



Diplomarbeit

Betonkernaktivierung für Deckensysteme in Fertigteilbauweise

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs
der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften
unter der Leitung von

Peter Kautsch
Univ.-Prof. DDr.

Hans Hafellner
Dipl.-Ing. Baumeister

Institut für Hochbau

Eingereicht an der Technischen Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Von

Wolfgang Gappmaier
1231087
Mascagnigasse 14, 5020 Salzburg

Graz, im Dezember 2017

Kurzfassung

Die Implementierung zukunftsorientierter Heiz- und Kühlsysteme in Kombination mit erneuerbaren Energien stellt eine zentrale Rolle in der Gebäudetechnik im Bauwesen dar. Eine moderne Variante um diese Ziele zu erreichen ist die thermische Bauteilaktivierung. Mithilfe dieser Methode können Gebäude mit geringem Energieaufwand temperiert werden. Außerdem ist es möglich zu Energiespitzenzeiten diese in Form von Wärme im Bauteil Decke zu speichern. Dies soll in einem Bauprojekt in Grödig bei Salzburg umgesetzt werden. Neuartig ist die Integration als Fertigteilbauweise. Diese Arbeit untersucht sechs verschiedene Parameter, die das thermische Verhalten einer betonkernaktivierten Fertigteildecke beeinflussen.

Es werden zwei verschiedene Rohrdurchmesser innerhalb des Querschnitts untersucht, ob eine Decke eine Putzschicht besitzt oder nicht, wie sich diese Veränderung auswirkt und wie sich die Höhenlage von Mindestbetondeckung unten und oben, die Position in der Mitte und 5 cm oberhalb der Querschnittsunterkante und der Achsabstand von 15 cm und 20 cm der Rohrregister auswirken. Zudem - in dieser Art neuartig - sind verschiedene Deckenstärken von 22,25 und 30 cm und ihre Speicherwirkung untersucht worden, aber auch auf drei unterschiedliche Materialien Leichtbeton, Normalbeton und UHPC samt deren thermischen Eigenschaften wird eingegangen. Der wichtigste zu betrachtende Wert ist die Kennliniensteigung an der Deckenunterseite. Sie ist der entscheidende Wert zur Berechnung der Wärmeabgabeleistung und entspricht damit der Gesamtleistung des Systems. Unabhängig davon ist die Temperaturspreizung von Raumtemperatur und Heiz- bzw. Kühlmittel, damit allgemein gültige Aussagen getroffen werden können.

Mithilfe von Simulationen werden Vor- und Nachteile einzelner Parameter sowohl stationär als auch instationär simuliert. Bei der Eingabe wurde besonderes Augenmerk auf die genaue Abbildung eines PEX-Rohres und dessen Verhalten im Querschnitt gelegt. Ebenso wurden nicht nur Heizsysteme simuliert, sondern auch Kühlungen untersucht, die speziell für den sommerlichen Wärmeschutz für künftige Projekte von großem Interesse sind. Insgesamt sind 576 stationäre Berechnungen durchgeführt und jeder einzelne Parameter mit zumindest einem anderen verglichen worden, um auftretende und sich beeinflussende Effekte besser darzustellen zu können. Für die Berechnung der instationären Ergebnisse sind 108 verschiedene Simulationen mit unterschiedlichen zeitabhängigen Temperaturkurven erstellt worden, dadurch sind 51840 verschiedene Ergebnisse erhalten worden. Durch diese Vielzahl an Ergebnissen werden einzelne Aussagen verfeinert und erhalten besondere Bedeutung nicht nur für ein System in Fertigteilbauweise, sondern gleichermaßen auch für Ortbetonlösungen. Es wird dabei gezeigt, welche Auswirkungen die Änderungen der einzelnen Parameter für das Gesamtsystem haben und welche Einsparpotentiale dadurch entstehen. Eine allgemeingültige Aussage zu jedem einzelnen Parameter ist nicht möglich, da die Simulationen in einigen Fällen positive Effekte nach sich ziehen, in anderen aber die günstigen Wirkungen beeinträchtigen. Die hier gewonnenen Erkenntnisse dienen dazu, ein Deckenheizsystem optimal für den Einbau in einem Fertigteilelement zu dimensionieren. Überdies zeigt diese Arbeit, dass Lösungen in Fertigteilelementen nicht nur möglich sind, sondern sich in einigen Fällen günstig auf das Verhalten auswirken können.

