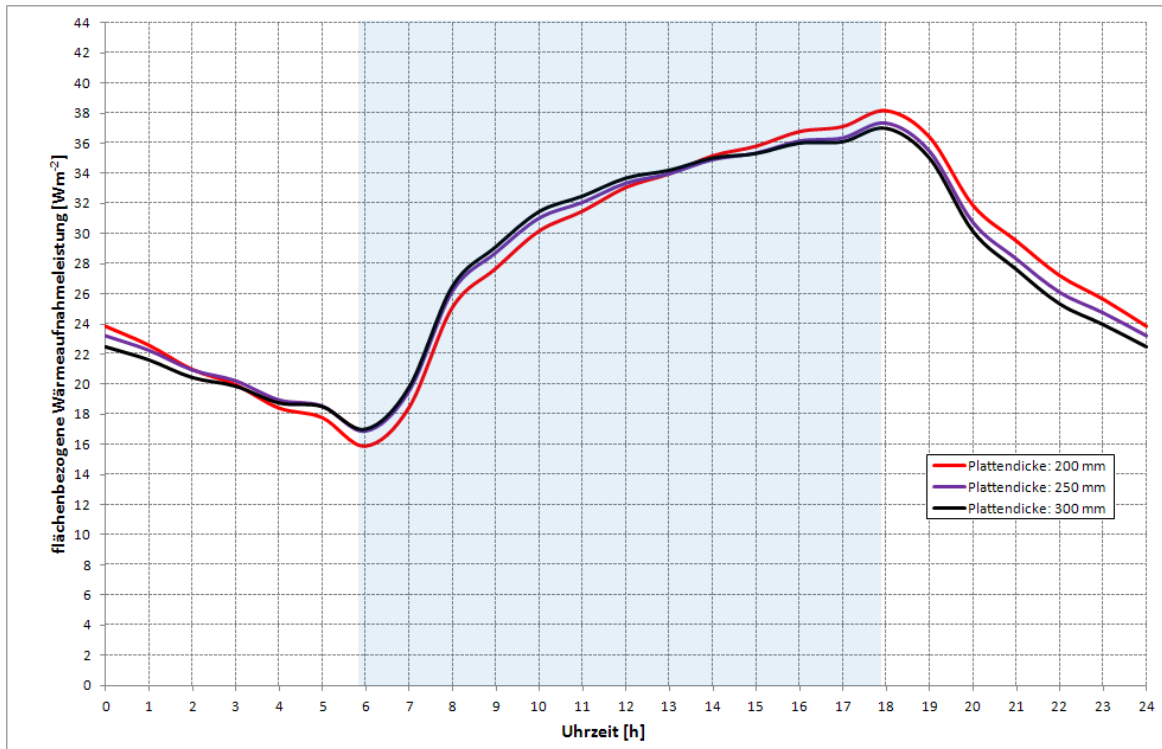


Abb. A.68: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **12 h**

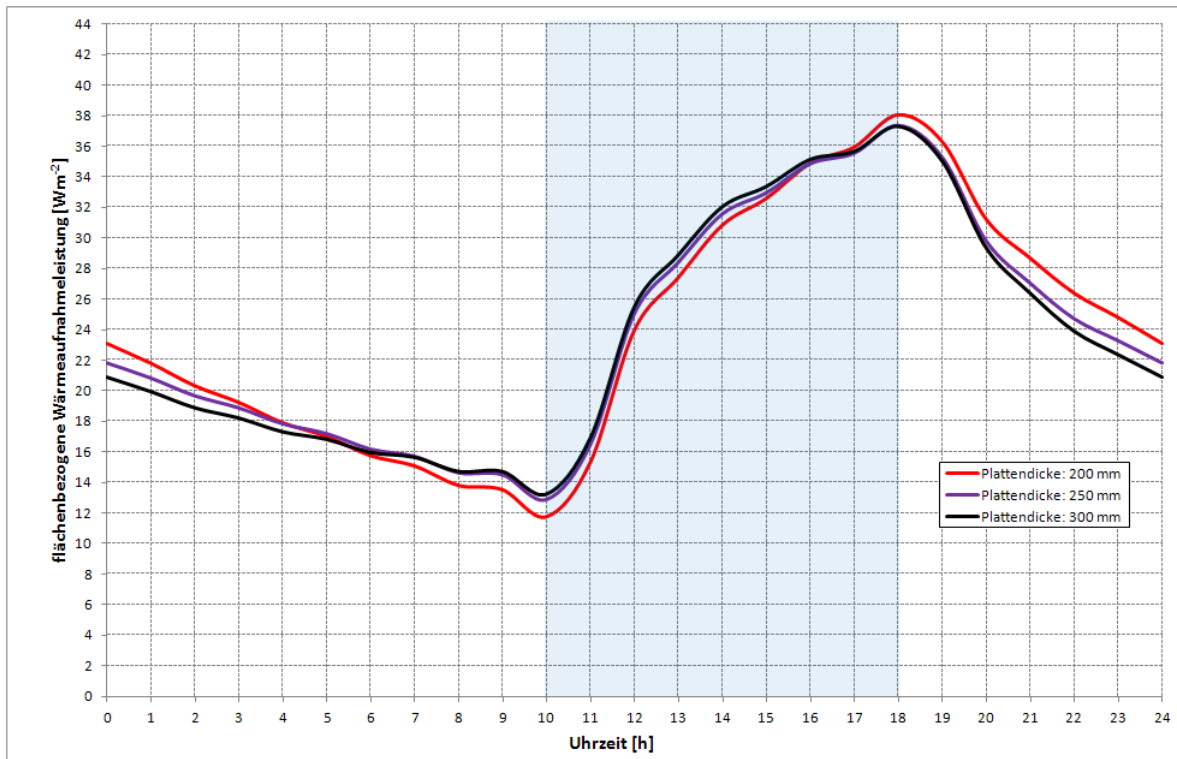


Abb. A.69: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **16 h**

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. A.69 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.

