

6. März 2017

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

Energiespeicher Beton

Detailuntersuchungen 2016/17

Ao. Univ. Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Klaus Kreč
Büro für Bauphysik
A-3562 Schönberg am Kamp, Veltlinerstraße 9
Österreich
Tel. +43-2733-8780 Fax +43-2733-78016
email: dr.krec@aon.at

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung.....	4
I. Auskühlverhalten eines Raums in einem Passivhaus mit thermisch aktivierter Decke.....	4
I.1 Eckdaten des Modellraums.....	4
I.1.1 Bauteilaufbauten	5
I.1.2 Bauteilflächen.....	6
I.2 Außenklimatische Bedingung.....	7
I.2.2 Außenlufttemperatur	7
I.2.3 Sonneneinstrahlung	8
I.2.4 Raumnutzung	9
I.2 Berechnungsergebnisse.....	10
II. Berechnung der maximal zulässigen Heizmitteltemperatur.....	15
II.1 Stationäre Verhältnisse.....	15
II.2 Instationäre Verhältnisse.....	18
II.2.1 mittlere Oberflächentemperatur	18
II.2.2 Welligkeit.....	23
III. Lage des Kerntemperatur-Fühlers.....	30
IV. Literaturverzeichnis.....	38
Anhang: Entwicklung eines eindimensionalen Ersatzmodells für die thermische Bauteilaktivierung.....	39

Vorbemerkung

Die hier präsentierten Forschungsergebnisse schließen unmittelbar an die im Endbericht „Energiespeicher Beton“ präsentierten und in der Reihe „Berichte aus Energie- und Umweltforschung“ (1) publizierten Ergebnisse an. Aufgrund der erfolgten Publikation werden die Ergebnisse der hier präsentierten Detailuntersuchungen in einem eigenständigen Bericht zusammen gefasst.

Der erste Teil der Untersuchungen ist dem Auskühlverhalten eines Raums mit thermisch aktivierter Decke gewidmet, ist somit auf den Raum bezogen und geht über eine allein auf das thermische Verhalten der aktivierten Decke bezogene Beschreibung hinaus. Der in den Kapiteln 2 und 3 abgehandelte zweite Teil der Forschungsarbeit befasst sich hingegen mit der Analyse der Temperaturverteilung innerhalb einer thermisch aktivierten Decke und bleibt insofern Bauteilbezogen als die Temperaturen in den unter und über der Decke gelegenen Räumen als Randbedingungen eingehen und somit vorgegeben und nicht berechnet werden.

I. Auskühlverhalten eines Raums in einem Passivhaus mit thermisch aktivierter Decke

Das Auskühlverhalten von Räumen nach der Abschaltung einer Beheizung im Tiefwinter spielt für die Thermische Bauteilaktivierung (TBA) insofern eine wichtige Rolle als dieses das Potential für die Verwendung Erneuerbarer Energien wesentlich mitbestimmt. Wird davon ausgegangen, dass vor Abschaltung der Heizanlage der Raum auf eine operative Temperatur aufgeheizt wurde, die über der mindesterforderlichen Temperatur liegt, so ist es von besonderem Interesse zu wissen, wie viel Zeit nach Abschaltung der Heizung verstreicht bis aufgrund der fehlenden Beheizung die vom Nutzer akzeptierte Untergrenze der operativen Temperatur erreicht ist. Während dieser Zeit besteht kein Nachheizbedarf. Die Kenntnis dieser Zeitspanne lässt unmittelbar wichtige Rückschlüsse auf das Potential für die Nutzung Erneuerbarer Energien zu.

Das Auskühlverhalten eines Raums wird nicht nur von der thermischen Qualität der Gebäudehülle, der Art der Frischluftbereitstellung, der Raumnutzung und den außenklimatischen Verhältnissen sondern auch durch die Art der Beheizung beeinflusst. Um auf die Frage nach dem Auskühlverhalten Antwort geben zu können, müssen alle genannten Einflussgrößen festgesetzt werden. Damit geht die Beantwortung der gestellten Frage über die in Abschnitt II.3.2 des Forschungsberichts „Energiespeicher Beton“ (1) dokumentierten bauteilbezogenen Parameterstudien weit hinaus.

Das Auskühlverhalten soll an einem Musterraum, dessen Außenbauteile Passivhausqualität besitzen und dessen Frischluftbedarf über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung gedeckt wird, untersucht werden. Dieser Ansatz ist insofern zeitgemäß als bereits in nächster Zeit diese hohe thermische Gebäudequalität für neu errichtete Wohngebäude vorgeschrieben und daher zum Standard werden wird.

I.1 Eckdaten des Modellraums

Die Festlegung des Modellraums orientiert sich an den in Abschnitt III.1 des Forschungsberichts „Energiespeicher Beton“ (1) getroffenen Annahmen. Es handelt sich um einen quaderförmigen Raum mit 35 m² Nutzfläche und nach West und Nord orientierten Außenwänden. Der Raum wird durch eine große, nach Westen orientierte Fenstertür und ein nach Norden gerichtetes Fenster belichtet. Entgegen der Annahmen im Forschungsbericht „Energiespeicher Beton“ (1) soll der Raum nicht im Regelgeschoß sondern im obersten Geschoß

liegen, sodass die Decke des Raums durch ein Flachdach gebildet wird. Mit dieser Annahme kann die Modellierung des Raums als „worst case“ Szenario angesehen werden.

1.1.1 Bauteilaufbauten

Die Bauteilaufbauten sind jenen im Bericht „Energiespeicher Beton“ (1) für die Passivhausbauweise angesetzten nachempfunden und werden in den folgende Tabellen kurz rekapituliert.

Außenbauteile

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

Tab. 1.1: Aufbau der Außenwände; $U_{AW} = 0,10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

	d [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	c [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
oben				
Rundkies	0,0600			
Filterflies	0,0020			
Dachabdichtung	0,0100	0,170	1200	1,26
EPS Dämmplatte	0,3200	0,036	25	1,40
Dampfspernbahn	0,0040			
Stahlbetondecke	0,2500	2,200	2400	1,00
unten				

Tab. 1.2: Aufbau der obersten Decke (Flachdach); $U_{OD} = 0,11 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Fenster und Fenstertür werden jeweils als Holzkonstruktion mit einem 3-fach Wärmeschutzglas angenommen. Als Rahmen wird ein passivhaustauglicher Rahmen mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_F = 0,80 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ angesetzt. Das Glas ist eine Dreifachverglasung mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_G = 0,70 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und lässt mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von $g = 0,60$ sehr viel Sonnenstrahlung in den Raum („Solarglas“). Wird der ψ -Wert des Kunststoff-Abstandhalters mit Edelstahl-Einlage auf $\psi_G = 0,02 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gesetzt, so ergibt sich für den U-Wert des Fensters $U_w = 0,87 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, sofern für das Fenster das Prüfnorm-Maß angenommen wird.

Innenbauteile

	d [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	c [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
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. 1.3: Aufbau der Innenwände

	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	2,200	2400	1,00
unten				

Tab. 1.4: Aufbau des Fußbodens

Die Innentür wird vereinfachend aus 4 cm Vollholz bestehend angenommen.

In Hinblick auf die Innenbauteile wird angenommen, dass diese an Räume grenzen, deren Innentemperaturverläufe identisch mit jenem des untersuchten Raums sind. Mit dieser Annahme ist sichergestellt, dass das berechnete Auskühlverhalten nicht durch aus Nachbarräumen nachströmende Wärme beeinflusst wird.

1.1.2 Bauteilflächen

Die Annahme einer Passivhausqualität der Gebäudehülle impliziert, dass alle Bauteilanschlüsse (Attikabereich, Einbindung der Zwischendecke in die Außenwand, Fensteranschlüsse) derart sorgfältig konstruiert und ausgeführt sind, dass keine Wärmebrückenzuschläge verbucht werden müssen, sofern die Flächenermittlung unter Zugrundelegung von Außenabmessungen erfolgt. Nach der Diktion des Passivhausinstituts wird in diesem Fall von „wärmebrückenfreiem Bauen“ gesprochen.

Die Ermittlung der Bauteilflächen hat somit unter Verwendung von Außenabmessungen zu erfolgen. Die folgende Tabelle zeigt die solchermaßen errechneten Bauteilflächen.

	Fläche [m]
Oberste Decke / Flachdach	42,34
Fassadenfläche West	28,55
Fenstertür West	5,77
Außenwand West	22,78
Fassadenfläche Nord	21,02
Fenster Nord	1,89
Außenwand Nord	19,13
Innenwände	47,97
Tür	1,60
Fußboden	42,34

Tab. 1.5: Bauteilflächen (Außenabmessungen)

Mit einer Nutzfläche von 35 m^2 und einer lichten Raumhöhe von $2,90 \text{ m}$ ergibt sich das Luftvolumen des Raums zu $101,50 \text{ m}^3$.

I.2 Außenklimatische Bedingung

In Hinblick auf die anzunehmenden außenklimatischen Bedingungen wird im Sinne eines „worst-case“-Scenarios das Wetter an einem Auslegungstag für die Heizlastberechnung gemäß Passivhaus Projektierungspaket V9.2 (2) angenommen. Als Gebäudestandort wird hierbei Wien, Innere Stadt, angesetzt. Es wird mit einem periodisch eingeschwungenen Ansatz gerechnet, d. h. angenommen, dass sich der „Auslegungs-Tag“ unendlich oft wiederholt. Dieser Ansatz liegt einerseits insofern „auf der sicheren Seite“ als eine sehr lang andauernde Kälteperiode mit dem Auslegungstag entsprechenden Witterungsbedingungen äußerst unwahrscheinlich ist. Andererseits erleichtert der periodisch eingeschwungene Ansatz die Interpretation der Berechnungsergebnisse erheblich.

I.2.2 Außenlufttemperatur

Gemäß PHPP (2) ist für die Heizlastberechnung als Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur ein Wert von $-8,0 \text{ °C}$ anzusetzen, wenn es sich um einen kalten, klaren Tag handelt. Dieser Fall soll den Auskühlungsberechnungen zugrunde gelegt werden. Passend zu einem klaren Wintertag wird diesem Tagesmittelwert eine Tagesschwankung von $\pm 6,0 \text{ K}$ überlagert. Die folgende Abbildung zeigt den der Simulation zugrunde gelegten Tagesgang der Außenlufttemperatur.

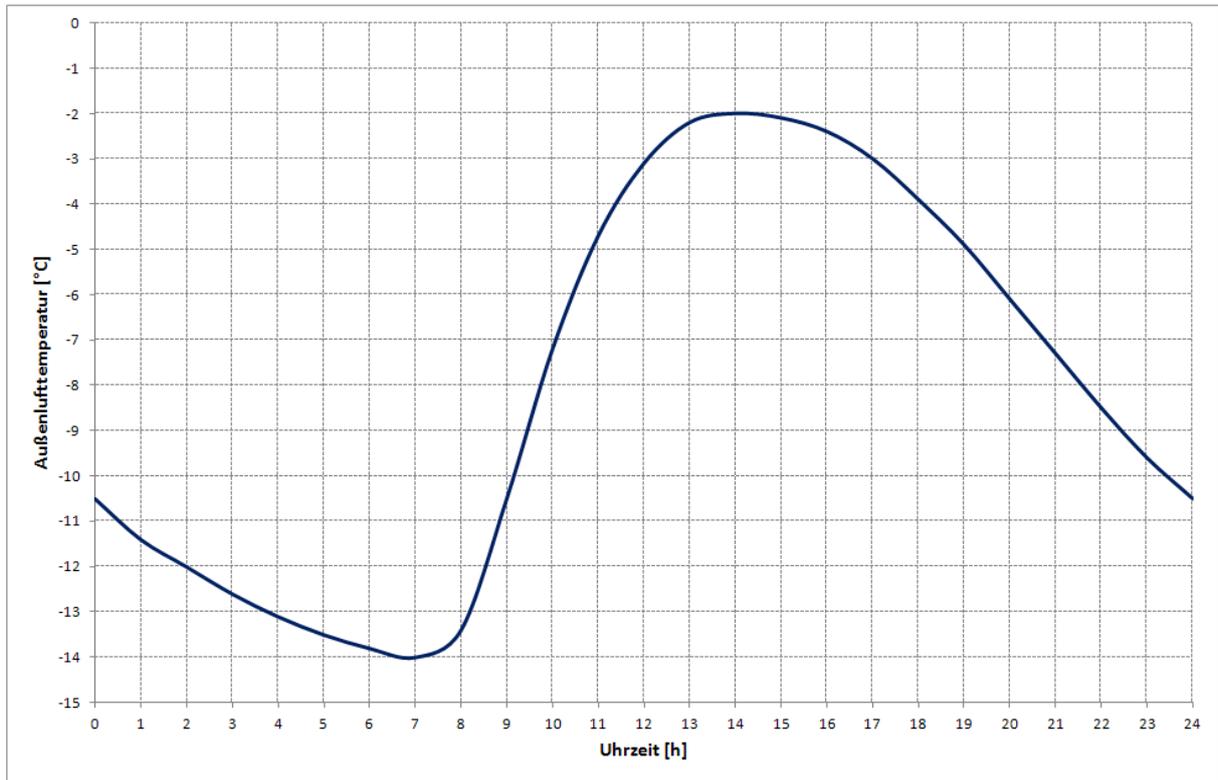


Abb. 1.1: Den Simulationen zugrunde gelegter Tagesverlauf der Außenlufttemperatur

Bezüglich der Außenlufttemperatur handelt es sich somit um eine Folge von „Eistagen“, d. h. von Tagen, an denen die Außenlufttemperatur ganztags unterhalb des Gefrierpunkts liegt.

1.2.3 Sonneneinstrahlung

In Hinblick auf die Sonneneinstrahlung sind im PHPP (2) Tagesmittelwerte der solaren Bestrahlungsstärken auf die vier Haupthimmelsrichtungen und die horizontale Fläche vorgegeben. Für den Modellraum spielen nur die Bestrahlungsstärken auf die West- und die Nordfassade, sowie auf das Flachdach eine Rolle. Die solare Einstrahlung kann in einer für bauphysikalische Zwecke ausreichende Genauigkeit mit Hilfe des Linke'schen Trübungsfaktors, des Reitz'schen Diffusstrahlungsfaktors und des Albedo-Werts berechnet werden, sofern das Datum und die Position des Standorts bekannt sind. Der Linke'sche Trübungsfaktor und der Reitz'sche Diffusstrahlungsfaktor wurden mittels Verwendung von Programmpaket GEBA (3) für die Simulationsläufe derart angesetzt, dass die vom PHPP vorgegebenen Bestrahlungsstärken möglichst gut approximiert werden. Das Ergebnis dieser Anpassung zeigt folgende Tabelle.

	Tagesmittelwert [Wm^{-2}]	
	PHPP	GEBA
Westfassade	25	25,0
Nordfassade	20	20,0
horizontale Fläche /Flachdach	40	41,6

Tab. 1.6: Tagesmittelwerte der solaren Bestrahlungsstärken

Mit einem Linke'schen Trübungsfaktor von 9,0, einem Reitz'schen Diffusstrahlungsfaktor von 0,297 und einem normgemäß angesetzten Albedo-Wert von 0,2 lassen sich die von PHPP vorgegebenen solaren Bestrahlungsstärken auf die West- und die Nordfassade genau approximieren, wenn als Datum für die Berechnung der Sonnenbahn der 15. Januar angesetzt wird.

Dass mit diesem Ansatz die Bestrahlungsstärke auf die horizontale Ebene etwas zu hoch ausfällt, spielt aufgrund der sehr hoch gedämmten Dachkonstruktion keine Rolle. Die folgende Abbildung zeigt die den Simulationen zugrunde gelegten Tagesverläufe der solaren Bestrahlungsstärken.

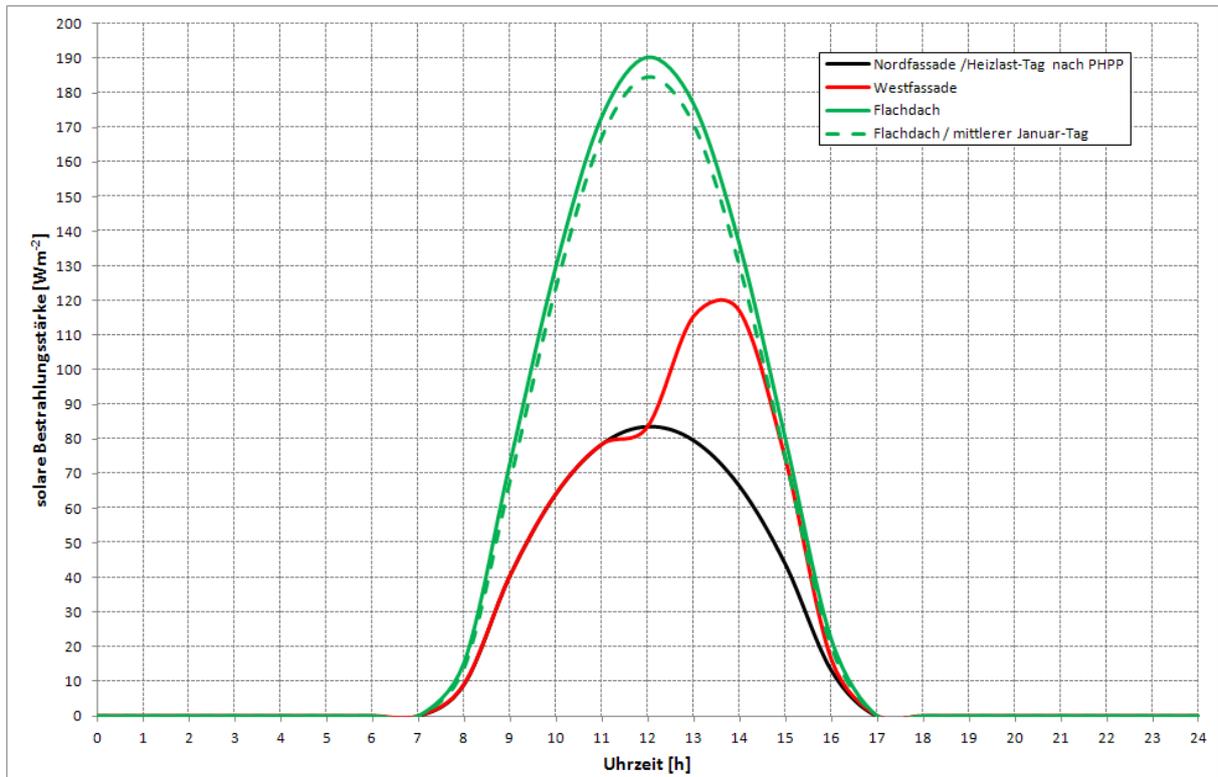


Abb. 1.2: Den Simulationen zugrunde gelegte solare Bestrahlungsstärken

Der Vergleich mit den mittleren klimatischen Verhältnissen (strichlierte, grüne Linie in Abb. 1.2) zeigt, dass der gemäß PHPP „klare“ Tag nur geringfügig höhere Bestrahlungsstärken aufweist als ein am Gebäudestandort Wien, Innere Stadt, auftretender Januar Tag, der dem langjährigen Mittel entspricht („mittlerer Tag“). Es stellt sich somit heraus, dass die durch PHPP für einen klaren Tag vorgegebenen solaren Bestrahlungsstärken eher niedrig angesetzt sind und damit „auf der sicheren Seite“ liegen.