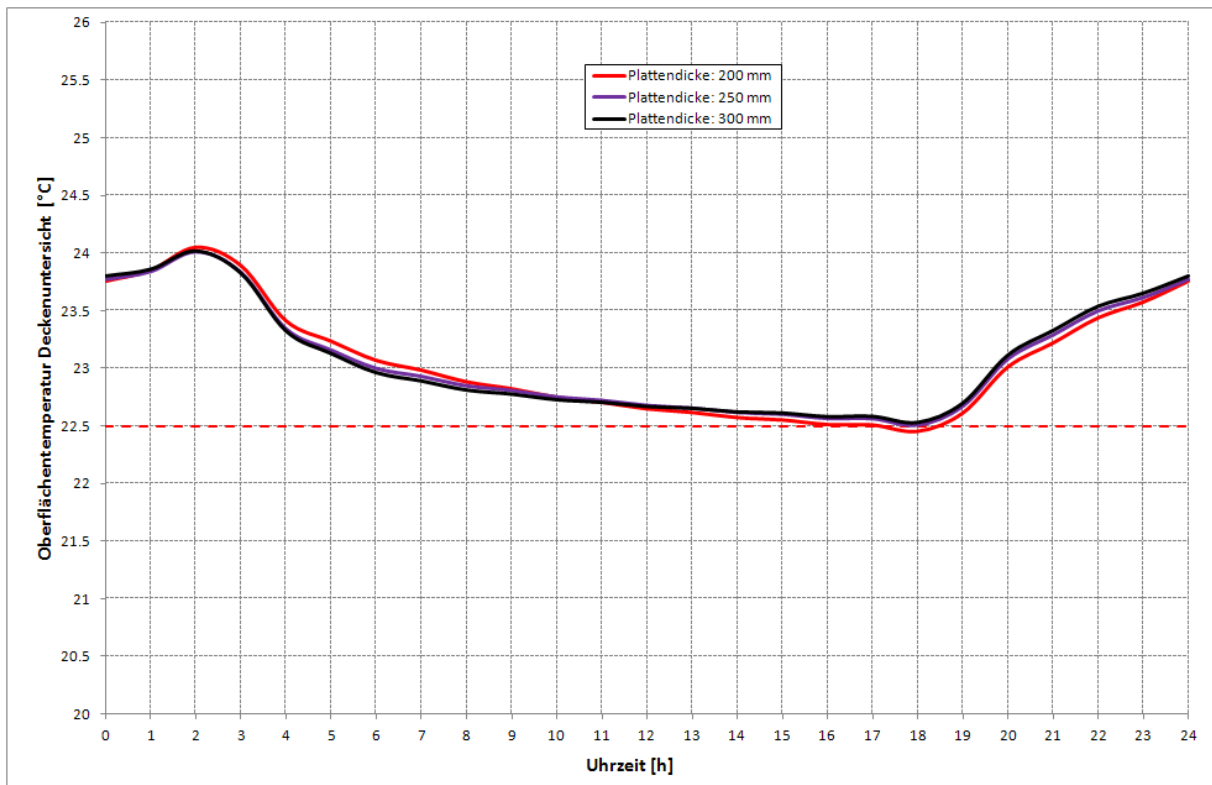


Abb. A.70: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **8 h**

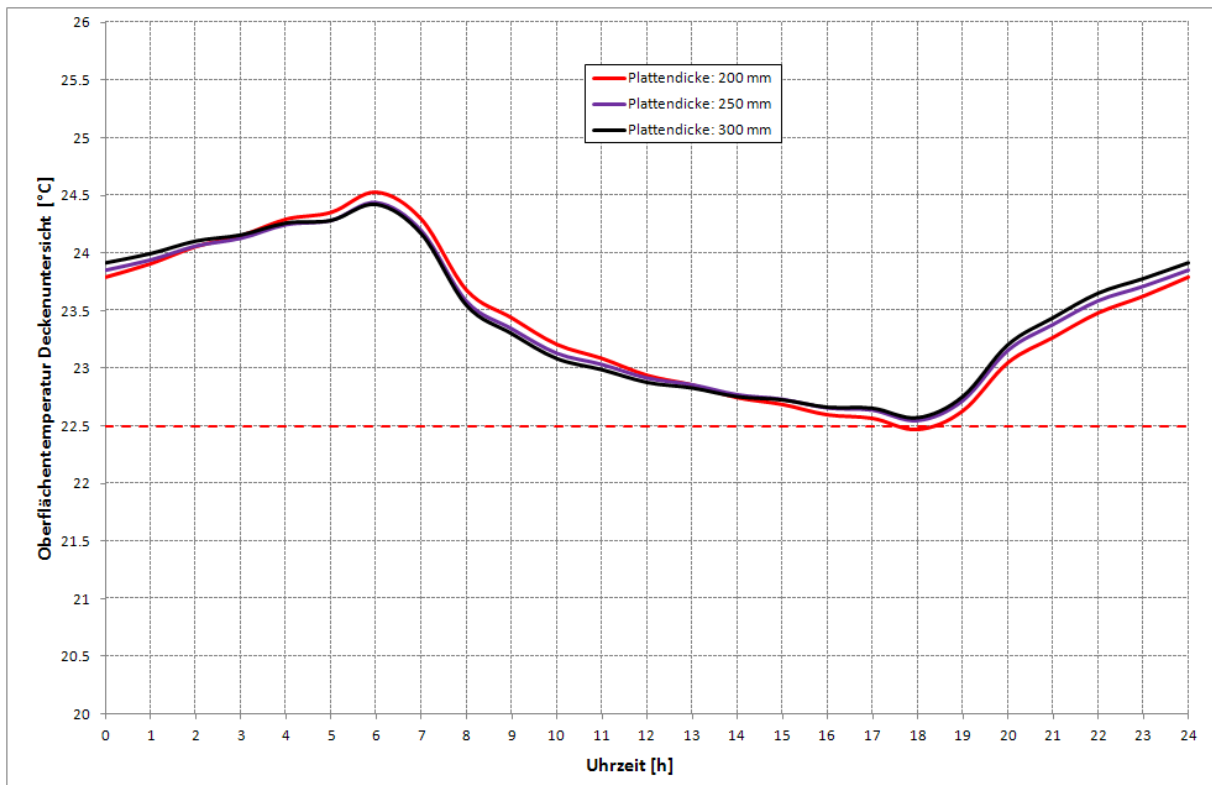


Abb. A.71: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **12 h**

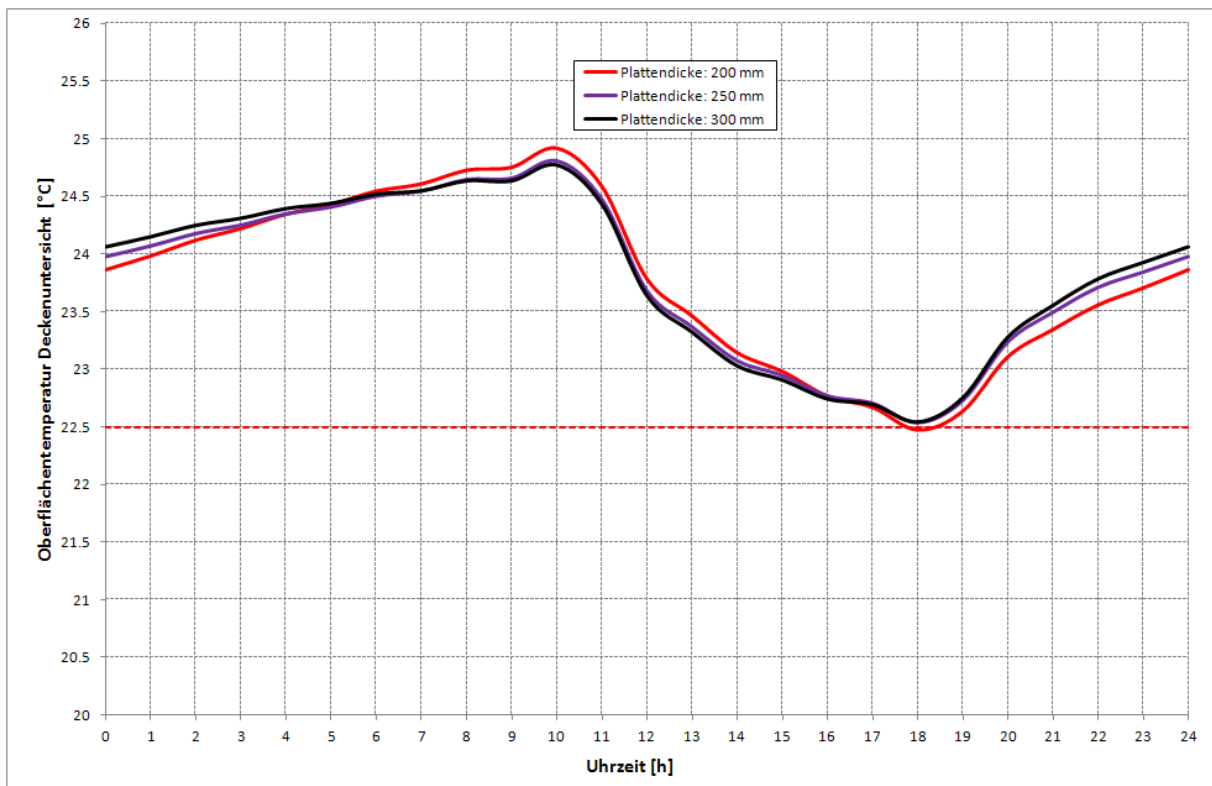


Abb. A.72: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **16 h**

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 $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in einem engen Zeitraum um den Zeitpunkt des Abschaltens der Kühlmittelzufuhr um 18^{00} . 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. A.30). Für eine Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr von 8 Stunden werden nun für die Kühlmitteltemperatur $16,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, für 12 h $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und für 16 h $14,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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.

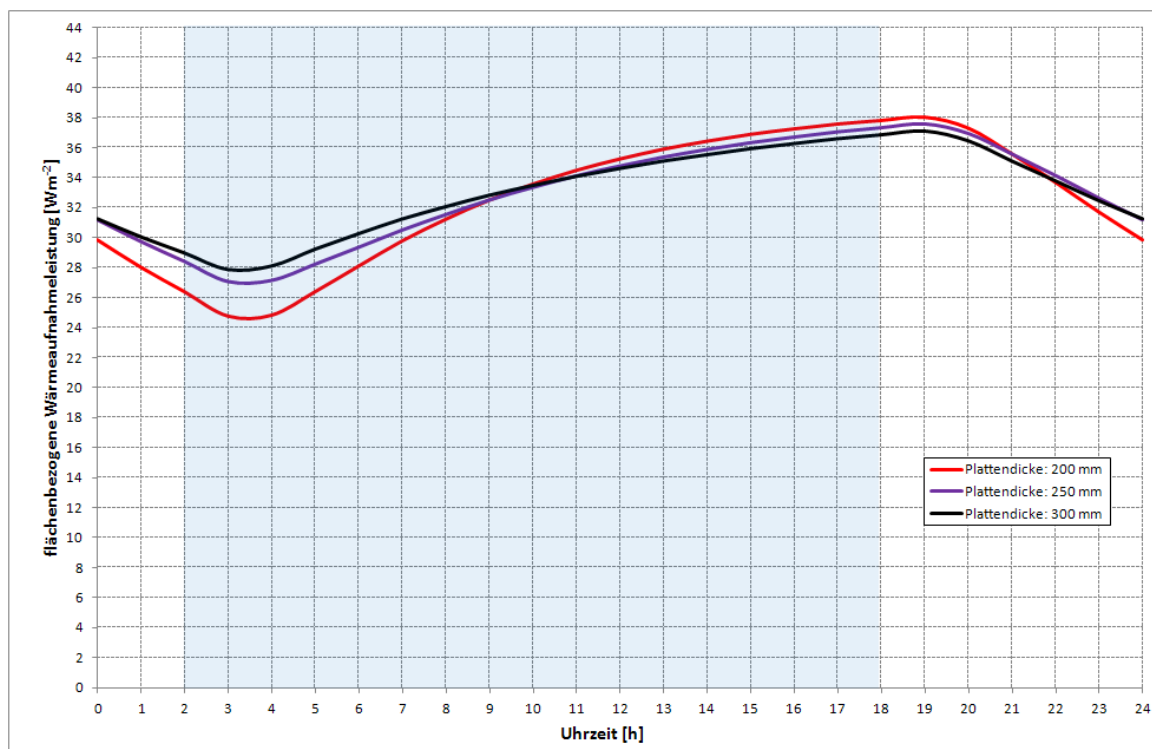


Abb. A.73: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **8 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