1.2.4 Raumnutzung

Die durch die Personenbelegung und die Wärmeabgabe von Beleuchtung und Geräten verursachten Wärmemengen im Inneren des Modellraums werden gemäß ÖNorm B8110-5 (4) in Form einer nutzflächenbezogenen Wärmeleistung angesetzt. Für Passivhäuser wird hierbei ein Tagesmittelwert von $2,1 \text{ Wm}^{-2}$ angegeben. Um der Nutzung als Wohnraum zu entsprechen, sollen die Innenwärmen nur in der Zeit zwischen 8^{00} und 20^{00} zum Tragen kommen. Unter diesen Annahmen sind somit in der Zeit von 8^{00} bis 20^{00} bei einer Nutzfläche von 35 m^2 147 W Wärmeabgabeleistung anzusetzen.

In Hinblick auf die Lüftungswärmeverluste wird zum einen gemäß PHPP (2) ein Infiltrationsluftwechsel mit einer Luftwechselzahl $0,12 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Diese Luftwechselzahl ist lt. PHPP anzusetzen, wenn beim Drucktest die Grenze von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ nicht überschritten wurde. Zum anderen wird der hygienisch erforderliche Luftwechsel gemäß PHPP mit einer Luftwechselzahl von $0,32 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Diese Frischluftzufuhr wird über eine Lüftungsanlage mit

Wärmerückgewinnung bewerkstelligt. Der effektive Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage wird mit 80% angesetzt. Es wird hierbei angenommen, dass die Lüftungsanlage durchgehend in Betrieb ist.

I.2 Berechnungsergebnisse

Die Auskühlung des Modellraums nach Abschaltung der Heizanlage wird für folgende Varianten mittels thermischer Simulation unter Verwendung von Programmpaket INTEMP (5) errechnet:

Variante	Kurzbeschreibung
1	rein konvektive Beheizung des Raums; Ausgangstemperatur: 23 °C
2	Beheizung mittels thermisch aktivierter Decke; Ausgangstemperatur: 23 °C
3	rein konvektive Beheizung des Raums; Ausgangstemperatur: 24 °C
4	Beheizung mittels thermisch aktivierter Decke; Ausgangstemperatur: 24 °C
5	rein konvektive Beheizung des Raums; Ausgangstemperatur: 25 °C
6	Beheizung mittels thermisch aktivierter Decke; Ausgangstemperatur: 25 °C

Tab. 1.7: Liste der Berechnungsvarianten

Bei den Varianten 2, 4 und 6 wird davon ausgegangen, dass nur 70% der Deckenfläche – das sind 24,5 m² – aktiviert sind, sodass die übrige Deckenfläche z. B. für Zwecke zur Verbesserung der Raumakustik zur Verfügung steht.

Bei den im Folgenden gezeigten Berechnungsvarianten wird davon ausgegangen, dass in Absprache mit dem Raumnutzer ein Intervall für die im Tiefwinter im Raum akzeptierte operative Temperatur festgelegt wurde. Dieses Band wird grundsätzlich mit einer Untergrenze von 22,0 °C angesetzt. Die Obergrenze des Temperaturbands wird in Schritten von 1,0 K variiert, um den Einfluss der Breite des Temperaturbandes auf die Auskühldauer quantifizieren zu können.

Wird nun angenommen, dass im Raum vor Abschaltung der Heizanlage eine operative Temperatur von z. B. 23,0 °C vorherrscht, so interessiert in erster Linie die Dauer zwischen dem Abschaltzeitpunkt und dem Erreichen einer operativen Raumtemperatur von 22 °C. Diese Dauer entspricht jenem Zeitintervall, in dem bei Aufrechterhaltung akzeptabler innenklimatischer Bedingungen kein Nachheizbedarf besteht.

Der Vergleich zwischen einer rein konvektiven Beheizung des Raums und der Beheizung mittels thermischer Aktivierung der Decke ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn die Ausgangslage vor Abschaltung der Heizung als gleich eingestuft werden kann. Im Zuge der Simulation wird dies dadurch erreicht, dass die Heizungsregelung derart angesetzt wird, dass der Tagesmittelwert der operativen Temperatur jeweils gleich ist und der Obergrenze des Temperaturbands entspricht. Wie aus den Abbildungen 3 bis 5 ersichtlich, wird dieser Tagesmittelwert beim beheizten Raum im Tagesverlauf geringfügig über- und unterschritten. Die durch Sonneneinstrahlung und nutzungsbedingten Innenwärmen verursachten Tageschwankungen der operativen Temperatur unterscheiden sich bei konvektiver Beheizung und thermische Aktivierung der Decke nur marginal, sodass die Ausgangslage vor Abschaltung der Heizung als gleichwertig angesehen werden kann.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Zeitverläufe der operativen Temperatur im Musterraum vor und während der Abkühlphase für eine Ausgangstemperatur von 23 °C (Varianten 1 und 2). Die Heizung wird hierbei zu Mitternacht, also zur Stunde 0, abgeschaltet (siehe Markierung in Abb. 1.3).

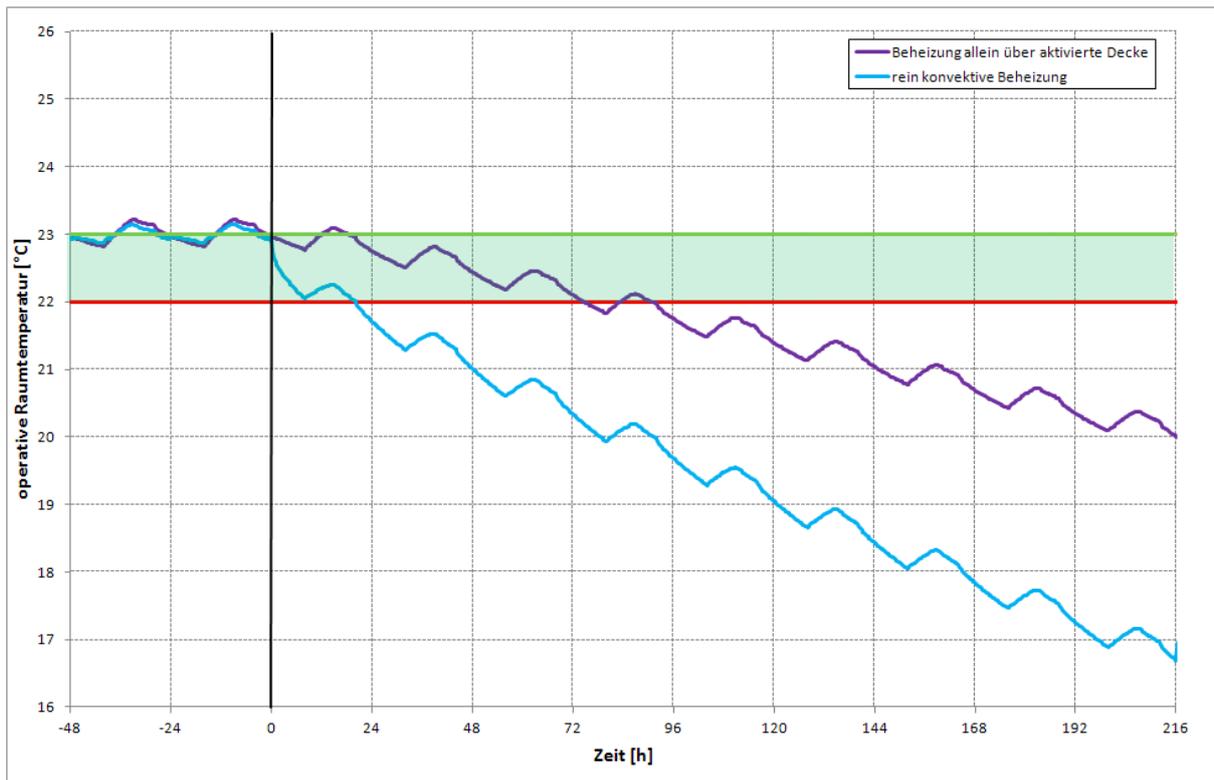


Abb. 1.3: Auskühlverhalten bei einer zugelassenen Bandbreite der operativen Temperatur von 1,0 K; Untergrenze der Soll-Temperatur: 22,0 °C

Die sägezahnartigen Zeitverläufe von Abb. 1.3 rühren daher, dass die Abkühlung vorwiegend in der Nacht erfolgt. Unter Tags stellt sich hingegen aufgrund der solaren und der nutzungsbedingten Innenwärmen eine leichte Erwärmung ein.

Es fällt auf, dass die Auskühlung des Raums im Falle der Beheizung durch die thermisch aktivierte Decke sehr viel langsamer erfolgt als bei einer rein konvektiven Beheizung. Grund für diesen sehr stark ausgeprägten Effekt ist die in der Decke gespeicherte Wärmemenge, die nach Abschaltung der Umwälzpumpe nach und nach an den Raum abgegeben wird.

Bei rein konvektiver Beheizung geben die raumbegrenzenden Bauteile in der Abkühlphase zwar auch ihren Wärmeinhalt an den Raum ab. Die in den Bauteilen gespeicherte und an den Raum abgegebene Wärmemenge kann in diesem Fall eine Abkühlung des Raums unter 22 °C nur 20 Stunden lang verhindern. Durch die höher temperierte Decke wird im Fall der thermischen Aktivierung 22 °C erst nach 75 Stunden, also etwas über drei Tagen, unterschritten.

In den folgenden beiden Abbildungen ist das Abkühlverhalten des Modellraums für eine Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur von 2,0 K (Varianten 3 und 4) und 3,0 K (Varianten 5 und 6) dargestellt.

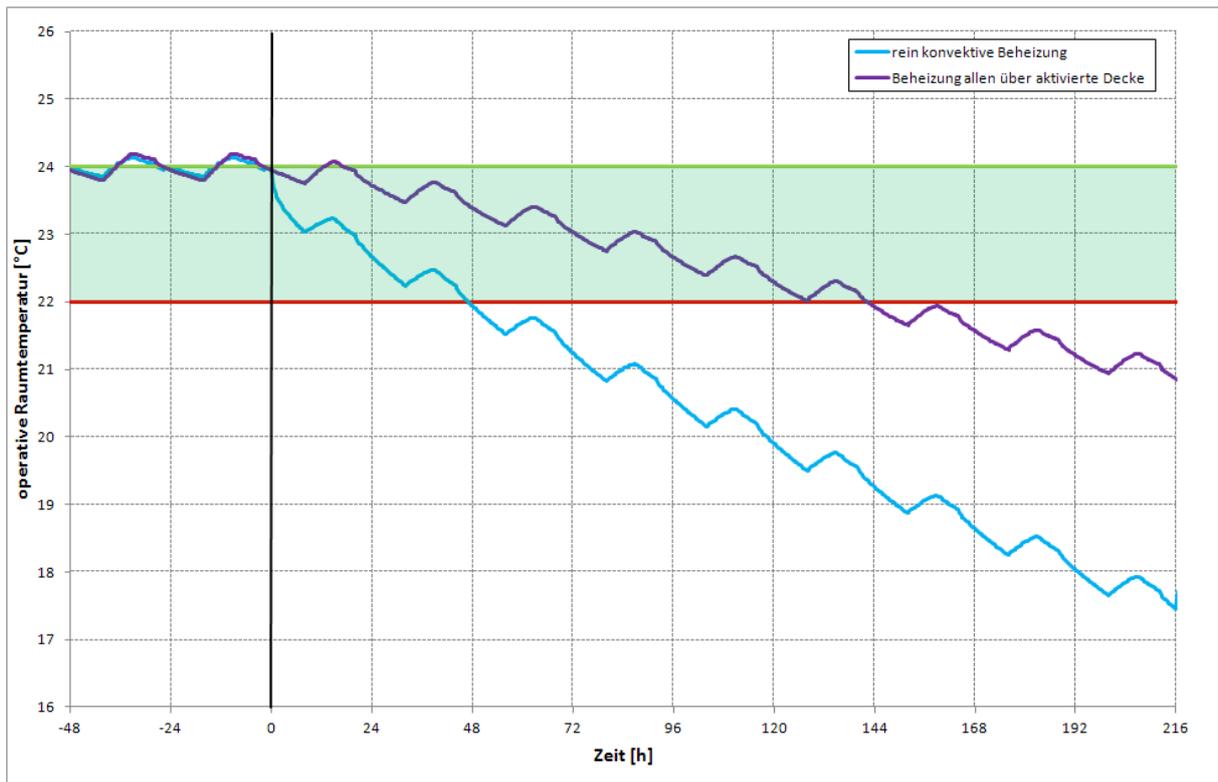


Abb. 1.4: Auskühlverhalten bei einer zugelassenen Bandbreite der operativen Temperatur von 2,0 K; Untergrenze der Soll-Temperatur: 22,0 °C

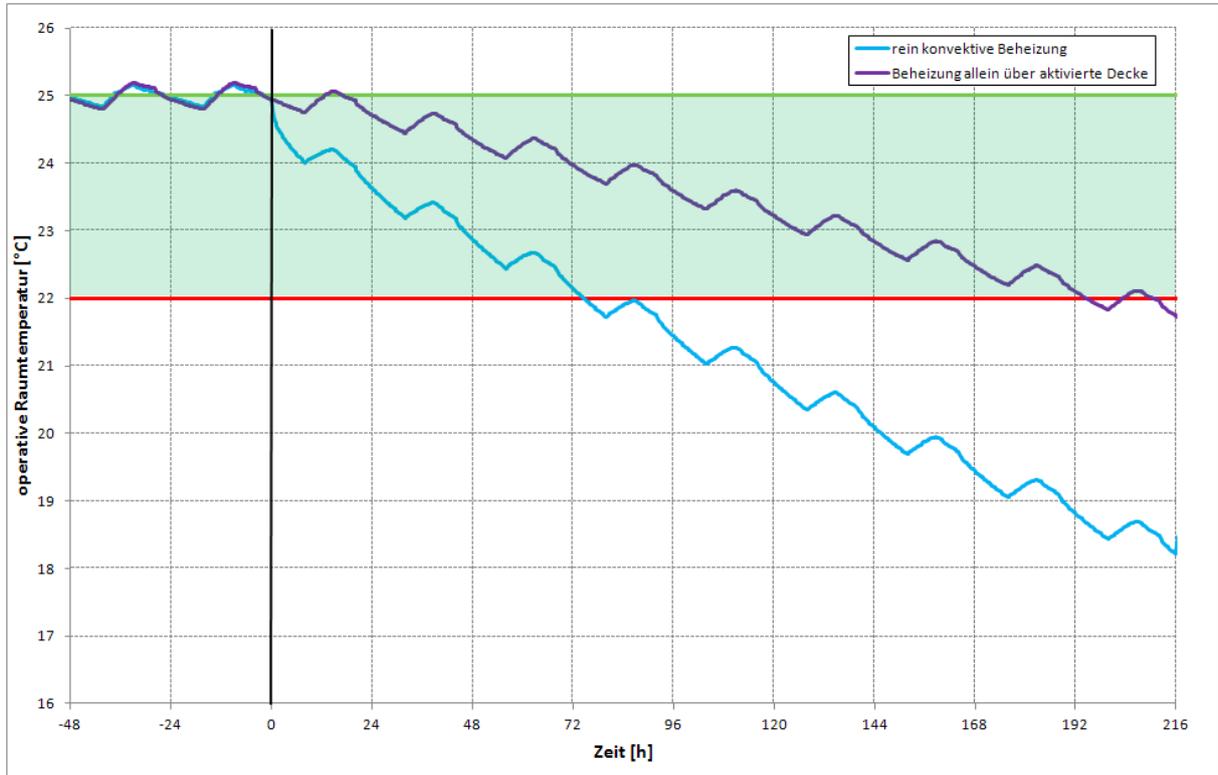


Abb. 1.5: Auskühlverhalten bei einer zugelassenen Bandbreite der operativen Temperatur von 3,0 K; Untergrenze der Soll-Temperatur: 22,0 °C

Qualitativ bleibt die Aussage in Hinblick auf das stark unterschiedliche Auskühlverhalten bei konvektiver Beheizung auf der einen Seite und Bauteilaktivierung der Decke auf der anderen Seite auch bei größeren Bandbreiten der im Raum akzeptierten operativen Temperatur erhalten. Die Bauteilaktivierung bremst die Auskühlung des Raums ganz erheblich.

Quantitativ zeigt sich, dass eine Erhöhung der Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur von 1,0 K auf 2,0 K die Dauer bis zur Unterschreitung der Untergrenze der operativen Temperatur von 22 °C in etwa verdoppelt. Bei einer weiteren Erhöhung dieser Bandbreite auf 3,0 K erhöht sich die Dauer der Zeit ohne Nachheizbedarf nochmals erheblich. In folgender Tabelle sind die Zeitintervalle zwischen der Heizungsabschaltung und dem Erreichen der Untergrenze der operativen Temperatur – und damit die Zeiten ohne Nachheizbedarf – in Abhängigkeit von der Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur und der Art der Beheizung angegeben.

Bandbreite [K]	Luftheizung	Bauteilaktivierung
1,0	20 h	75 h
2,0	47 h	142 h
3,0	75 h	195 h

Tab. 1.8: Zeiträume ohne Nachheizbedarf in Stunden

Generell lässt sich sagen, dass die Erhöhung der Breite des vom Nutzer akzeptierten Bandes der operativen Temperatur die Zeiten ohne Nachheizbedarf stark vergrößern. Bei rein konvektiver Beheizung steigt diese Zeitspanne von knapp einem Tag bei 1,0 K Bandbreite auf etwas über 3 Tage bei 3,0 K Bandbreite an. Wird der Raum ausschließlich mittels thermischer Aktivierung der Decke beheizt, so ergibt sich die Zeitspanne ohne Nachheizbedarf von ca. 3 Tagen bereits bei einer Bandbreite von 1,0 K. Bei 3,0 K Bandbreite liegt die Zeitspanne ohne Nachheizbedarf mit 195 h bereits bei über 8 Tagen.

Conclusio:

Die mittels thermischer Simulation eines Modellraums durchgeführten Untersuchungen zum Auskühlverhalten eines Raums in einem Passivhaus führen zu folgenden Ergebnissen.

- Die Ausnutzung der in den raumbegrenzenden Bauteilen gespeicherten Wärmemengen zur Verhinderung einer raschen Auskühlung des Raums im Fall der Abschaltung der Heizung während einer tiefwinterlichen Kälteperiode wird erst dann möglich, wenn ein Temperaturband, innerhalb dessen sich die operativen Temperaturen im Raum bewegen dürfen, festgelegt wurde. Diese Festlegung hat natürlich in Abstimmung mit den NutzerInnen zu erfolgen.
- Die Breite des Temperaturbandes beeinflusst den Zeitraum zwischen der Abschaltung der Heizung und dem Erreichen der Untergrenze der operativen Temperatur erheblich. Diese Zeitspanne stellt den Zeitraum ohne Nachheizbedarf dar und ist für die Frage der Nutzbarkeit von Erneuerbaren Energien von wesentlicher Bedeutung.
- Der Vergleich zwischen einer rein konvektiven Beheizung des Raums und einer Beheizung ausschließlich über die thermische Aktivierung von 70% der Deckenfläche zeigt, dass der Zeitraum ohne Nachheizbedarf im Fall der thermischen Bauteilaktivierung erheblich länger ist als bei konvektiver Beheizung. Wie stark dieser Unterschied ausgeprägt ist, hängt von der angesetzten Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur ab. Grob gesagt verlängert sich bei thermischer Aktivierung der

Decke der Zeitraum ohne Nachheizbedarf im Vergleich zu einer konvektiven Beheizung um einen Faktor in der Größenordnung von drei.

- Bei thermischer Bauteilaktivierung von 70% der Deckenfläche liegt der Zeitraum ohne Nachheizbedarf zwischen ca. 3 Tagen bei einer Bandbreite der akzeptierten operativen Temperatur von 1,0 K und ca. 8 Tagen bei einer Bandbreite von 3,0 K.

Bei der Interpretation dieser Untersuchungsergebnisse ist zu beachten, dass in diese eine Fülle von Annahmen zu Geometrie, Orientierung und Aufbau des Modellraums, zu dessen Raumnutzung sowie zu den außenklimatischen Bedingungen eingegangen sind. Da beim Ansetzen dieser Annahmen jeweils versucht wurde, ein „worst case“ Szenario zu schaffen, können die errechneten Zeitdauern ohne Nachheizbedarf als Näherungswerte für die Untergrenze dieser Zeitspannen für einen Gebäudestandort in Wien dienen.

II. Berechnung der maximal zulässigen Heizmitteltemperatur

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

Die Beantwortung der aufgeworfenen Frage ist sowohl für eine Solaranlage als auch für eine Wärmepumpe als Wärmeerzeugungs-System wichtig. Bei der Solaranlage fallen im Tiefwinter über wenige Stunden Heizmitteltemperaturen von 40 °C und mehr an. Bei einer z. B. mit Überschussstrom betriebenen Wärmepumpe soll in kurzer Zeit möglichst viel Wärme in die Decke eingelagert werden. Auch dies setzt eine Kenntnis der maximal möglichen Heizmitteltemperatur voraus.

II.1 Stationäre Verhältnisse

Gemäß (1) ist der flächenbezogene Leitwert zwischen dem Rohrregister und dem unter der Decke liegenden Raum $\Lambda_{r,u}$ ein wichtiges Charakteristikum einer thermisch aktivierten Decke. Die unter stationären Bedingungen an den unter der Decke liegenden Raum abgegebene Registerflächenbezogene Wärmeleistung q ist durch

$$q = \Lambda_{r,u} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) \quad \langle 2.1 \rangle$$

gegeben. Θ_r ist hierbei die Temperatur des im Inneren der Rohre zirkulierenden Heizmittels.

Im Normalfall wird es genügen, diese Temperatur als arithmetisches Mittel zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur zu identifizieren.

Θ_u in Gleichung $\langle 2.1 \rangle$ ist die Lufttemperatur im zu beheizenden Raum und entspricht in guter Näherung der für diesen Raum angesetzten Solltemperatur. Da im stationären Fall sowohl Θ_r als auch Θ_u zeitunabhängige Größen sind, entspricht dies der Annahme eines durchlaufenden Betriebs der Umwälzpumpe mit konstantem Massenstrom.

Wird angenommen, dass die Wärmeabgabe der Deckenuntersicht ortsunabhängig ist, so kann die Wärmestromdichte q als Mittelwert über die gesamte thermisch aktivierte Deckenfläche angesehen werden. Wie in (1) gezeigt, ist diesem Mittelwert eine gering ausgeprägte „Welligkeit“ überlagert. Direkt unter den Registerrohren ist die Oberflächentemperatur – und damit die Wärmestromdichte – etwas höher als zwischen jeweils 2 Rohren des Registers. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Welligkeit wenig ausgeprägt ist und das Strahlungsfeld im Raum nur unwesentlich und kaum merkbar beeinflusst. Diese Annahme wird in Abschnitt II.2.2 überprüft. Es stellt sich dabei heraus, dass der Bezug auf die mittlere Deckentemperatur ein brauchbarer und sinnvoller Ansatz ist.

Die mittlere Wärmestromdichte q an der Deckenuntersicht errechnet sich gemäß

$$q = \alpha_{su} \cdot (\bar{\Theta}_s - \Theta_u) \quad \langle 2.2 \rangle$$

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

Wird Gleichung $\langle 2.2 \rangle$ in Gleichung $\langle 2.1 \rangle$ eingesetzt und nach der interessierenden Heizmitteltemperatur Θ_r aufgelöst, so ergibt sich

$$\Theta_r = \Theta_u + \Delta\Theta = \Theta_u + \frac{\alpha_{su}}{\Lambda_{r,u}} \cdot (\bar{\Theta}_s - \Theta_u) \quad . \quad \langle 2.3 \rangle$$

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

Wird die Forderung aufgestellt, dass die Differenz zwischen mittlerer Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der Lufttemperatur im beheizten Raum ($\bar{\Theta}_s - \Theta_u$) nicht größer als 4,0 K sein darf (siehe (7)), so ergibt sich für die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ folgender, einfacher Zusammenhang:

$$\Delta\Theta = \frac{6,5 \cdot 4}{\Lambda_{r,u}} = \frac{26,0}{\Lambda_{r,u}} \quad . \quad \langle 2.4 \rangle$$

Der flächenbezogene thermische Leitwert $\Lambda_{r,u}$ ist – wie in (1) gezeigt – abhängig von der Lage des Rohrregisters in der Stahlbetondecke bzw. der „Betonüberdeckung“ und von dem Achsabstand der Rohre. Natürlich besteht auch eine Abhängigkeit vom Schichtaufbau der thermisch aktivierten Decke.

Es wird nun davon ausgegangen, dass die thermisch aktivierte Decke eine Trenndecke zwischen zwei Regelgeschossen ist und der Schichtaufbau dieser Decke gemäß (1) wie folgt fixiert ist.

	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. 2.1: Schichtaufbau der Trenndecke (siehe (1))

Für diese Decke wurden in (1) die thermischen Leitwerte $\Lambda_{r,u}$ für verschiedene Rohrabstände berechnet und eine analytische Näherung für die Abhängigkeit vom Rohrabstand entwickelt. Unter Anwendung dieser Erkenntnisse kann die in stationärer Näherung ermittelte Abhängigkeit der Obergrenze für die Heizmitteltemperatur vom Rohrabstand leicht errechnet werden. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen für Betonüberdeckungen von 5, 10 und 15 cm.

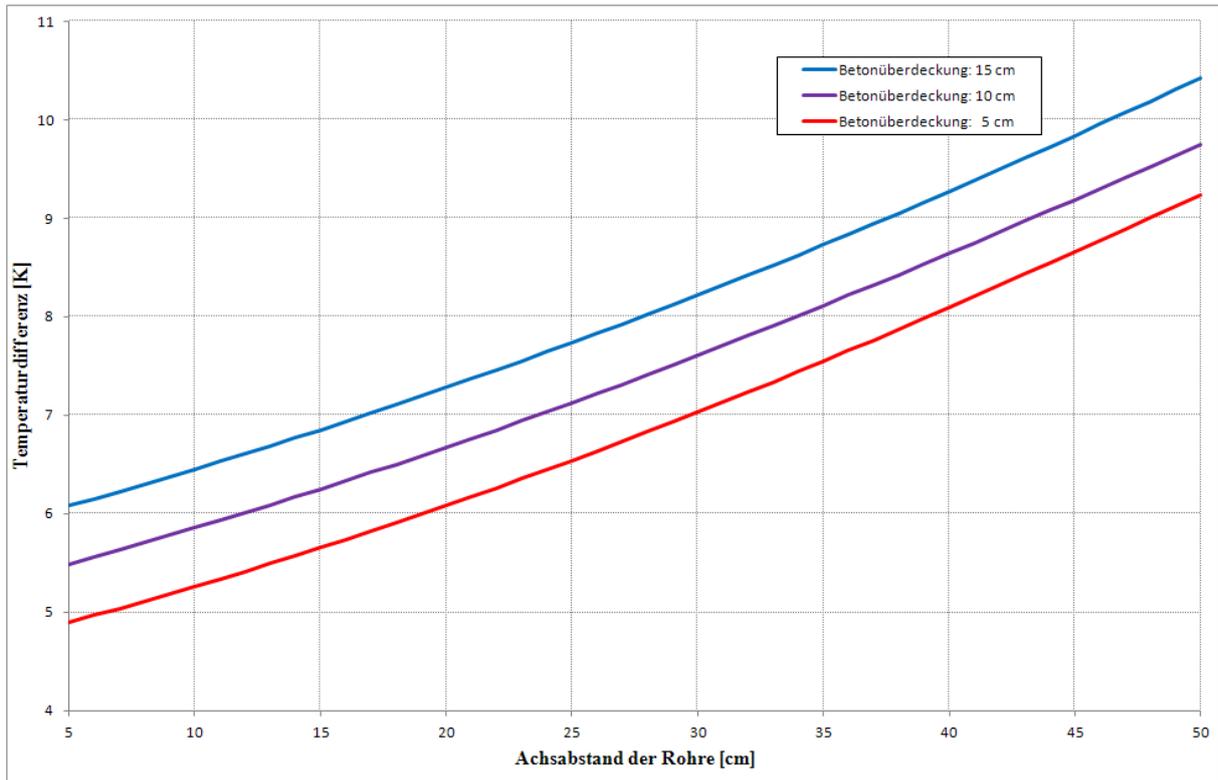


Abb. 2.1: Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ gemäß Gleichung <2.3> vom Rohrabstand und der Betonüberdeckung bei durchlaufender Umwälzpumpe

Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der maximal zulässigen Temperatur im Rohr und der Lufttemperatur im beheizten Raum $\Delta\Theta = (\Theta_r - \Theta_u)$ vom Achsabstand der Rohre. Mit größer werdendem Achsabstand der Rohre wird $\Delta\Theta$ und damit die Obergrenze für die Temperatur des Heizmittels im Rohr bei gegebener Solltemperatur im Raum größer. Die drei in Abb. 2.1 gezeigten Verläufe erscheinen auf den ersten Blick parallel verschoben. Obzwar dies nicht genau der Fall ist, kann in guter Näherung gesagt werden, dass $\Delta\Theta$ bei Erhöhung der Betonüberdeckung um 5 cm um ca. 0,5 K größer wird.

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

$$\Theta_h = \Theta_r + \frac{\Lambda_{r,u}}{c_w \cdot \rho_w \cdot \dot{V}} \cdot (\Theta_r - \Theta_u) + \frac{\Lambda_{r,o}}{c_w \cdot \rho_w \cdot \dot{V}} \cdot (\Theta_r - \Theta_o) \quad . \quad <2.5>$$

Die Heizmitteltemperatur Θ_h ist somit immer größer als die Temperatur im Rohr Θ_r . Da die volumenbezogene Wärmekapazität von Wasser $c_w \cdot \rho_w$ mit ca. $1156 \text{ Whm}^{-3}\text{K}^{-1}$ sehr groß ist, fällt die Differenz zwischen Θ_h und

Θ_r eher klein aus und ist abhängig vom Volumendurchsatz des Heizmittels \dot{V} . Bei dem im Folgenden eher klein angesetzten Massedurchsatz von 24 kgh^{-1} ergibt sich $\dot{V} = 0,024 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, was einem Wasserwert von $c_w \cdot \rho_w \cdot \dot{V} = 27,7 \text{ WK}^{-1}$ entspricht. Bei 5 cm Betonüberdeckung stellt sich damit eine Differenz zwischen Heizmitteltemperatur und Rohrtemperatur von $\Theta_h - \Theta_r = 1,0 \text{ K}$ ein. Bei Massendurchsätzen von 120 kgh^{-1} , wie sie bei der Bauteilaktivierung anzutreffen sind, reduziert sich diese Differenz auf ca. $0,2 \text{ K}$. Somit kann für überschlägige Abschätzungen die Temperatur im Rohr mit der Heizmitteltemperatur gleich gesetzt werden.

II.2 Instationäre Verhältnisse

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

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

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

Vereinfachend wird angenommen, dass die Heizmitteltemperatur während der Beladungszeit konstant ist und – angelehnt an (1) - der Massedurchsatz mit 24 kgh^{-1} ebenfalls konstant angenommen wird. Außerhalb der Beladungszeit erfolgt keine Energiezufuhr in das Rohrregister. Die Temperatur des Heizmittels ergibt sich während dieses Zeitraums aufgrund des Auskühlverhaltens der Decke.

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

Aus der Annahme der Periodizität folgt unmittelbar, dass die in Abb. 2.1 gezeigten Temperaturdifferenzen auch für die instationäre Berechnung eine Bedeutung haben. Der Tagesmittelwert der Temperatur im Rohr darf die mittels $\Theta_u + \Delta\Theta$ errechnete Obergrenze nicht überschreiten. Bei Überschreitung dieser Obergrenze liegt der Tagesmittelwert der Oberflächentemperatur zu hoch, was natürlich nicht zulässig ist. Zudem ist zu berücksichtigen, dass dem Tagesmittelwert der Oberflächentemperatur auch eine Tagesschwankung überlagert sein wird. Die Aufgabe besteht nun darin, den Tagesmittelwert und die Tagesschwankung der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht in Abhängigkeit von der Lage des Rohrregisters zu ermitteln. Der Achsabstand der Rohre im Register wird dabei mit 20 cm konstant gehalten.

II.2.1 mittlere Oberflächentemperatur

Die Heizmitteltemperatur wird nun im Zuge der instationären Berechnung so lange variiert bis der Maximalwert der mittleren Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht genau $4,0 \text{ K}$ über der Solltemperatur des Raums zu liegen kommt. Als Ergebnis der Simulationen liegen

die Tagesverläufe der mittleren Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht – und natürlich die während des Beladungszeitraums konstant angenommene Heizmitteltemperatur vor.

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

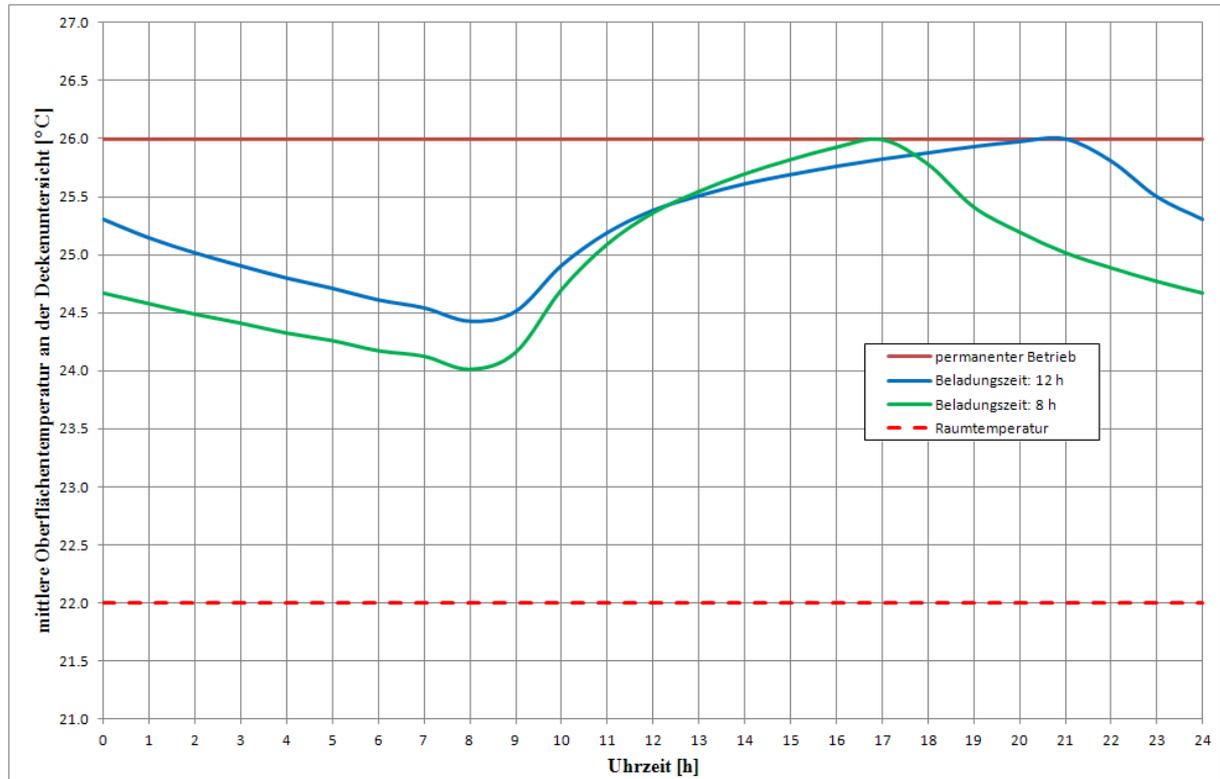


Abb. 2.2: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 5 cm

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

In folgender Tabelle sind als eigentlich interessierende Ergebnisse die Heizmitteltemperaturen, mit denen die Tagesverläufe der Abb. 2.2 erzielt werden, aufgelistet. Diese Temperaturen können als Obergrenzen für die Heizmitteltemperatur interpretiert werden.