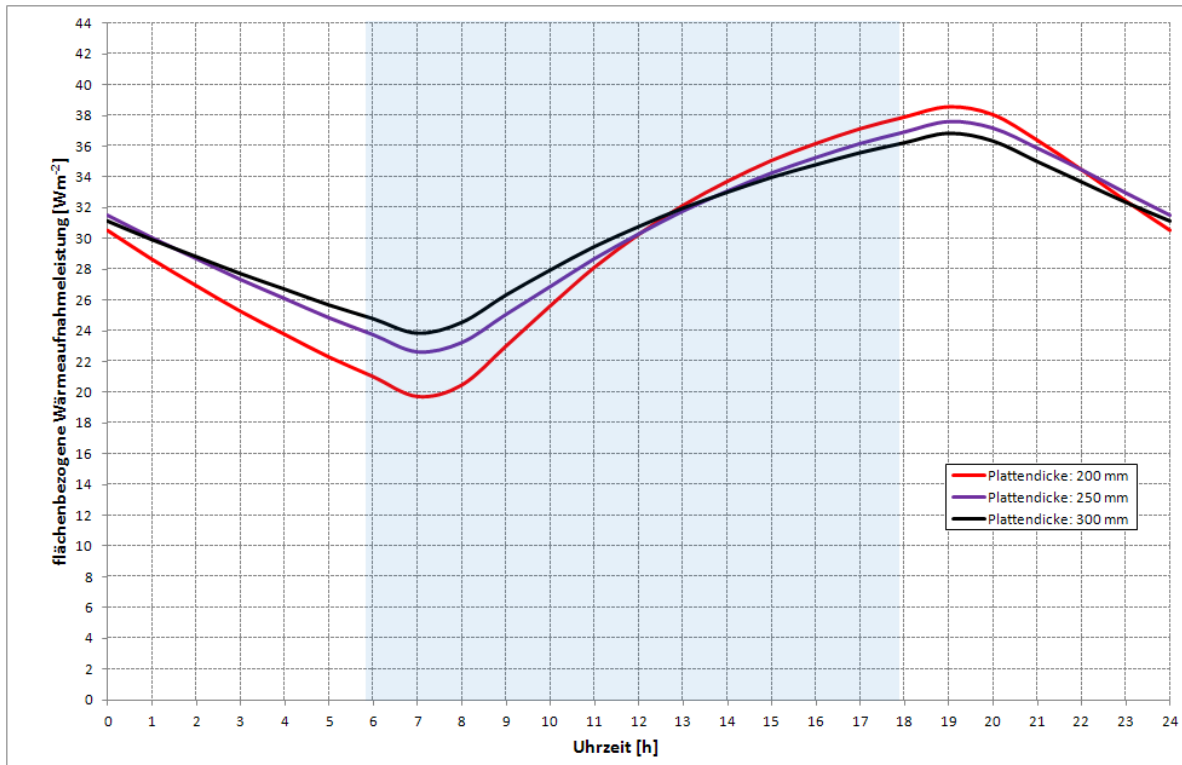


Abb. A.74: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **12 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

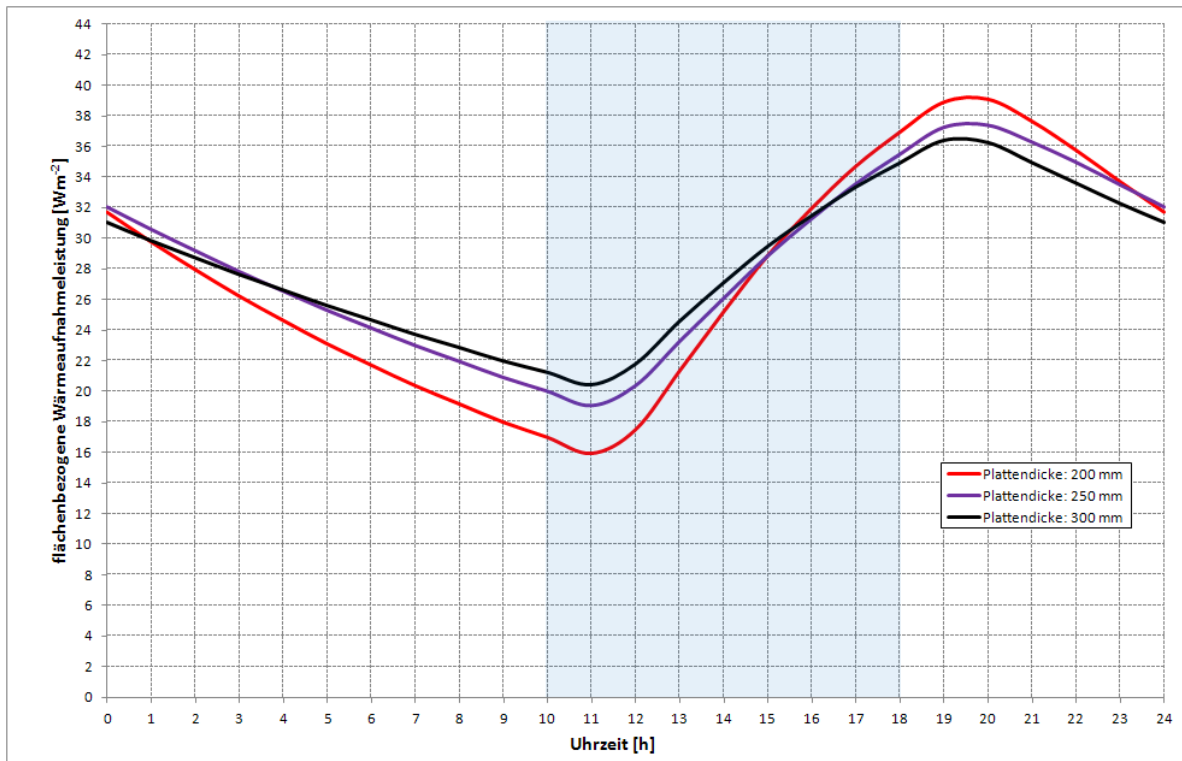


Abb. A.75: Errechnete Tagesverläufe der flächenbezogenen Wärmeaufnahmeleistung einer thermisch aktivierten Geschoßdecke aus dem unter der Decke liegenden Raum für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **16 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 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.