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

Tab. 2.2: maximal zulässige Heizmitteltemperaturen für eine Betonüberdeckung von 5 cm

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

Anmerkung: In Tab. 2.2 ist die Heizmitteltemperatur angegeben, die sich von der Temperatur im Rohr unterscheidet – siehe Gleichung <2.5>. Der für permanenten Betrieb der Umwälzpumpe (24 h) angegebene Wert (29,1 °C) liegt beim

angenommenen Massendurchsatz von 24 kg h^{-1} um ca. 1,0 K höher als die aus Abb. 2.1 ableitbare Temperatur.

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

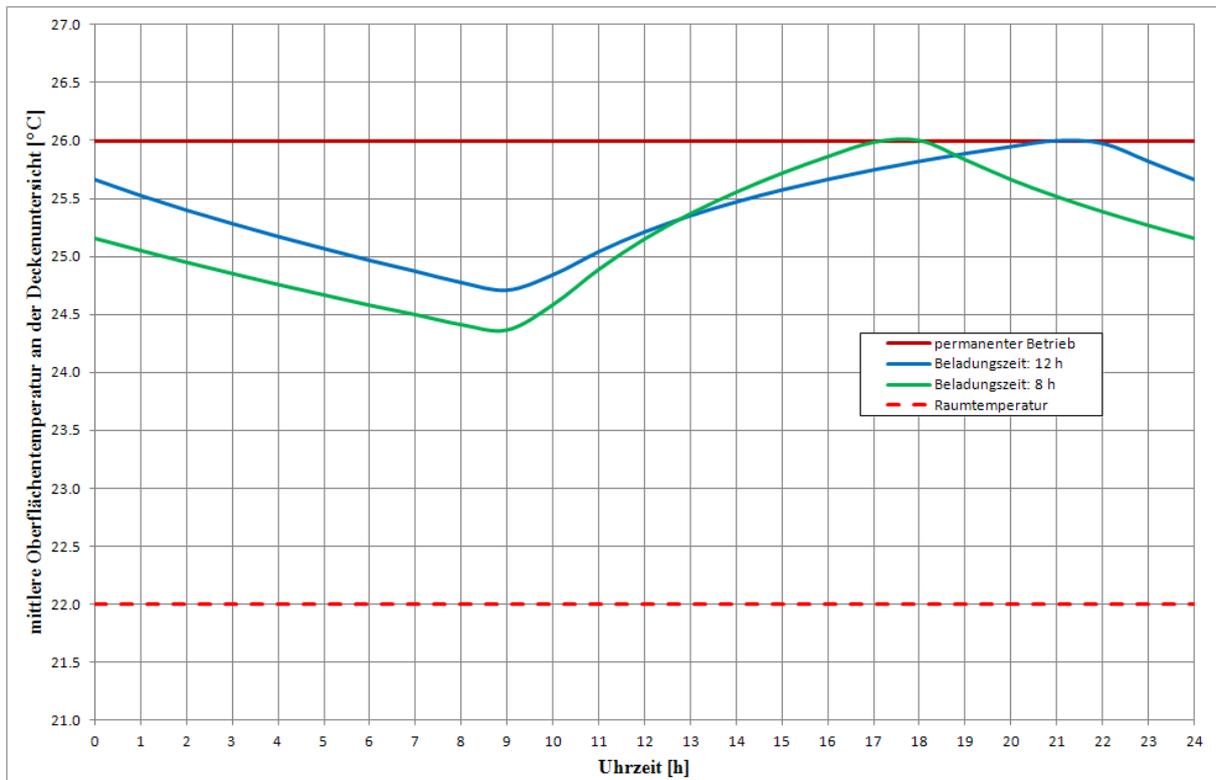


Abb. 2.3: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenunterseite für eine Betonüberdeckung von 10 cm

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

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

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

Tab. 2.3: maximal zulässige Heizmitteltemperaturen für eine Betonüberdeckung von 10 cm

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

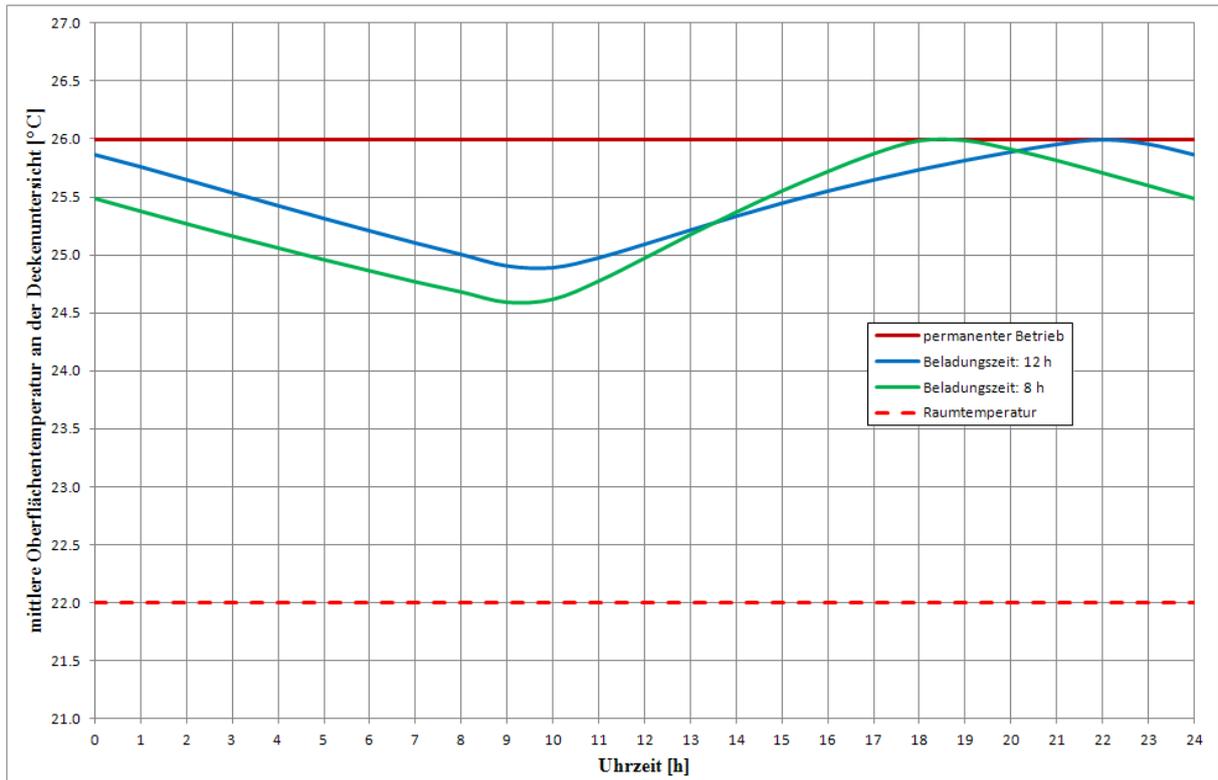


Abb. 2.4: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 15 cm

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

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

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

Tab. 2.4: maximal zulässige Heizmitteltemperaturen für eine Betonüberdeckung von 15 cm

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

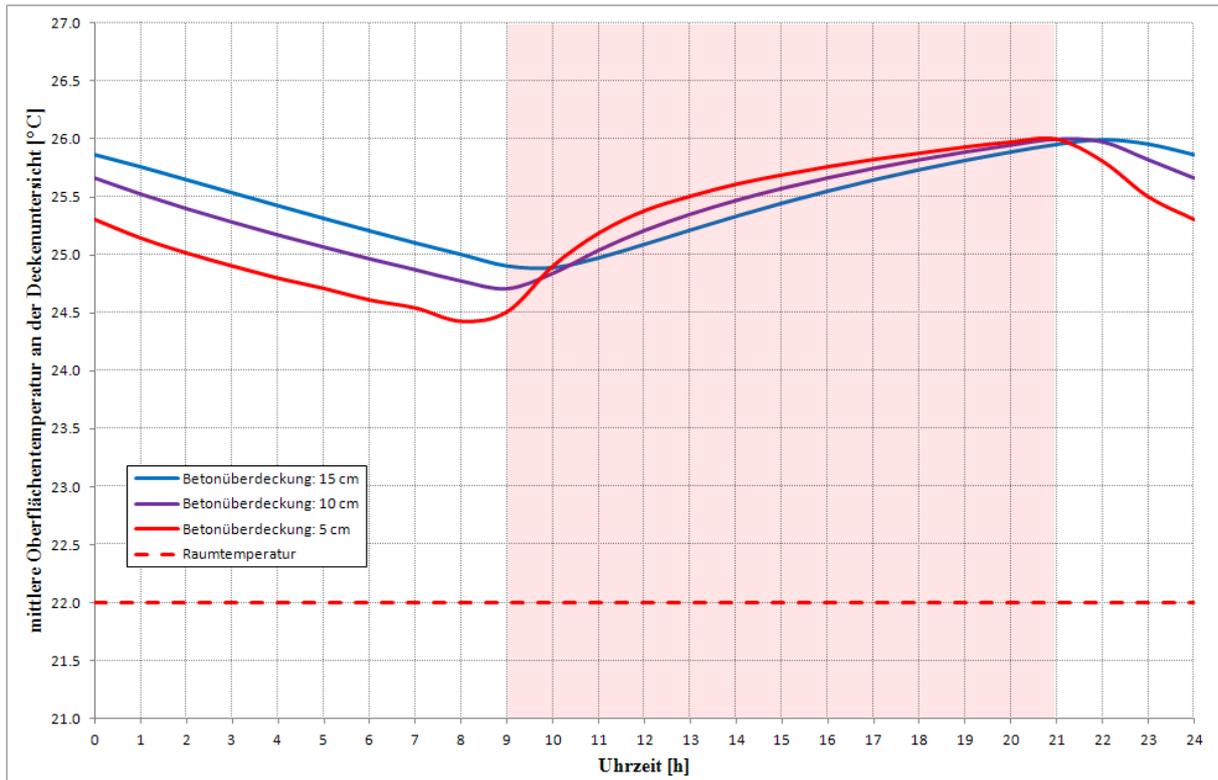


Abb. 2.5: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht bei einer Beladungsdauer von 12 Stunden für verschiedene Betonüberdeckungen

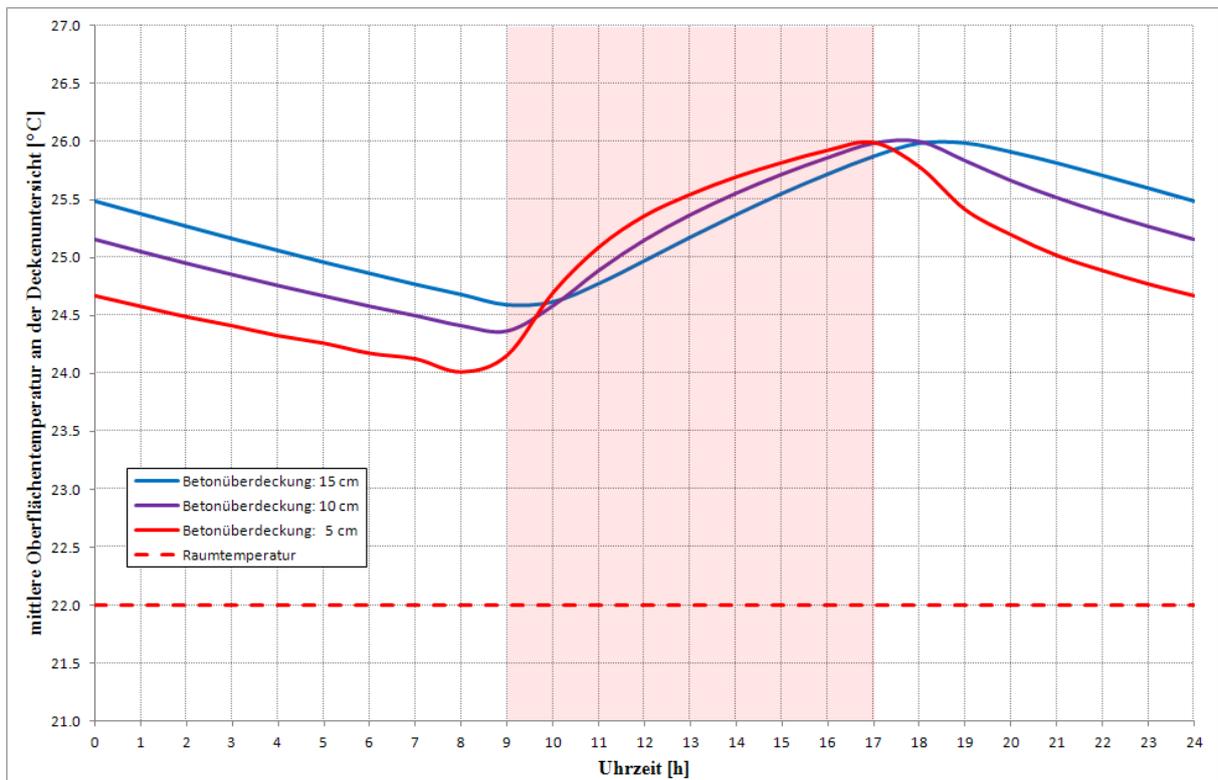


Abb. 2.6: Mittlere Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht bei einer Beladungsdauer von 8 Stunden für verschiedene Betonüberdeckungen

Wie nicht anders zu erwarten, wird mit zunehmender Betonüberdeckung die Tagesamplitude der Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht deutlich reduziert. Zugleich verschiebt sich auch der Tagesmittelwert der Oberflächentemperatur – und damit auch der Tagesmittelwert der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Decke.

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

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

Tab. 2.5: Tagesmittelwerte der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung und des Beladungszeitraums [Wm^{-2}]

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

II.2.2 Welligkeit

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

Die Untersuchung der Welligkeit der Temperaturverteilung an der Deckenuntersicht erfolgt mittels Berechnung und Ausgabe der Tagesgänge der Oberflächentemperatur an 4 ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht. Die Lage dieser Punkte ist in folgender Abbildung skizziert.

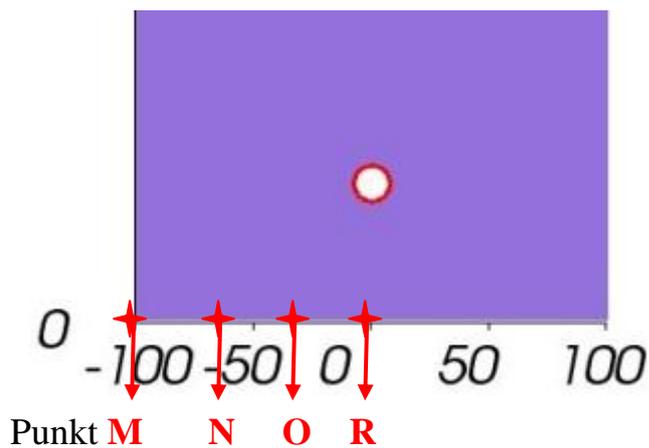


Abb. 2.7: Ausschnitt aus dem Berechnungsmodell: Vertikalschnitt durch die oberste Decke; Betonüberdecken: 5 cm; Lage der untersuchten Punkte; Maße in mm

Für eine Betonüberdeckung von 5 cm und stationären Verhältnissen (durchlaufende Umwälzpumpe) ergibt sich die Welligkeit als Differenz der (zeitlich unveränderlichen) Temperaturen am Punkt R und am Punkt M. Bei einer Heizmitteltemperatur von 29,1 °C (siehe Tab. 2.2) stellt sich direkt unter der Rohr (Punkt R) mit einer Temperatur von 26,12 °C eine etwas zu hohe Temperatur ein. Die Oberflächentemperatur in der Mitte zwischen jeweils 2 Rohren (Punkt M) liegt mit 25,88 °C etwas unter der Obergrenze der Oberflächentemperatur. Die Welligkeit – ausgedrückt als Differenz zwischen Maximal- und Minimaltemperatur der Deckenuntersicht - erweist sich mit 0,24 K im stationären Fall als vernachlässigbar klein.

In folgender Abbildung sind die Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen an den vier ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für den Fall einer 12-stündigen Beladungszeit ausgewiesen. Gemäß Tab. 2.2 wurde hierfür die Heizmitteltemperatur mit 30,0 °C konstant über den Zeitraum der Beladung angesetzt.

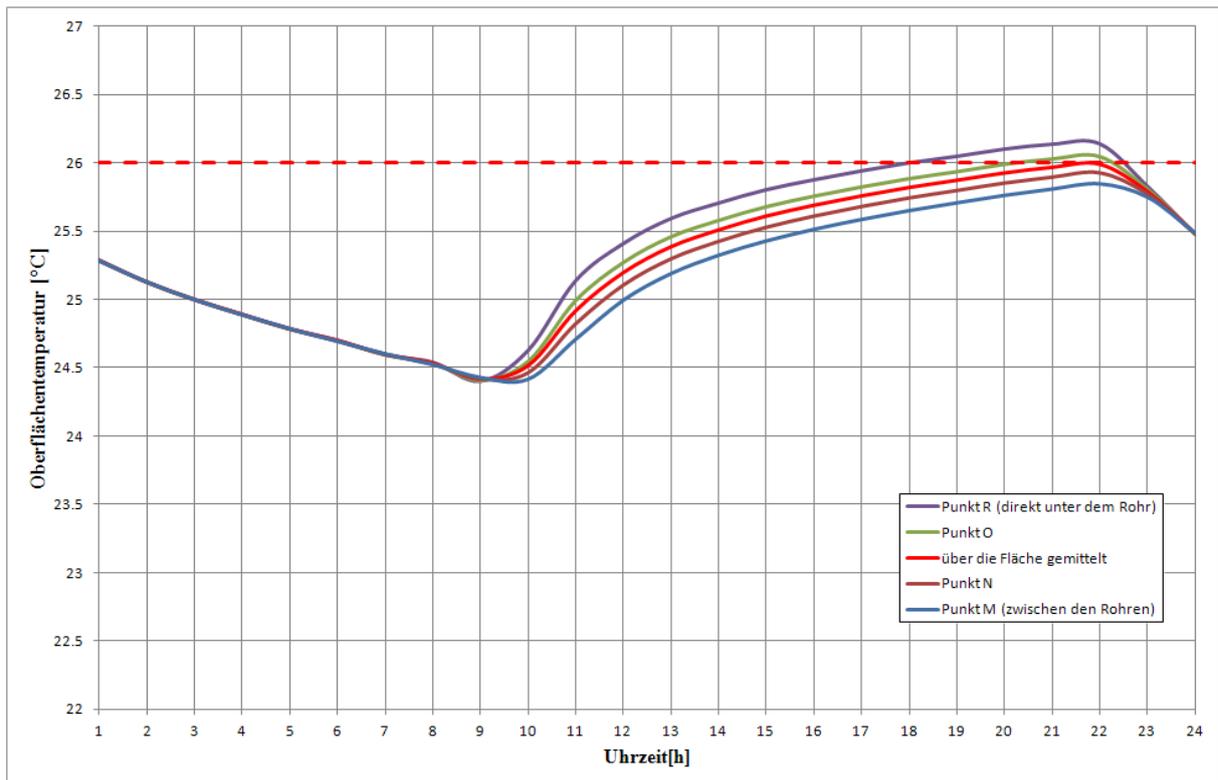


Abb. 2.8: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 5 cm; Beladungszeit: 12 Stunden; Heizmitteltemperatur 30,0 °C

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

Die Berechnung und Auswertung der Temperaturverteilung an der Untersicht der thermisch aktivierten Decke wird für den Fall der 8-stündigen Beladung wiederholt. Die folgende Abbildung zeigt die errechneten Tagesverläufe der Oberflächentemperaturen bei einer nach Tab. 2.2 angesetzten Heizmitteltemperatur von 31,1 °C.