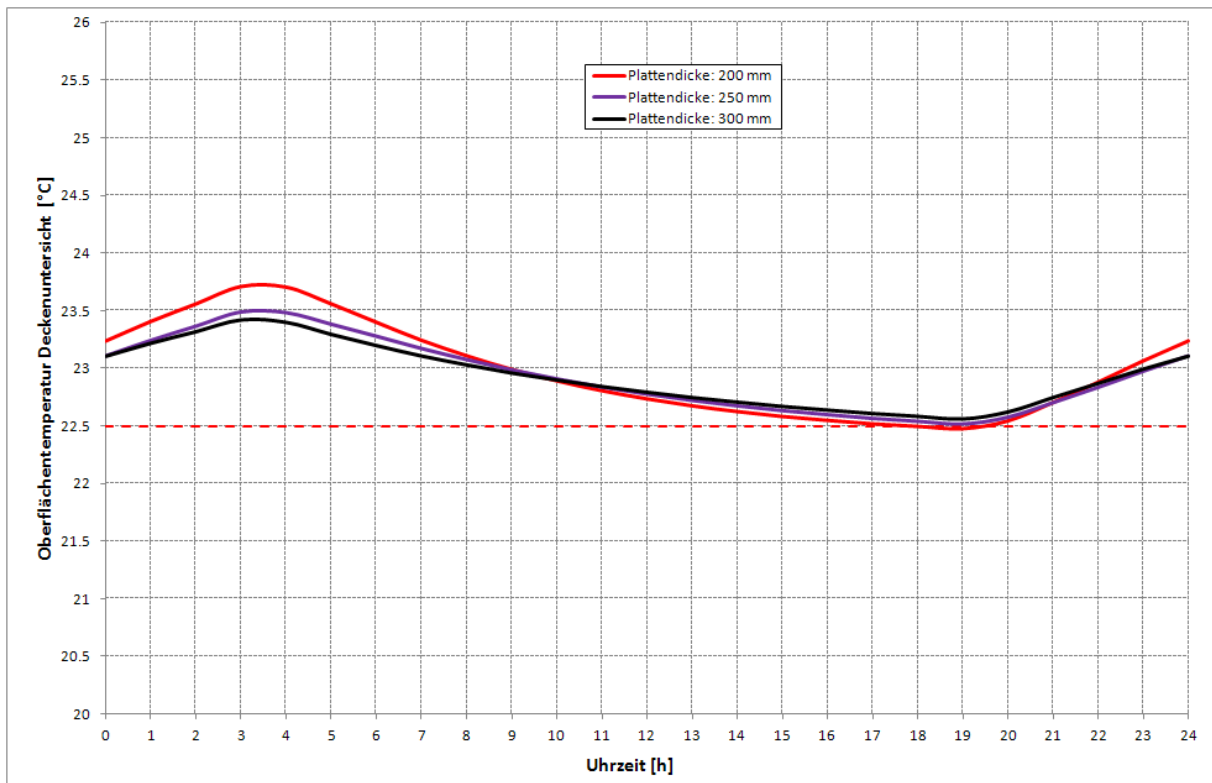


Abb. A.76: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **8 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

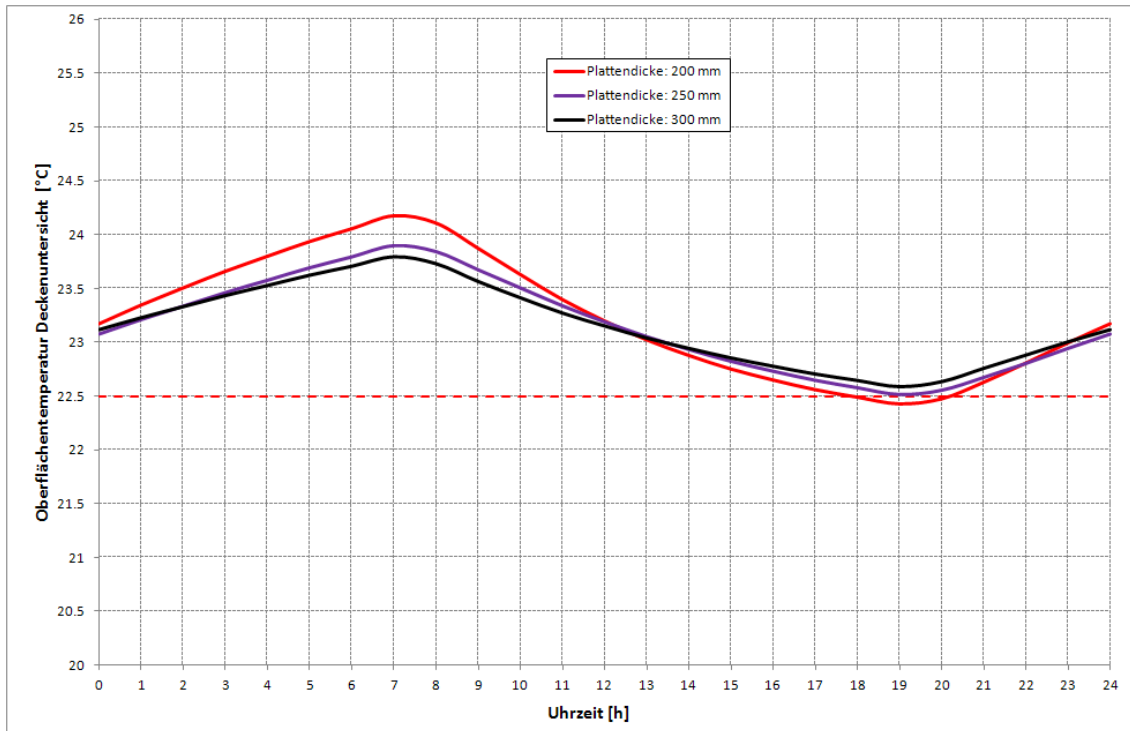


Abb. A.77: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **12 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

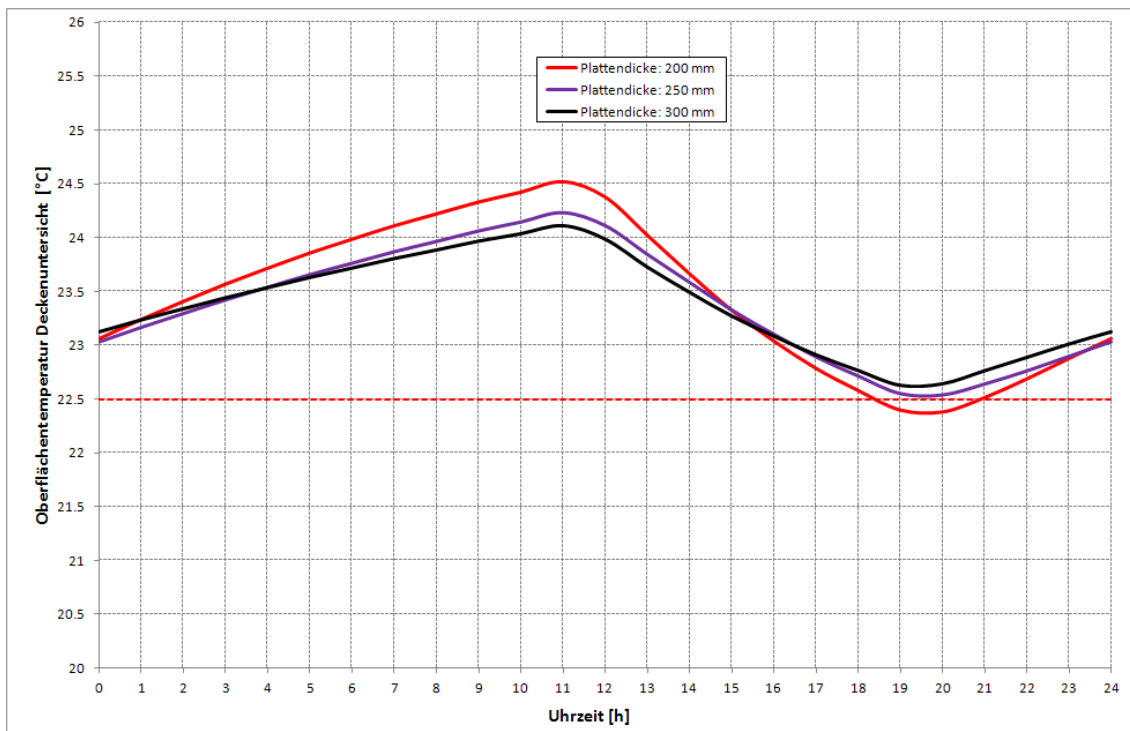


Abb. A.78: Errechnete Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Untersicht einer thermisch aktivierten Geschoßdecke für unterschiedliche Dicken der Stahlbetonplatte; Dauer der Unterbrechung der Heizmittelzufuhr: **16 h**; Betonüberdeckung des Rohrregisters: 15 cm

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.