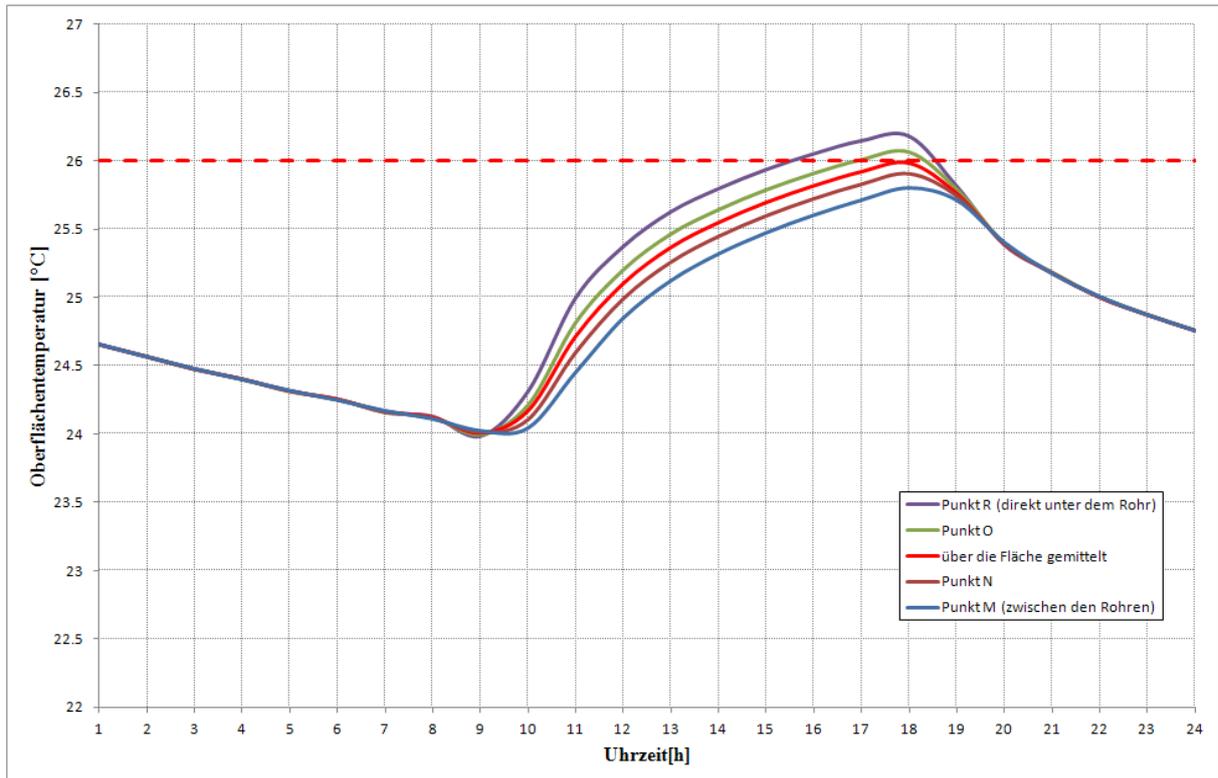


Abb. 2.9: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 5 cm; Beladungszeit: 8 Stunden; Heizmitteltemperatur 31,1 °C

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

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

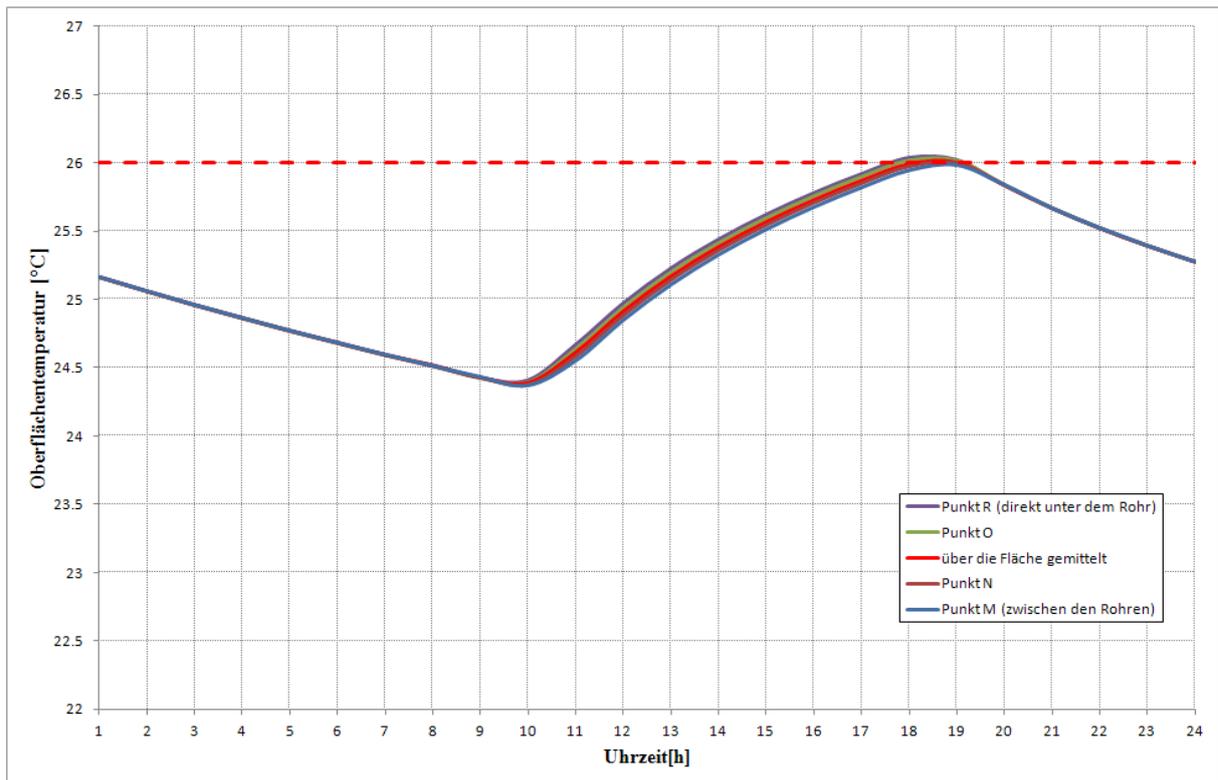


Abb. 2.10: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 10 cm; Beladungszeit: 8 Stunden; Heizmitteltemperatur 32,1 °C

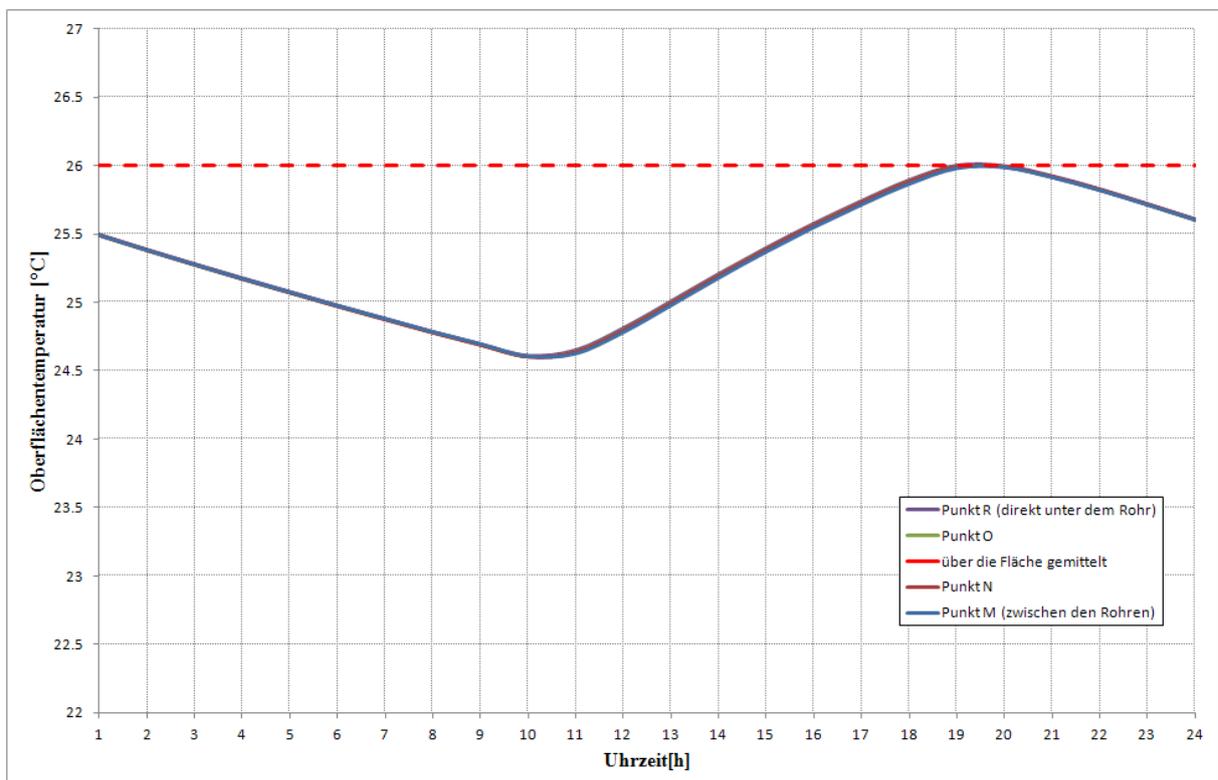


Abb. 2.11: Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten der Deckenuntersicht für eine Betonüberdeckung von 15 cm; Beladungszeit: 8 Stunden; Heizmitteltemperatur 33,1 °C

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

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

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

Conclusio

Die rechnerischen Untersuchungen zur maximal zulässigen Heizmitteltemperatur führen auf folgende Ergebnisse.

- Bei permanentem Betrieb der Umwälzpumpe und konstanten Temperaturen (stationärer Fall) zeigt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit der maximal zulässigen Heizmitteltemperatur vom Rohrabstand. Im Fall einer Betonüberdeckung von 5 cm liegt die zulässige Temperatur des Heizmittels im Rohr bei einem Achsabstand der Rohre von 5 cm ca. 5,0 K, bei einem Achsabstand von 50 cm aber bereits ca. 9,0 K über der Solltemperatur des Raums.
- Die Betonüberdeckung – also die Lage des Registers in der Stahlbetondecke – wirkt sich bei stationären Verhältnissen vergleichsweise wenig auf die maximal zulässige Heizmitteltemperatur aus. Grob gesagt führt eine Vergrößerung der Betonüberdeckung von 5 cm auf eine Erhöhung der maximal zulässigen Heizmitteltemperatur von ca. 0,5 K.
- Bei nicht durchlaufender Umwälzpumpe erhöht sich die maximal zulässige Heizmitteltemperatur. Bei einer 12-stündigen Beladungszeit und einer Betonüberdeckung von 5 cm beträgt diese Erhöhung ca. 1,0 K, bei einer auf 8 h verkürzten Beladungszeit bereits 2,0 K.
- Die Betonüberdeckung beeinflusst die maximal zulässige Heizmitteltemperatur bei kürzeren Beladungszeiten etwas mehr als bei durchlaufender Umwälzpumpe. Bei 12-stündiger Beladungszeit erhöht sich die maximal zulässige Temperatur bei Erhöhung der Betonüberdeckung um jeweils 5 cm um ca. 0,7 K, bei 8-stündiger Beladungszeit um 1,0 K.
- Der Tagesmittelwert der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung der Deckenuntersicht lässt sich bei kürzeren Beladungszeiten sehr nahe an den bei durchlaufender Umwälzpumpe erzielbaren Tagesmittelwert annähern, sofern von der Möglichkeit der Erhöhung der Heizmitteltemperatur bei verkürzten Beladungszeiten Gebrauch gemacht wird.
- Die Welligkeit, d. h. die sich an der Deckenuntersicht einstellende Ortsabhängigkeit der Temperatur, ist nur während der Beladungszeit sichtbar. Bei Betonüberdeckungen von 10 cm und größer liegt die maximale Temperaturdifferenz an unterschiedlichen Punkten der Deckenuntersicht im Bereich von 0,1 K und ist damit vernachlässigbar. Selbst bei einer Betonüberdeckung von nur 5 cm bleibt die Welligkeit im Tagesverlauf

unter 0,4 K und ist damit sicherlich nicht spürbar. Die nahezu isotherme Oberflächentemperatur im Bereich der thermisch aktivierten Decke ist als Qualitätsmerkmal anzusehen und in der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahlbetons begründet.

III. Lage des Kerntemperatur-Fühlers

Um eine Überhitzung der thermisch aktivierten Decke zu verhindern, muss die Heizmittelzufuhr unterbrochen werden, sobald die „Kerntemperatur“ der Decke zu hoch ansteigt. Natürlich ist die Stahlbetondecke nicht isotherm, sodass die Bedeutung des Begriffs „Kerntemperatur“ erst hinterfragt werden muss. Es besteht daher die Aufgabe, die Temperaturverteilung in einer thermisch aktivierten Decke zu berechnen. Da sich die Frage einer Abschaltung der Umwälzpumpe erst bei zeitlich veränderlicher Heizmittelzufuhr stellt, muss die Berechnung der Temperaturverteilung instationär erfolgen. Anschließend an die Ergebnisse des vorhergehenden Kapitels werden alle folgenden Berechnungen unter der Annahme einer 8-stündigen Beladungsdauer (von 9 Uhr bis 17 Uhr) durchgeführt.

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

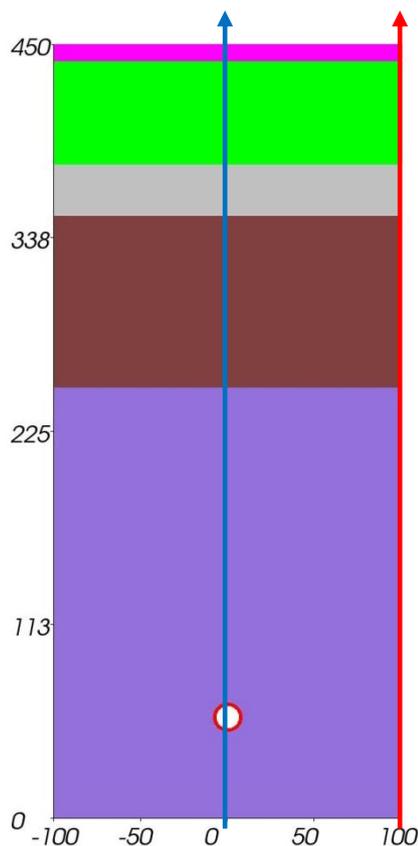


Abb. 3.1: Berechnungsmodell mit Schnitt- bzw. Symmetrieebenen; Maße in mm

Da nur die Temperaturverteilung in der Stahlbetondecke (lila in Abb. 3.1) interessiert, werden in einem ersten Schritt die Temperaturverläufe für Punkte entlang der roten Linie (rechts in

Abb. 3.1) beginnend von der Deckenuntersicht ($h=0$ cm) bis zur Oberkante der Stahlbetondecke ($h=25$ cm) ausgewertet.

In folgender Abbildung sind die Tagesgänge der Temperatur an 6 Punkten im Abstand von 5 cm (gekennzeichnet jeweils durch den Abstand h von der Deckenuntersicht) für den Fall einer Betonüberdeckung von 5 cm dargestellt. Zudem ist der Tagesgang der Temperatur am Punkt in der Höhe der Rohrachse grün ausgezeichnet. Gemäß Kapitel 2 wurde als Heizmitteltemperatur $31,1$ °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

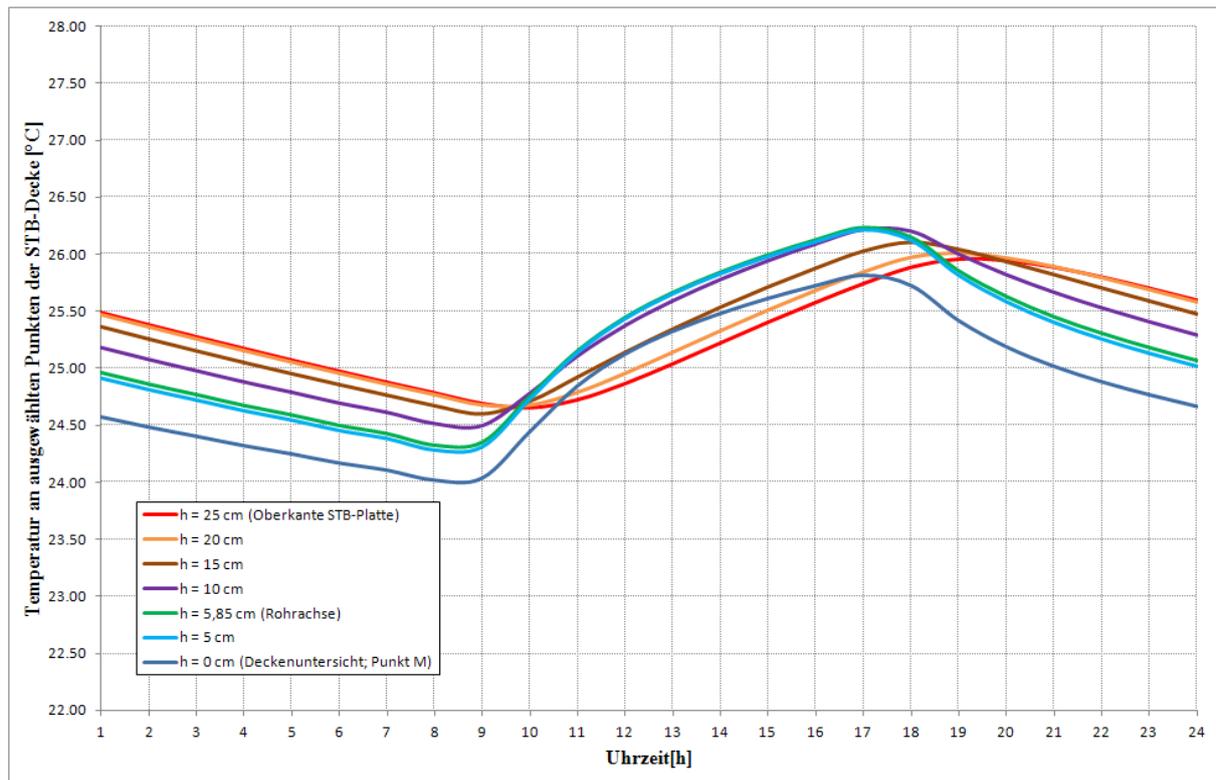


Abb. 3.2: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; Betonüberdeckung 5 cm

Es zeigt sich, dass sich in der Betondecke Temperaturverteilungen einstellen, die bei weitem nicht isotherm sind und sich im Tagesverlauf – und hier insbesondere während des Zeitraums der Aufladung – stark ändern. Den Ergebnissen von Kapitel 2 folgend, muss die Umwälzpumpe um 17 Uhr abgeschaltet werden, um eine Übertemperatur an der Deckenuntersicht auszuschließen. Die Temperaturverläufe zwischen 15 und 17 Uhr sind für den Punkt in 5 cm Höhe (hellblaue Linie in Abb. 3.2), den Punkt in Höhe der Rohrachse (grüne Linie) und den Punkt in 10 cm Höhe (lila Linie) nahezu deckungsgleich. Ein in diesem Bereich positionierter Sensor müsste bei Messung einer Temperatur von $26,2$ °C das Signal zur Abschaltung an die Umwälzpumpe schicken.