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 den Abbildungen A.70 bis A.72 und A.76 bis A.78 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 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 Wärmeaufnahmeleistung 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.

VII.3.2.3 Auswirkung auf die operative Temperatur

Die bisher in Abschnitt VII.3.2 durchgeführten Untersuchungen waren bauteilbezogen. Die Lufttemperaturen sowohl im über als auch im unter der Geschoßdecke liegenden Raum wurde dabei tageszeitlich konstant auf 26 °C gesetzt.

Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich eine Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr auf den thermischen Komfort im zu beheizenden Raum auswirkt. Als Raum soll exemplarisch auch hier der in Abschnitt III.1 vorgestellte Modellraum dienen. In Anlehnung an die in Abschnitt V.2 dargelegten Überlegungen soll sich der Raum in einem Passivhaus mit Standort Wien, Innere Stadt, befinden. Diese Wahl kann als besonders kritisch für den thermischen Komfort im Raum angesehen werden („Worstcase-Szenario“).

Bezüglich der Lage des Rohrregisters wird die Betonüberdeckung mit 5 cm angesetzt. Wie in Abschnitt V.2 wird auch hier ein Achsabstand der Rohre von 20 cm angesetzt. Berechnet

werden der Tagesgang der Innenlufttemperatur im Raum sowie die Tagesgänge sämtlicher Oberflächentemperaturen für den Fall eines mittleren Juli-Tages in der inneren Stadt in Wien.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der inneren Oberflächentemperaturen für alle raumbegrenzenden Bauteile des Modellraums für den Fall, dass die Kühlmittelzufuhr von 18⁰⁰ bis 2⁰⁰ unterbrochen ist. Die Temperatur des Kühlmittels wurde hierbei tageszeitlich konstant auf 23,0 °C gesetzt. Mit dieser Kühlmitteltemperatur ist unter Berücksichtigung der 8-stündigen Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr garantiert, dass die operative Raumtemperatur im Tagesverlauf nie über die auf 26 °C gesetzte Obergrenze der Solltemperatur ansteigt.

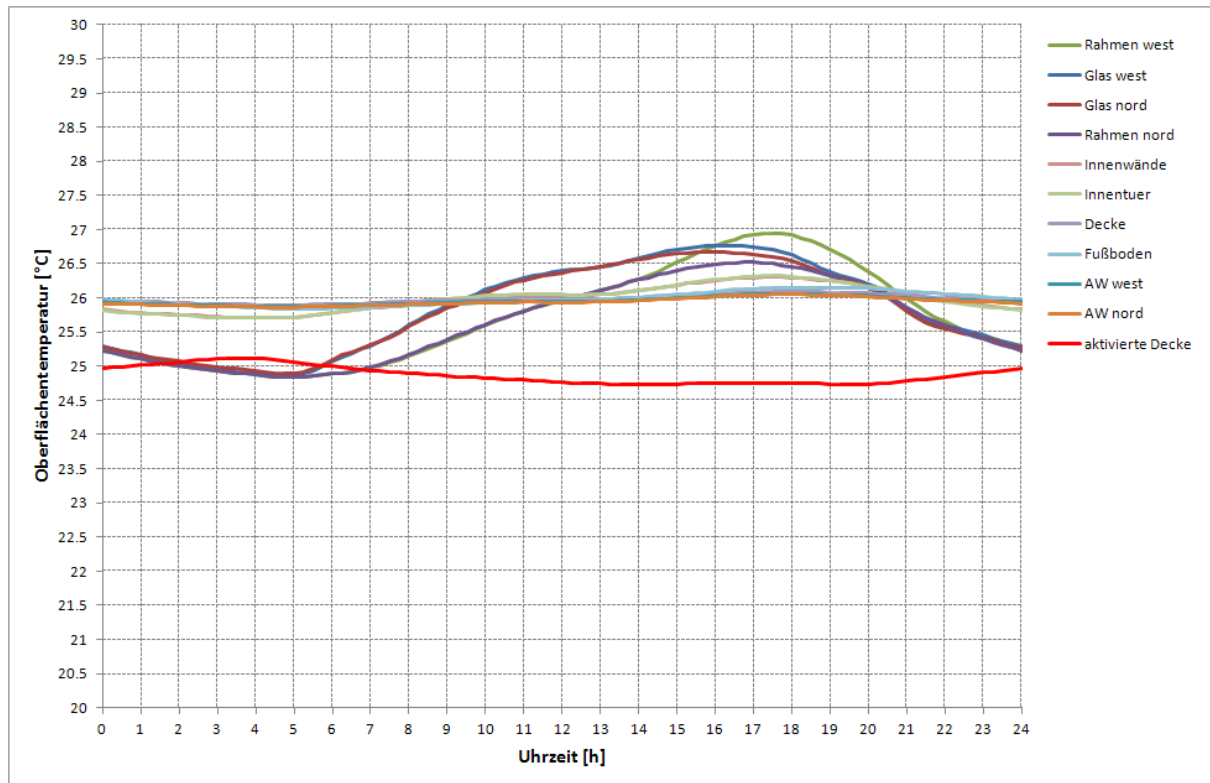


Abb. A.79: Errechnete Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen an den Innenseiten der raumbegrenzenden Bauteile; Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr: **8 h**

Unter Berücksichtigung der in Abb. A.79 gezeigten Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen und des nach der Simulation ebenfalls vorliegenden Tagesverlaufs der Raumlufttemperatur wird in der Folge der Tagesgang der operativen Raumtemperatur berechnet.

Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der operativen Temperatur für drei verschiedene Lagen des Rohrregisters (Betonüberdeckung 5, 10 und 15 cm). Die Dauer der Unterbrechung der Heizmitteltemperatur wurde hierbei mit 8 Stunden (6⁰⁰ bis 14⁰⁰) unverändert beibehalten.