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

Anmerkung: In diesem Zusammenhang muss bedacht werden, dass sich der Messfühler in einem einbetonierten Röhrchen befindet und die Temperatur innerhalb dieses Volumens misst. Der vom Sensor gemessene Wert wird dem für diesen Punkt

berechneten Wert nur dann genügend nahe kommen, wenn eine gute thermische Verbindung zwischen Messfühler und Stahlbetondecke besteht. Eine Möglichkeit hierzu würde das Ausfüllen des Röhrchens mit einer Wärmeleitpaste vor dem Einschleiben des Messfühlers bieten.

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

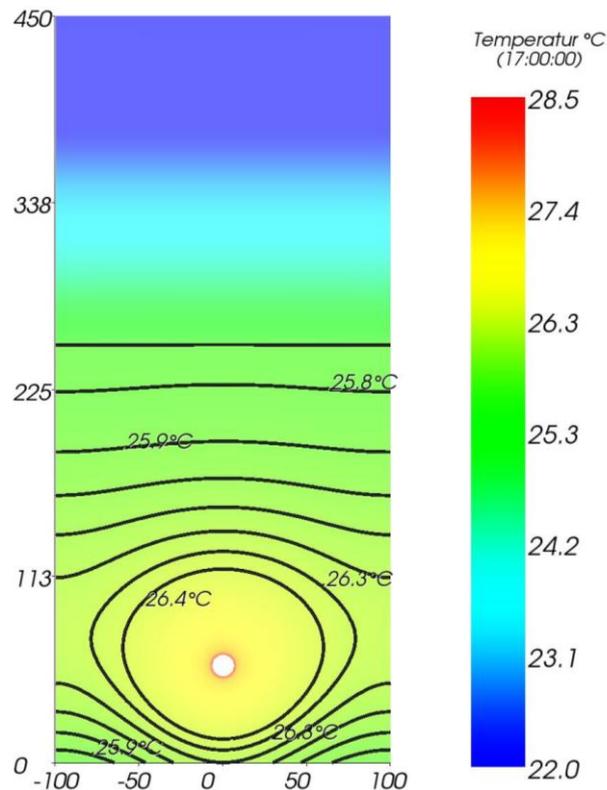


Abb. 3.3: Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke um 17 Uhr; Betonüberdeckung 5 cm

In Hinblick auf die Position des Kerntempersensors zeigt sich, dass eine Veränderung in vertikaler Richtung entlang der Symmetrielinie wenig kritisch ist. In Übereinstimmung zu Abb. 3.2 zeigt auch Abb. 3.3, dass ein Sensor mit einer Position von 5 cm bis 10 cm Höhe über der Deckenunterseite in etwa die gleiche Temperatur anzeigen wird. Eine Verschiebung des Sensors in horizontaler Richtung ist insofern kritischer als die Temperatur nach bereits ca. 3 cm um 0,1 K und bei weiterer Abweichung von der Symmetrieachse die Temperatur noch deutlich rascher ansteigt.

Anmerkung: Zwecks besserer Lesbarkeit von Abb. 3.3 wurden Isothermen nur im Temperaturbereich zwischen 25,7 °C und 26,4 °C im Abstand von jeweils 0,1 K ausgezeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt die Tagesgänge der Temperatur an den ausgewählten Punkten für den Fall einer Betonüberdeckung von 10 cm. Gemäß Kapitel 2 wurde als Heizmitteltemperatur 32,1 °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

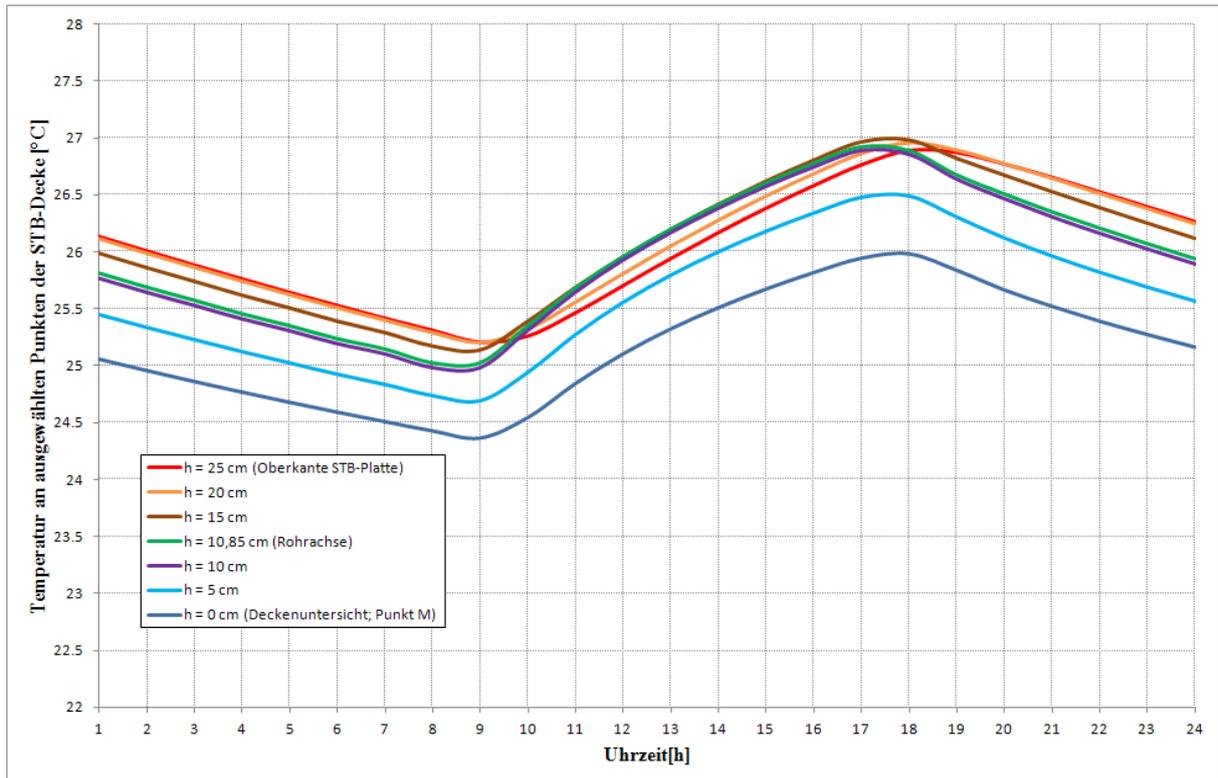


Abb. 3.4: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; Betonüberdeckung 10 cm

Die Temperaturverläufe zwischen 11 und 17 Uhr sind für den Punkt in 10 cm Höhe (lila Linie in Abb. 3.4), den Punkt in Höhe der Rohrachse (grüne Linie) und den Punkt in 15 cm Höhe (dunkelbraune Linie) nahezu deckungsgleich. Ein in diesem Bereich positionierter Sensor müsste bei Messung einer Temperatur von 26,9 °C das Signal zur Abschaltung an die Umwälzpumpe schicken.

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

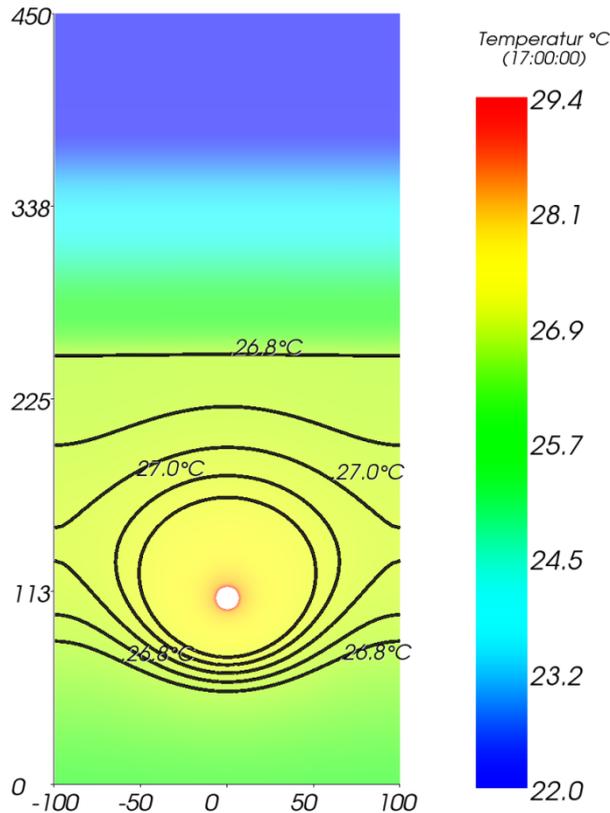


Abb. 3.5: Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke um 17 Uhr; Betonüberdeckung 10 cm

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

Anmerkung: Zwecks besserer Lesbarkeit von Abb. 3.5 wurden Isothermen nur im Temperaturbereich zwischen 26,8 °C und 27,2 °C im Abstand von jeweils 0,1 K ausgezeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt die Tagesgänge der Temperatur an den ausgewählten Punkten für den Fall einer Betonüberdeckung von 15 cm. Gemäß Kapitel 2 wurde als Heizmitteltemperatur 33,1 °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

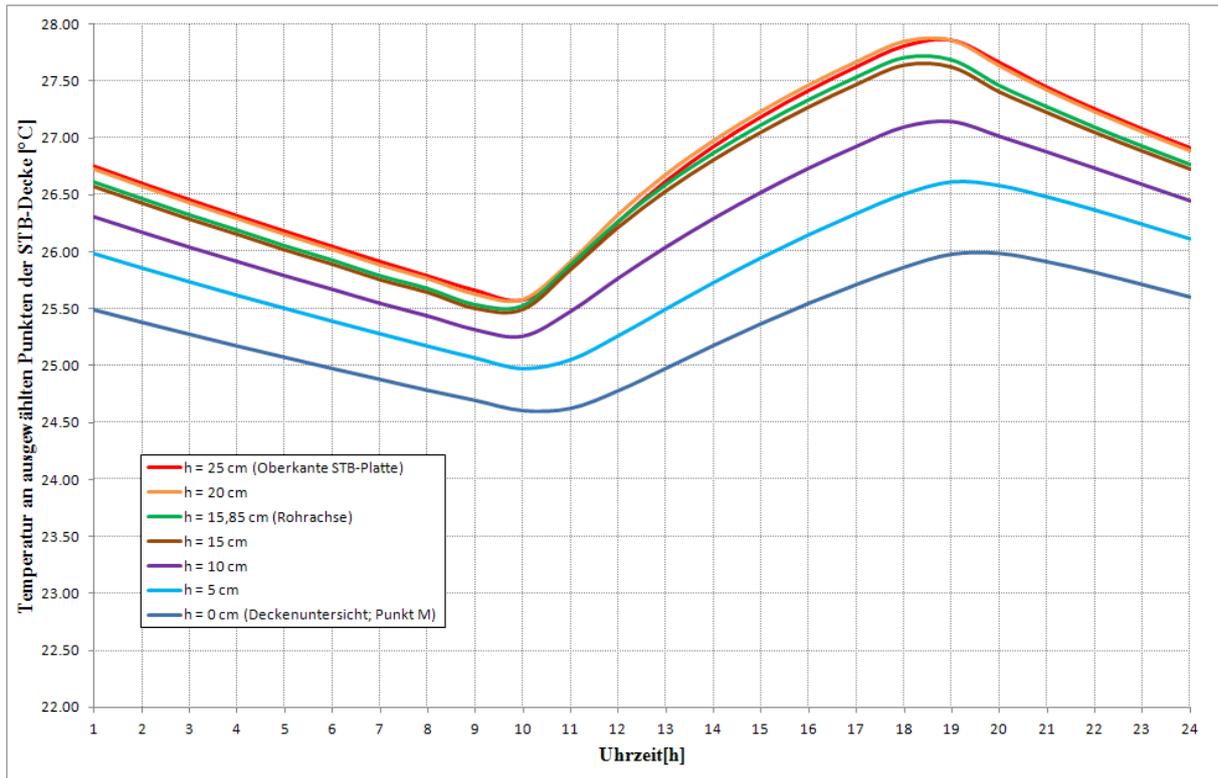


Abb. 3.6: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; Betonüberdeckung 15 cm

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

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

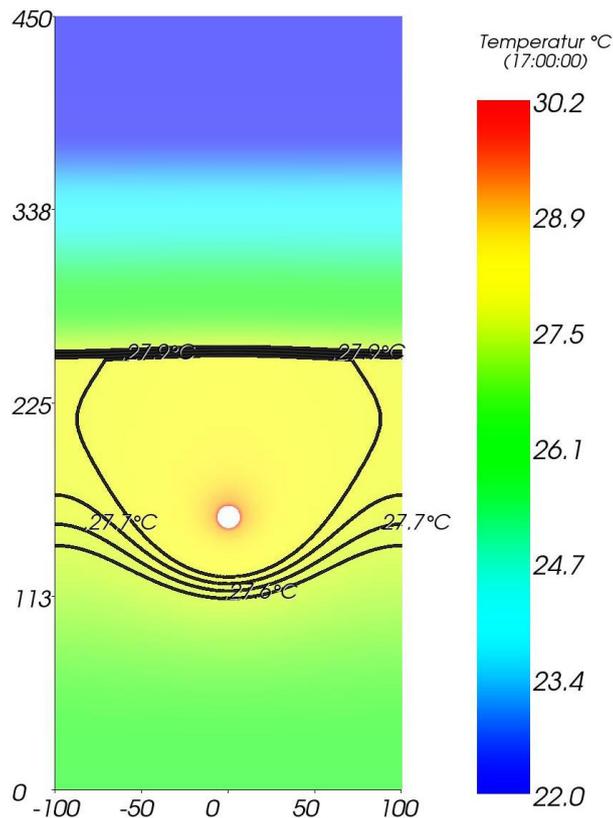


Abb. 3.7: Temperaturverteilung in der thermisch aktivierten Decke um 17 Uhr; Betonüberdeckung 15 cm

Die zweidimensional errechnete Temperaturverteilung bestätigt die aus Abb. 3.6 abgeleitete Aussage, wonach im Bereich der Symmetrieebene die obersten 10 cm der Betondecke nahezu isotherm sind.

Anmerkung: Zwecks besserer Lesbarkeit von Abb. 3.7 wurden Isothermen nur im Temperaturbereich zwischen 27,5 °C und 27,9 °C im Abstand von jeweils 0,1 K ausgezeichnet.

In Ergänzung zu den bisherigen Untersuchungen wird im Folgenden die Symmetrieebene durch die Rohrachse (blaue Linie in Abb. 3.1) auf ihre Eignung für die Positionierung eines Temperatursensors analysiert. In folgender Abbildung sind die Tagesgänge der Temperatur an 6 Punkten im Abstand von 5 cm für den Fall einer Betonüberdeckung von 5 cm dargestellt. Gemäß Kapitel 2 wurde als Heizmitteltemperatur 31,1 °C und als Raumtemperaturen über und unter der Trenndecke jeweils 22 °C angenommen.

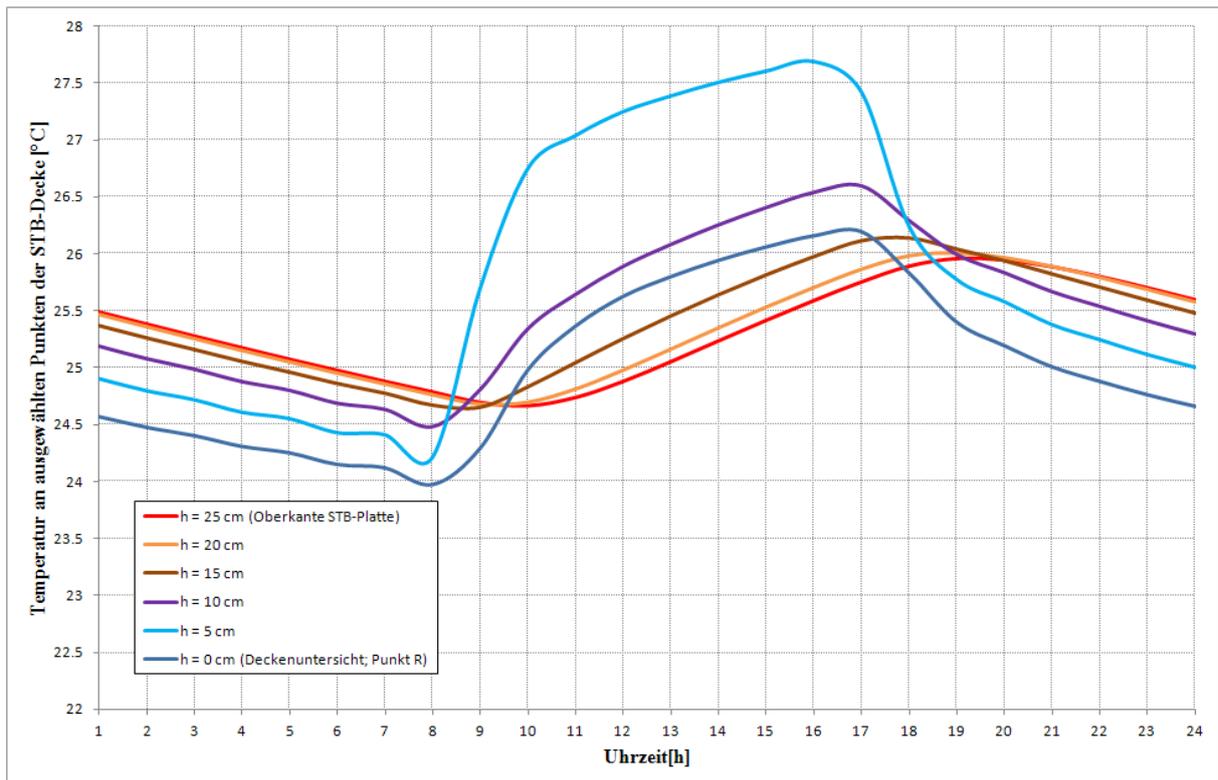


Abb. 3.8: Tagesgänge der Temperatur an ausgewählten Punkten der thermisch aktivierten Decke; Betonüberdeckung 15 cm; Ebene durch die Rohrachse

Im Gegensatz zur Abb. 3.2 sind die Tagesverläufe der Temperatur an den ausgewählten Punkten stark unterschiedlich. Dies bedeutet, dass entlang der Symmetrielinie durch die Rohrachse große Temperaturunterschiede vorherrschen und die von einem Fühler gemessenen Temperaturen eine starke Abhängigkeit von seiner Lage aufweisen werden. Aus diesem Grund ist die Positionierung in dieser Symmetrieebene nicht zu empfehlen.