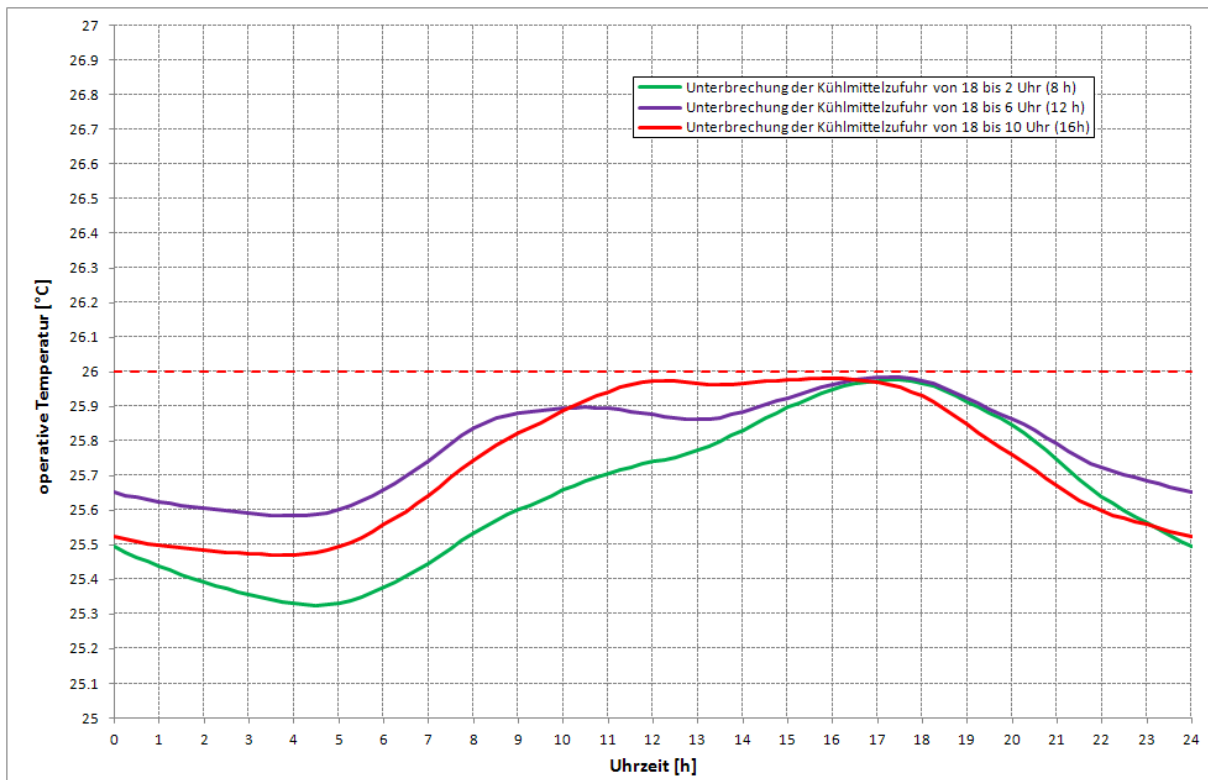


Abb. A.80: Errechnete Tagesverläufe der operativen Temperatur im Raum für einen mittleren Juli-Tag; Betonüberdeckung des Rohrregisters: **5 cm**

Bei Beachtung der Skalierung der operativen Temperatur auf der Ordinate von Abb. A.80 wird klar, dass die operative Temperatur im Raum auch bei länger dauernder Abschaltung der Kühlmittelzufuhr nur eine sehr kleine Tagesschwankung aufweist. Das Maximum der operativen Temperatur tritt bei der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr von 8 und 12 Stunden Dauer zwischen 17⁰⁰ und 18⁰⁰ auf und liegt – wie gefordert - bei ca. 26 °C. Dies wurde erreicht, indem die Kühlmitteltemperatur in Schritten von 0,1 K solange variiert wurde bis die Obergrenze der Solltemperatur von 26 °C im Tagesverlauf nicht (ganz) erreicht wird.

Im Zuge dieser Variantenrechnung zeigte sich, dass mit Verlängerung der Unterbrechungsdauer der Kühlmittelzufuhr die Kühlmitteltemperatur deutlich abgesenkt werden muss. Wie schon angemerkt, ist bei einer Unterbrechung der Heizmittelzufuhr von 6⁰⁰ bis 14⁰⁰ zur Einhaltung der Solltemperatur eine Kühlmitteltemperatur von 23,0 °C notwendig. Für eine 12-stündige Unterbrechungsdauer sinkt dieser Wert auf 22,5 °C ab. Bei einer Kühldauer von 10⁰⁰ früh bis 18⁰⁰ (8 Stunden), d. h. einem Stillstand der Umwälzpumpe von 18⁰⁰ bis 10⁰⁰ sind 20,8 °C Kühlmitteltemperatur zur Erreichung des in Abb. A.80 gezeigten Tagesgangs der operativen Temperatur notwendig. Ersichtlich ist diese Betriebsart geeignet, die operative Temperatur während eines Großteils des Tages fast konstant knapp unter 26 °C zu halten.

Die niedrigeren Kühlmitteltemperaturen bewirken, dass sich die Tagesschwankungen der operativen Temperatur etwas erhöhen. Allerdings ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass auch die höchste Tagesschwankung der operativen Temperatur von knapp 0,7 K (bei 16-stündiger Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr) kaum wahrnehmbar sein und jedenfalls den thermischen Komfort im Raum nicht beeinträchtigen wird.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die entsprechenden Ergebnisse der Simulationen für eine Betonüberdeckung von 10 und 15 cm.

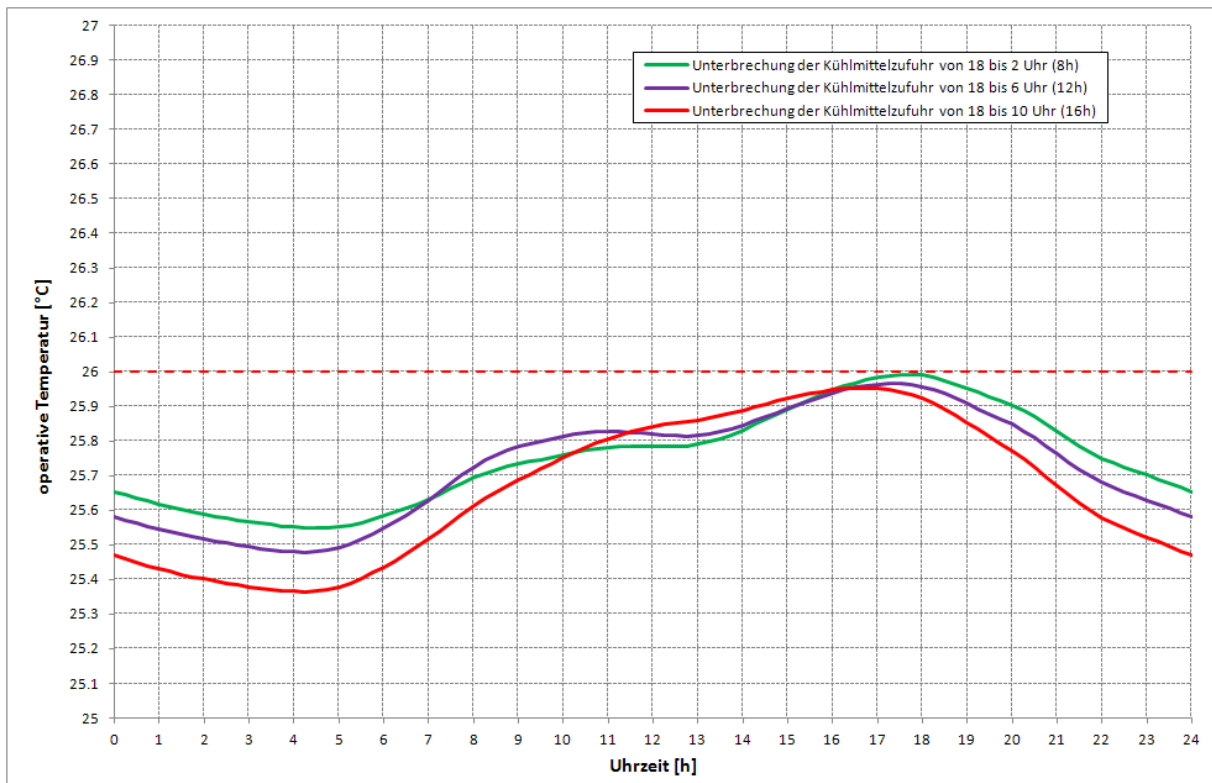


Abb. A.81: Errechnete Tagesverläufe der operativen Temperatur im Raum für einen mittleren Juli-Tag; Betonüberdeckung des Rohrregisters: **10 cm**

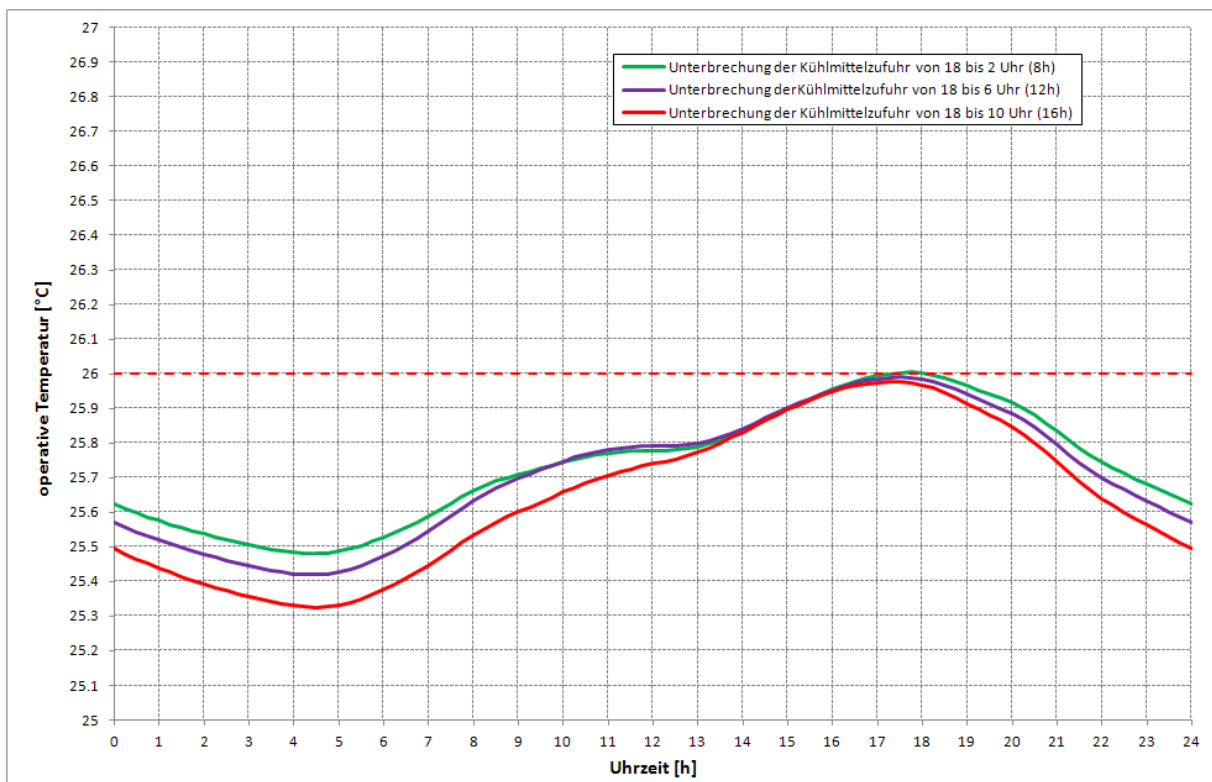


Abb. A.82: Errechnete Tagesverläufe der operativen Temperatur im Raum für einen mittleren Juli-Tag; Betonüberdeckung des Rohrregisters: **15 cm**

Es zeigt sich, dass die Lage des Rohrregisters den Tagesgang der operativen Temperatur merkbar beeinflusst.

Zusammenfassend sind in folgender Tabelle die zur Erreichung der in den Abbildungen A.80 bis A.82 gezeigten Tagesgänge der operativen Temperatur erforderlichen Kühlmitteltemperaturen aufgelistet.

Betonüberdeckung	Kühlmitteltemperatur [°C] bei		
	8 h Unterbrechung	12 h Unterbrechung	16 h Unterbrechung
5 cm	23,0	22,5	20,8
10 cm	22,4	21,9	20,5
15 cm	22,3	21,6	20,2

Tab. A.32: Zur Einhaltung einer Obergrenze der operativen Temperatur von 26 °C erforderliche Kühlmitteltemperaturen

Bei Vergrößerung der Unterbrechungsdauer der Kühlmittelzufuhr muss die Kühlmitteltemperatur deutlich abgesenkt werden. Eine weit weniger ausgeprägte Absenkung der Kühlmitteltemperatur ist notwendig, wenn die Betonüberdeckung vergrößert wird. Bemerkenswert ist, dass in allen untersuchten Fällen die notwendige Kühlmitteltemperatur deutlich über 18 °C liegt. Nochmals angemerkt sei in diesem Zusammenhang, dass dieses Ergebnis für einen mittleren Juli-Tag in Wien, Innere Stadt, für ein Passivhaus und eine Registerfläche von 24,7 m² (70% der Deckenfläche) erhalten wurde.

Conclusio:

Die durchgeführten Simulationsrechnungen zur Kühlung des Modellraums mittels thermischer Aktivierung der Geschoßdecke führen auf folgende Ergebnisse:

- Bei allen Berechnungsvarianten bleibt die Tagesschwankung der operativen Temperatur unter 0,7 K und ist daher kaum merkbar. Der hohe thermische Komfort im Raum bleibt auch bei lang andauernder Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr erhalten.
- Bei Verlängerung der Dauer der Unterbrechung der Kühlmittelzufuhr ist die Kühlmitteltemperatur deutlich abzusenken. Bei erhöhter Betonüberdeckung des Rohrregisters ist hingegen nur eine vergleichsweise geringfügige Absenkung der Kühlmitteltemperatur notwendig, um die operative Temperatur im gewünschten Bereich zu halten.