Anmerkung: Bei den auffallend hohen Temperaturen an dem Punkt mit 5 cm Abstand von der Deckenuntersicht (hellblaue Linie in Abb. 3.8) handelt es sich um die Temperaturen an der äußeren Oberfläche des Heizrohrs.

Auch Abb. 3.3 weist auf die großen Temperaturunterschiede entlang der vertikalen Symmetrieebene durch die Rohrachse hin. Der Vergleich mit den Abb. 3.5 und 3.7 zeigt, dass diese Situation bei jeder Betonüberdeckung unverändert besteht.

Conclusio

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

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

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

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

IV. Literaturverzeichnis

1. **Kreč, K.** *Forschungsprojekt Energiespeicher Beton Endbericht*. s.l. : Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien, 2016.
2. *PHPP: Passivhaus Projektierungspaket, Version 9.2*. Darmstadt : Passivhausinstitut, 2015.
3. GEBA V8.0, Programmpaket zur Berechnung des thermischen Verhaltens von Räumen, Raumgruppen und Gebäuden. © K. Kreč. 2015.
4. ÖNorm B8110-5, Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile, Ausgabe März 2011.
5. INTEMP, Programmpaket zur instationären thermischen Simulation von Räumen, Raumgruppen und kleineren Gebäuden. © P.G.Gilli. 1978.
6. ÖNorm EN 1264-5. Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden - Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühlleistung. 2009.
7. **Friembichler, F., Handler, S., Kreč, K. & Kuster, H.** *Thermische Bauteilaktivierung*. s.l. : Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 9/2016, Wien, 2016.
8. AnTherm, Programmpaket zur Analyse des thermischen Verhaltens von Baukonstruktionen mit Wärmebrücken. © M. Kornicki. 2015.

Anhang: Entwicklung eines eindimensionalen Ersatzmodells für die thermische Bauteilaktivierung

Eine zutreffende Beschreibung des thermischen Verhaltens einer thermisch aktivierten Decke erfordert zumindest die Anwendung eines thermisch zweidimensional arbeitenden Berechnungsmodells. Simulationsprogramme zur Darstellung des thermischen Verhaltens von Räumen, Raumgruppen und Gebäuden arbeiten aber auch heute noch mit thermisch eindimensionalen Berechnungsmodellen. Als Baukonstruktionen gehen in diese Simulationsprogramme nur aus homogenen Schichten bestehende, plattenförmige Bauteile ein. Die Auswirkung einer thermischen Aktivierung über ein Rohrregister auf das thermische Verhalten kann mit diesen Simulationsprogrammen somit nicht unmittelbar erfasst werden. Dieser Problematik wurde bei verschiedenen Simulationsprogrammen – wie z. B. TRNSYS – insofern begegnet als spezielle Näherungsverfahren für die Bauteilaktivierung angeboten werden.

Hier soll ein anderer Weg eingeschlagen und versucht werden, die Eigenschaften einer thermisch aktivierten Decke möglichst gut auf ein thermisch eindimensionales Modell zu übertragen. Im Speziellen soll hierbei eine möglichst zutreffende Beschreibung des Auskühlverhaltens einer thermisch aktivierten Decke mit einem konventionellen, eindimensional arbeitenden Simulationsprogramm möglich gemacht werden.

Um eindimensional zu bleiben, ist es notwendig, das Rohrregister durch einen fiktiven Raum zu ersetzen, für dessen Inneres eine mittlere Heizmitteltemperatur anzusetzen ist. Die thermische Verkopplung zwischen dem „Rohrregister-Raum“ und dem zu temperierenden, unterhalb der aktivierten Decke liegenden Raum soll im thermisch eindimensionalen Modell durch zwei homogene Schichten vermittelt werden. Die eigentliche Aufgabe der Modellbildung besteht darin, die Wärmeleitfähigkeit und die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität dieser beiden homogenen Schichten derart anzusetzen, dass das stationäre und instationäre thermische Verhalten des eindimensionalen Berechnungsmodells möglichst gut mit dem mehrdimensional, instationär errechneten Verhalten der aktivierten Decke übereinstimmt. Das instationäre Verhalten soll hierbei für Vorgänge, die periodisch schwingen, angepasst werden.

Aufbauend auf den im Forschungsprojekt „Energiespeicher Beton“ (1) entwickelten Erkenntnissen wird das Verhalten der thermisch aktivierten Decke mittels zweidimensionaler Berechnung für einen Vertikalschnitt durch Decke und Rohrregister berechnet. Hierbei genügt es, nur ein Rohr des Registers in das Berechnungsmodell aufzunehmen.

Im Folgenden sollen die Räume mit „u“ für den unter der Decke liegenden Raum, mit „o“ für den oberhalb der Decke liegenden Raum und mit „r“ für das Innere der Rohre des Rohrregisters bezeichnet werden. Als Ergebnis der zweidimensionalen, stationären Berechnung liegen die längenbezogenen thermischen Leitwerte $L_{r,u}$, $L_{r,o}$ und $L_{u,o}$ vor. Die Division dieser mittels Programmpaket AnTherm (8) berechneten längenbezogenen thermischen Leitwerte durch die Breite des Berechnungsausschnitts führt unmittelbar auf die interessierenden flächenbezogenen Leitwerte. Gemäß (1) werden diese in der Folge mit $\Lambda_{r,u}$, $\Lambda_{r,o}$ und $\Lambda_{u,o}$ bezeichnet.

Die thermische Verkopplung zwischen dem Rohrregister und dem unter der Decke liegenden Raum wird mit dem eindimensionalen Berechnungsmodell dann richtig dargestellt, wenn

$$\Lambda_{r,u} = \frac{1}{R_{s,u} + R_{s,r} + \frac{d_u}{\lambda_u}} \quad \langle A.6 \rangle$$

ist. d_u und λ_u in Gleichung (A.1) sind die Schichtdicke und die Wärmeleitfähigkeit einer zwischen dem fiktiven „Rohrregister-Raum“ und dem zu beheizenden Raum situierten Schicht.

Durch geeignete Wahl der Schichtdicke d_u oder der Zuordnung einer fiktiven Wärmeleitfähigkeit λ_u zu einer Schicht mit vorgegebener Dicke kann somit die thermische Verkopplung zwischen dem Raum unterhalb der Decke und dem Rohrregister exakt nachgebildet werden.

Es hat sich in Hinblick auf die Nachbildung der instationären thermischen Eigenschaften der thermisch aktivierten Decke als vorteilhaft herausgestellt, nicht die Wärmeleitfähigkeit sondern die Schichtdicke der Schicht zwischen „Rohrregister-Raum“ und der Deckenuntersicht zu ändern sondern deren Schichtdicke.

Für diese Schichtdicke ergibt sich gemäß Gleichung <A.6>

$$d_u = \lambda_u \cdot \left(\frac{1}{\Lambda_{r,u}} - R_{s,u} - R_{s,r} \right) \quad \langle A.7 \rangle$$

λ_u ist hierbei die Wärmeleitfähigkeit, die dem 2D-Modell entspricht – also normalerweise jene des Stahlbetons. $R_{s,u}$ ist der Wärmeübergangswiderstand für die Deckenuntersicht. Für den Fall der Beheizung ist dieser gemäß ÖNorm EN 1264-5 (6) auf $R_{s,u} = \frac{1}{6,5} = 0,1539$ m^2KW^{-1} zu setzen. Im Fall der Kühlung – der sich natürlich auch mit dem hier skizzierten

Modell abbilden lässt – liegt $R_{s,u}$ mit $R_{s,u} = \frac{1}{10,8} = 0,093$ m^2KW^{-1} (6) deutlich niedriger.

$R_{s,r}$ ist der Wärmeübergangswiderstand zwischen Heiz- bzw. Kühlmittel und der inneren Oberfläche des Rohrs. Gemäß (1) ist $R_{s,r} = \frac{1}{500} = 0,002$ m^2KW^{-1} eine brauchbare Näherung.

Analog zur thermischen Verbindung zwischen Rohrregister und unter der Decke befindlichem Raum kann auch die thermische Verbindung zwischen Rohrregister und dem über der Decke befindlichen Raum modelliert werden. Der über der Decke befindliche Raum kann entweder ein Innenraum oder – im Fall eines Dachs – der Außenraum sein. Analog zu Gleichung <A.6> gilt

$$\Lambda_{r,o} = \frac{1}{R_{s,o} + R_{s,r} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \frac{d_o}{\lambda_o}} \quad \langle A.8 \rangle$$

In der Summe $\sum_j \frac{d_j}{\lambda_j}$ in Gleichung (3) werden die Wärmedurchlasswiderstände aller über dem Rohrregister befindlichen homogenen Schichten aufsummiert. Lediglich die Stahlbetonschicht oberhalb des Rohrregisters wird hierbei ausgenommen und explizit angeführt. Ihre Schichtdicke wird mit d_o und ihre Wärmeleitfähigkeit mit λ_o bezeichnet.

Im Fall des thermischen Kontakts zum oberhalb des Rohrregisters liegenden Raum erweist es sich als zweckmäßig, die Schichtdicke d_o vorzugeben und die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Schicht λ_o gemäß

$$\lambda_o = \frac{d_o}{\frac{1}{\Lambda_{r,o}} - \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} - R_{s,o} - R_{s,r}} \quad \langle A.9 \rangle$$

rückzurechnen.

Der Leitwert $L_{u,o}$ beschreibt die thermische Verkopplung zwischen dem unter und dem über der Decke liegenden Raum. Im eindimensionalen Modell ist dieser Wert immer null, da keine direkte thermische Verkopplung dieser beiden Räume möglich ist. Da $L_{u,o}$ im Normalfall sehr klein ist, kann diese Inkonsistenz zwischen 2D-Modell und 1D-Modell für gewöhnlich toleriert werden. Falls $L_{u,o}$ bei großen Rohrabständen nicht mehr vernachlässigbar ist, kann diese thermische Verkopplung im eindimensionalen Modell nachgebildet werden, indem neben dem Schichtaufbau mit dem „Rohrregister-Raum“ auch ein identischer Schichtaufbau ohne Rohrregister eingeführt wird. Die beiden Schichtaufbauten werden in diesem Fall nebeneinander eingeführt, was einer thermischen Parallelschaltung entspricht.

Im stationären Fall ist es – wie gezeigt – möglich, ein thermisches 1D-Modell derart zu konstruieren, dass eine exakte Übereinstimmung zwischen der mehrdimensionalen und der eindimensionalen Rechnung erreicht werden kann.

Anwendung: Thermisches Ersatzmodell für eine aktivierte oberste Decke

Den Schichtaufbau der den Auskühlungsberechnungen zugrunde gelegten obersten Decke ist in Tab. 2 des Berichts „Energiespeicher Beton“ (1) ausgewiesen, wird hier aber der besseren Lesbarkeit wegen wiederholt.

	d [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kgK]
oben / außen				
Dachabdichtung	0,01	0,170	1200	1,26
Wärmedämmung	0,32	0,036	25	1,40
Stahlbetondecke	0,25	2,200	2400	1,00
unten / Deckenuntersicht				

Tab. A.1: Schichtaufbau der obersten Geschoßdecke

Die Wärmeübergangswiderstände werden wie folgt angesetzt:

Oberfläche	R_s [m ² KW ⁻¹]
Flachdach oben	0,0400
Rohrinnenseite	0,0020
Deckenuntersicht	0,1539

Tab. A.2: Verwendete Wärmeübergangswiderstände

Die Stahlbeton-Deckenplatte ist thermisch aktiviert, wobei die Betonüberdeckung mit 5 cm fixiert wird.

Bezüglich der Art und Lage des Rohrregisters werden folgende Annahmen getroffen:

Rohr 17 x 2,0 (Außendurchmesser 17 mm; Dicke der Rohrwand 2,0 mm)

Achsabstand der Rohre: 20 cm
 Betonüberdeckung 5 cm

Die folgende Abbildung zeigt das zweidimensionale, vom Wärmebrückenprogramm AnTherm (8) generierte Berechnungsmodell der thermisch aktivierten obersten Decke.

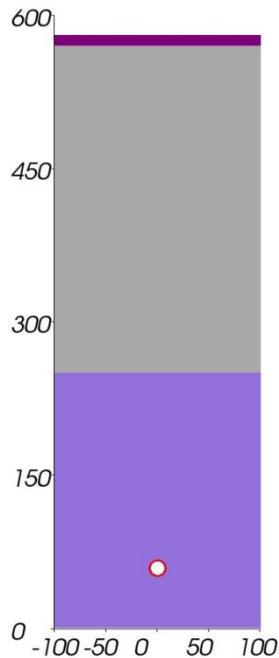


Abb. A.1: Berechnungsmodell, zweidimensional; Vertikalschnitt durch die oberste Decke; Betonüberdecken: 5 cm

Die Breite des Berechnungsausschnitts von 200 mm entspricht dem angenommenen Achsabstand der Rohre.

Als Ergebnis der stationären, zweidimensionalen Berechnung liegen folgende längenbezogene thermische Leitwerte vor.

Längenbezogener Leitwert [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]		
$L_{r,u}$	$L_{r,o}$	$L_{u,o}$
0,8627	0,0172	0,0048

Tab. A.3: berechnete längenbezogene thermische Leitwerte (stationär)

Ersichtlich ist die thermische Verkopplung zwischen dem zu beheizenden, unter der Decke liegenden Raum und dem Inneren des Heizrohrs, die durch den Leitwert $L_{r,u}$ charakterisiert wird, bei weitem am stärksten. Die für die weiteren Berechnungen benötigten flächenbezogenen Leitwerte ergeben sich durch Division mit der Breite des Berechnungsausschnitts von 0,2 m wie folgt:

Flächenbezogener Leitwert [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]		
$\Lambda_{r,u}$	$\Lambda_{r,o}$	$\Lambda_{u,o}$
4,3135	0,0860	0,0240

Tab. A.4: flächenbezogene thermische Leitwerte

Die Dicke der Schicht zwischen dem zu beheizenden Raum und dem fiktiven „Rohrregister-Raum“ im eindimensionalen Modell ist gemäß Gleichung <A.7> zu berechnen. Für den hier betrachteten Berechnungsfall ergibt sich demnach

$$d_u = \lambda_u \cdot \left(\frac{1}{\Lambda_{r,u}} - R_{s,u} - R_{s,r} \right) = 2,2 \cdot \left(\frac{1}{4,3135} - 0,1539 - 0,002 \right) = 0,167 \quad \text{<A.10>}$$

Für den Fall einer Betonüberdeckung von 5 cm muss also bei Festsetzung der Wärmeleitfähigkeit der fiktiven Schicht zwischen Rohrregisterraum und dem Raum unterhalb der Decke mit $2,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (bewehrter Stahlbeton) die Schichtdicke auf 16,7 cm gesetzt werden, um die thermische Verkopplung zwischen Rohrregister und dem unter der Decke liegenden Raum richtig zu erfassen. Dieses vorerst überraschende Ergebnis wird plausibel, wenn der Wärmedurchgang vom Rohrregister an den zu beheizenden Raum durch das Auszeichnen von Wärmestromlinien visualisiert wird – siehe die folgende Abbildung.

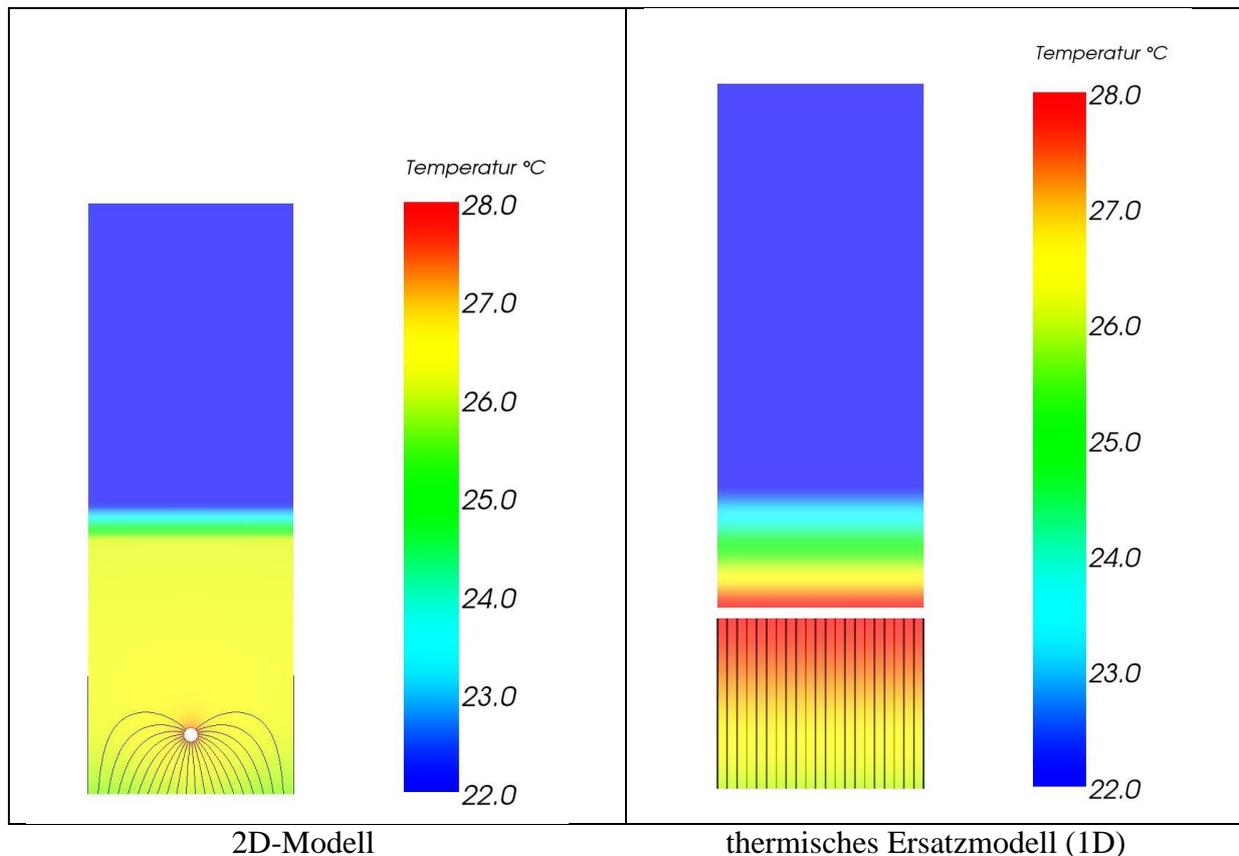


Abb. A.2: Wärmestromlinien zwischen Rohr und Deckenuntersicht;
 $\Theta_u = 22^\circ\text{C}$, $\Theta_o = -8^\circ\text{C}$ / $\Theta_r = 28^\circ\text{C}$ /
 Wärmestrom zwischen je 2 Stromlinien: $0,25 \text{ Wm}^{-1}$

Anmerkung: Um einen besseren Eindruck von der Temperaturverteilung im interessierenden Bereich zu erhalten, sind in den obigen Falschfarbendarstellungen der Abb. A.2 Temperaturen, die kleiner oder gleich 22°C sind, in dunkelblau ausgezeichnet.

An der Anzahl der in die Deckenuntersicht mündenden Wärmestromlinien zeigt sich, dass die thermische Verkopplung zwischen Rohr und dem unter der Decke liegenden Raum durch das thermische Ersatzmodell genau abgebildet wird. Der Wärmegewinn im Raum ist im ein-

mensionalen Ersatzmodell genauso groß wie im 2D-Modell und dies, obwohl sowohl die Geometrie als auch die Temperaturverteilung in den beiden Modellen stark unterschiedlich sind.

Zu beachten ist, dass neben der dem Raum zukommenden Wärmestromdichte auch die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht für das 2D-Modell und das eindimensionale Ersatzmodell annähernd übereinstimmt. Im eindimensionalen Ersatzmodell beträgt diese Oberflächentemperatur – natürlich ortsunabhängig - 25,97 °C. Im 2D-Modell zeigt sich eine gering ausgeprägte Welligkeit der Oberflächentemperatur; die Oberflächentemperatur schwankt zwischen 25,74 °C und 25,99 °C.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das entworfene eindimensionale Ersatzmodell das thermische Verhalten der Deckenuntersicht – und damit der „Heizfläche“ – im stationären Fall ausgezeichnet wiederzugeben vermag.

Um auch den Wärmeabfluss nach oben durch das thermische Ersatzmodell richtig abbilden zu können, wird die Wärmeleitfähigkeit der fiktiven, direkt über dem „Registerraum“ liegenden Schicht unter Verwendung von Gleichung (A.4) berechnet.

Der Wärmedurchlasswiderstand ergibt sich gemäß

$$\frac{d_o}{\lambda_o} = \frac{1}{\Lambda_{r,o}} - \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} - R_{s,o} - R_{s,r} \quad \langle A.11 \rangle$$

Im gegenständlichen Beispiel besteht die Summe der Wärmedurchlasswiderstände nur aus dem Term $\frac{d_i}{\lambda_i}$, der den Wärmedurchlasswiderstand der Wärmedämmschicht repräsentiert und

dem entsprechenden Term $\frac{d_a}{\lambda_a}$ für die Dachabdichtung. Der Widerstand der fiktiven Schicht errechnet sich zu

$$R_o = \frac{d_o}{\lambda_o} = \frac{1}{\Lambda_{r,o}} - \frac{d_i}{\lambda_i} - \frac{d_a}{\lambda_a} - R_{s,o} - R_{s,r} =$$

$$\frac{1}{0,086} - \frac{0,32}{0,036} - \frac{0,01}{0,17} - 0,04 - 0,002 = 2,638 \text{ m}^2\text{KW}^{-1} \quad \langle A.12 \rangle$$

Die Dicke der fiktiven Schicht wird mit dem Abstand zwischen dem Scheitelpunkt des Rohrs und der Unterseite der Dämmschicht identifiziert. Für eine Betonüberdeckung von 5 cm ergibt sich d_o zu 0,183 m. Die Wärmeleitfähigkeit der fiktiven Schicht errechnet sich damit gemäß

$$\lambda_o = \frac{d_o}{R_o} = \frac{0,183}{2,638} = 0,069 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \quad \langle A.13 \rangle$$

Anmerkung: Natürlich können auch andere Annahmen in Hinblick auf die Schichtdicke d_o getroffen werden. Wichtig ist nur, dass der Wärmedurchlasswiderstand R_o richtig angesetzt wird.

Um den Wärmeabfluss nach oben im stationären Fall richtig zu erfassen, muss die Wärmeleitfähigkeit der ursprünglichen Stahlbetonschicht (mit $\lambda = 2,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) auf $0,068 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ - also auf einen für wärmedämmende Stoffe passenden Wert - reduziert werden.

Das instationäre Verhalten der thermisch aktivierten Decke kann durch das thermische 1D-Modell nur näherungsweise abgebildet werden. Um das Auskühlverhalten der Decke nach Abschaltung der Umwälzpumpe zu erfassen, wird eine Auskühlungsphase von 4 Tagen Länge bei konstant auf 22 °C liegender Raumtemperatur untersucht. Gerechnet wird zweidimensio-

nal, periodisch eingeschungen mit 1 Woche als Periodenlänge. Die folgende Abbildung zeigt den errechneten Zeitverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung an der Unterseite der beheizten Decke. Die hier interessierende Phase der Abkühlung ist hellblau hinterlegt.

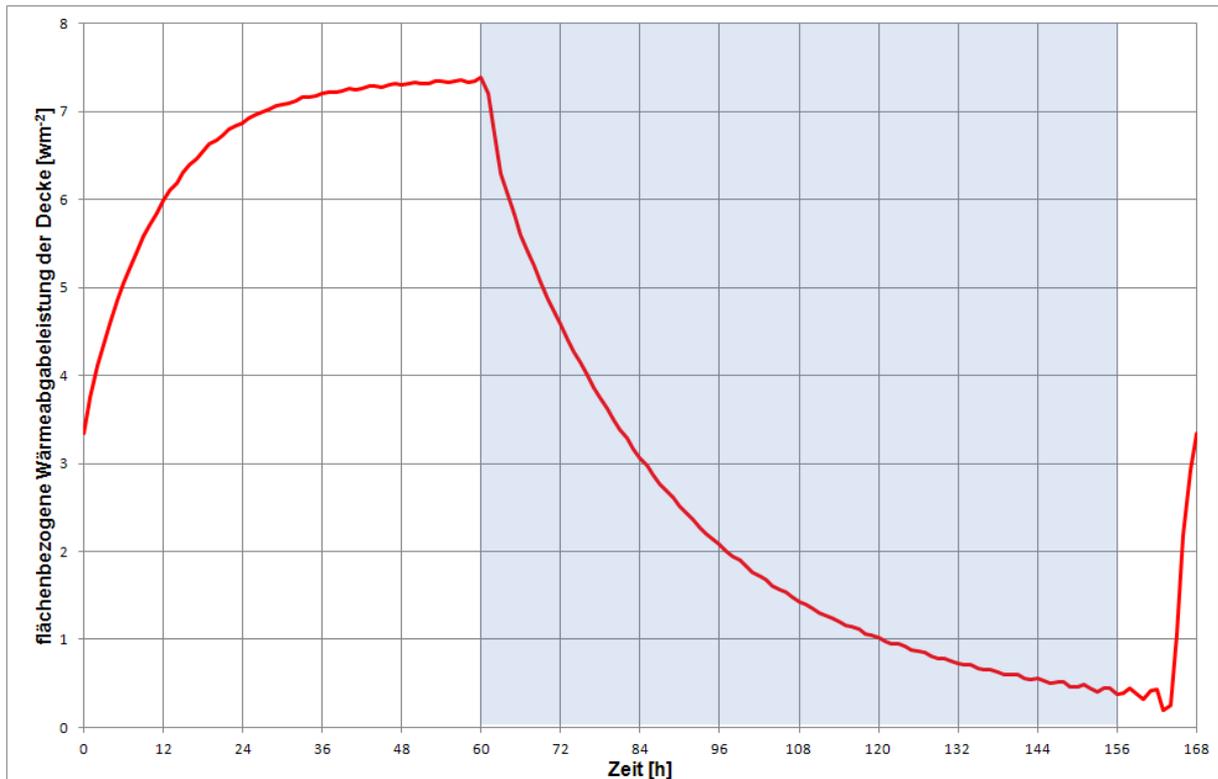


Abb. A.3: Zweidimensional errechneter Zeitverlauf der flächenbezogenen Wärmeabgabeleistung an der Deckenunterseite

Bei der Entwicklung eines eindimensionalen thermischen Ersatzmodells muss nicht nur danach getrachtet werden, dass die in Abb. A.3 im hellblau hinterlegten Bereich gezeigten Kurvenverläufe möglichst gut approximiert werden. Es ist zudem zu fordern, dass das instationäre Verhalten der Decke bei variierender Lufttemperatur im unter der Decke liegenden Raum durch das Modell gut wiedergegeben wird. Der letztgenannten Forderung kann gut entsprochen werden, wenn im eindimensionalen Ersatzmodell eine 10 cm dicke Stahlbeton-Schicht als unterste Schicht des Deckenaufbaus eingeführt wird. Dies ist immer möglich, da die Schichtdicke zwischen dem fiktiven Rohr-Raum und der Deckenunterseite mit 16,7 cm – siehe Gleichung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. – groß** genug ist. Der Schichtaufbau zwischen Deckenunterseite und fiktivem Rohr-Raum besteht somit aus 2 Schichten gemäß nachstehender Tabelle.

Bezeichnung	d [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kgK]
Rohr-Raum (fiktiv)				
fiktive Schicht	0,067	2,200	???	???
Stahlbeton	0,100	2,200	2400	1,00
unten / Deckenunterseite				

Tab. A.4: Schichtaufbau zwischen Deckenunterseite und Rohr-Raum für eine Betonüberdeckung von 5 cm

Es besteht nun die Aufgabe, die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität – also $c \cdot \rho$ – der fiktiven Schicht derart festzulegen, dass die das Auskühlverhalten jenem des zweidimensional errechneten möglichst nahe kommt.

Mittels einer Parameterstudie mit $c \cdot \rho$ als Parameter wird diese Anpassung vollzogen. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis dieser Parameterstudie.

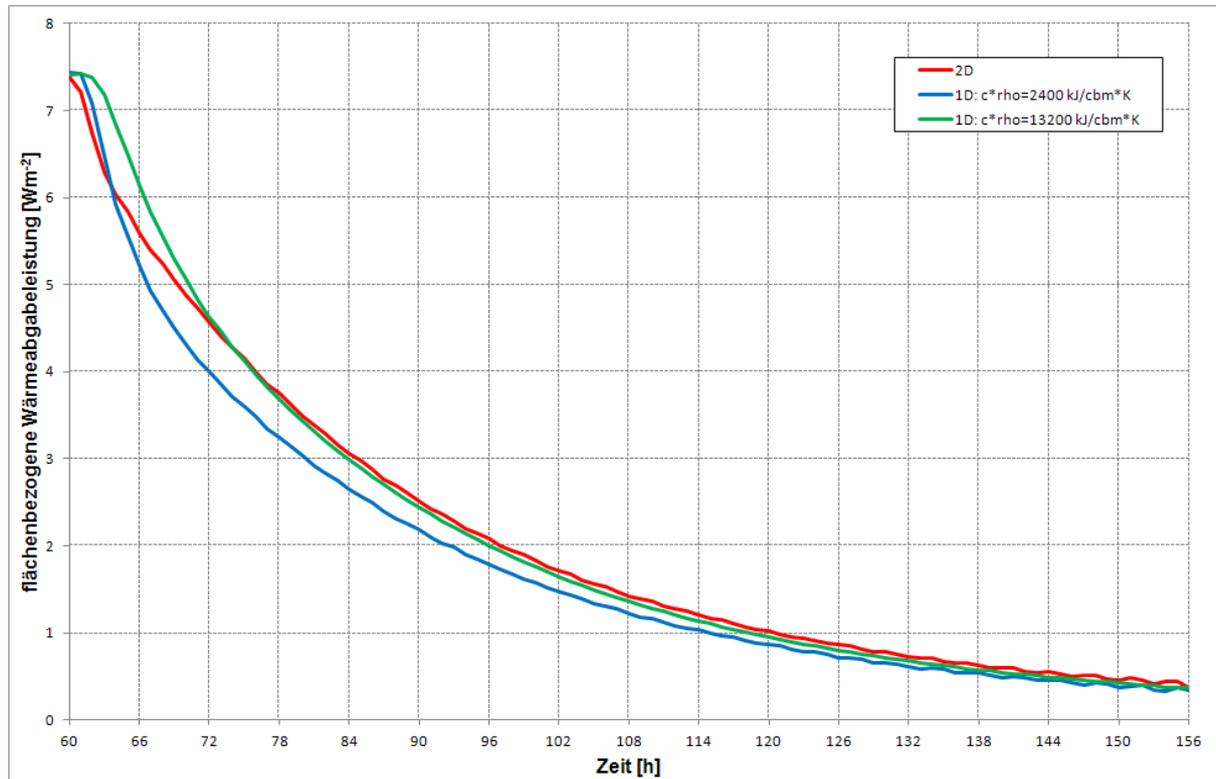


Abb. A.4: Ergebnis der Anpassung des Auskühlverhaltens des thermisch eindimensionalen Modells

Es zeigt sich, dass das eindimensionale Modell die Auskühlung der Decke nicht ganz genau wiedergeben kann. In den ersten 12 Stunden der Auskühlphase liegt die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung für das eindimensionale Ersatzmodell (grüne Linie) zu hoch. In der darauffolgenden Zeit liegt die Wärmeabgabeleistung des Ersatzmodells (grüne Linie) etwas tiefer als jene des thermisch zweidimensionalen Modells (rote Linie).

Wird als Kriterium für die Güte der Anpassung die in der Abkühlphase von der Decke abgegebene Wärmemenge – das ist die Fläche unter der jeweiligen, in Abb. A.4 gezeigten Kurve – herangezogen, so ergibt sich als volumenbezogene spezifische Wärmekapazität ein Wert von $13200 \text{ kJ/m}^3\text{K}$. Dieser extrem hohe Wert rührt daher, dass im zweidimensionalen Modell natürlich die gesamte, 25 cm dicke Stahlbetondecke als Wärmespeicher wirksam wird. Im eindimensionalen Ersatzmodell besteht hingegen keine thermische Verkopplung zwischen der über dem Rohr-Raum befindlichen Stahlbetondecke und dem zu beheizenden Raum. Dieser unvermeidliche Fehler des eindimensionalen Modells wird durch die extrem speichfähige, fiktive Schicht gut kompensiert.

Anmerkung: In Abb. A.4 ist der Verlauf für den Fall, dass die spezifische Wärmespeicherfähigkeit der fiktiven Schicht mit jener von Stahlbeton angenommen wird, in blau ausgezeichnet. Grund für diese Berechnungsvariante ist die Erfahrung, dass der Fehler, das instationäre Verhalten des thermischen Ersatzmodells zu ignorieren, gerne gemacht wird. Damit ergibt sich

die von der Decke während der Auskühlungsphase abgegebene Wärmemenge um ca. 11% zu klein. Mit einer volumenbezogenen spezifischen Wärmekapazität von $13200 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ liegt der Unterschied zwischen dem zweidimensionalen Ergebnis und jenem des eindimensionalen Ersatzmodells in Hinblick auf die abgegebene Wärmemenge unter einem Promille und ist damit zu vernachlässigen.

Die folgende Tabelle zeigt als Ergebnis der Parameterstudie den Schichtaufbau des eindimensionalen Modells zwischen Rohr-Raum und Deckenuntersicht.

Bezeichnung	d [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kgK]
Rohr-Raum (fiktiv)				
fiktive Schicht	0,067	2,200	6600	2,00
Stahlbeton	0,100	2,200	2400	1,00
unten / Deckenuntersicht				

Tab. A.5: Schichtaufbau zwischen Deckenuntersicht und Rohr-Raum; Werte für die fiktive Schicht ergänzt

Um zu vermeiden, dass das in der Folge verwendete Simulationsprogramm eine Massendichte von 13200 kgm^{-3} nicht akzeptiert, ist die spezifische Wärmekapazität der fiktiven Schicht in Tab A.5 auf $2,0 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ gesetzt.

Die thermisch eindimensional arbeitende Ersatzkonstruktion für die thermisch aktivierte, oberste Decke mit einer Betonüberdeckung von 5,0 cm zeigt die folgende Tabelle. Mit diesem fiktiven Aufbau werden die Simulationen des Abkühlverhaltens unter Zugriff auf Programmpaket INTEMP (5) durchgeführt. Da nur das Abkühlverhalten interessiert, geht die Dicke des fiktiven Rohr-Raums nicht in das Ergebnis ein, sollte jedoch klein angesetzt werden, um den Effekt des auskühlenden Heizmittels nicht zu groß werden zu lassen. Dem Rohr-Raum ist eine mittlere Heizmitteltemperatur zuzuordnen.

Bezeichnung	d [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kgK]
oben/außen				
Dachabdichtung	0,010	0,170	1200	1,26
Wärmedämmung	0,320	0,036	25	1,40
fiktive Schicht oben	0,183	0,069	2400	1,00
Rohr-Raum (fiktiv)	0,001			
fiktive Schicht unten	0,067	2,200	6600	2,00
Stahlbeton	0,100	2,200	2400	1,00
unten / Deckenuntersicht				

Tab. A.6: Schichtaufbau des thermisch eindimensionalen Ersatzmodells für eine Betonüberdeckung von 5 cm