Keywords: Betonkernaktivierung, Fertigteilbauweise, Parameterstudie, Deckenheizung/-kühlung, Energiespeicher

Abstract

The implementation of modern techniques for cooling and heating systems combined with renewable energy resources is very important in the field of building technologies. A modern method to achieve these goals is thermal concrete core activation. Thanks to concrete core activation buildings can be temperate with low energy consumption. The technique helps to create energy storage through periods where enough energy is produced. This shall be realized in a project located in Grödig near Salzburg. A new idea is to combine this system in precast concrete elements. The focus is on the thermal behavior of six different parameters which influence a concrete core activated slab.

Within this thesis two different diameters are investigated. It is pointed out how a plaster influences the results. Also, four vertical position which are just underneath the concrete cover, in the middle of the cross section and 5 cm above the ceiling and the axial spacing of the pipes is examined. New investigations are made for different materials like lightweight concrete, normal concrete and UHPC as well as different ceiling thicknesses 22, 25 and 30 cm are analyzed. The most important value is the thermal conductance of the ceilings soffit. It helps to determine the overall energy output of the system. This can be made without struggling with the customers preferences concerning temperature and the temperature of the heating and cooling fluid which makes it independent to compare. This value is calculated with a simulation program to point out pros and cons of every single parameter.

The simulations are done stationary and transient. Particular attention is payed to the simulation of a PEX tube and its behavior. There is not only the investigation of heating system but also of cooling solutions. According to future needs for summer heat protections this is a central point of interest. 576 different simulations were made without any time related specialties. Every single parameter is compared to at least one other to figure out how they influence each other. The transient simulations consist of 108 different files with different time-temperature function. Altogether there are 51840 different results. To have a better overview of all the results the transient parameters are only compared with themselves. Thank to this variety of results the statements are more valuable not only for precast concrete companies but also for cast in-situ concrete solutions. It is shown how changing different parameters effects the whole thermal behavior of the slab and where possible savings can be made. An overall statement for the single parameter cannot be made because sometimes the change of a parameter has positive effects on the system and simultaneously has negative effects according to a different simulation. The results from this thesis enable a precast concrete company to optimize the special needs of a heating or cooling system. It also shows that the use of heating tubes within the precast slab is not only possible but also advantageous.

Keywords: concrete core activation; precast concrete elements; parameters; heating and cooling system; energy storage

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Motivation und Zielsetzung | 1 |
| 2. Stationäre Untersuchung | 3 |
| 2.1 Beschreibung des Konstruktionsaufbau..... | 3 |
| 2.1.1 <i>Bauteilaufbau</i> | 3 |
| 2.1.2 <i>Vereinfachungen und spezielle Betrachtungen</i> | 6 |
| 2.1.2.1 Einfluss von Stahleinlagen..... | 6 |
| 2.1.2.2 Querschnittsreduzierung und Rechenoptimierung | 7 |
| 2.1.2.3 Parameter für Heizmedium..... | 9 |
| 2.2 Parameterstudie..... | 12 |
| 2.2.1 <i>Allgemeines</i> | 12 |
| 2.2.2 <i>Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht</i> | 14 |
| 2.2.2.1 Ergebnisse – Parameter Putz | 15 |
| 2.2.2.2 Putz und Achsabstand..... | 16 |
| 2.2.2.3 Putz, Achsabstand und Rohrdurchmesser..... | 18 |
| 2.2.2.4 Putz und Höhenlage..... | 19 |
| 2.2.2.5 Putz, Höhenlage und Deckenstärke | 22 |
| 2.2.2.6 Putz, Materialien und Deckenstärken..... | 24 |
| 2.2.3 <i>Verschiedene Rohrdurchmesser</i> | 27 |
| 2.2.3.1 Rohrdurchmesser und Höhenlage | 27 |
| 2.2.3.2 Rohrdurchmesser, Höhenlage und Deckenstärke..... | 30 |
| 2.2.3.3 Rohrdurchmesser, Höhenlage und Materialien | 32 |
| 2.2.4 <i>Achsabstand</i> | 34 |
| 2.2.4.1 Achsabstand und Höhenlage..... | 35 |
| 2.2.4.2 Achsabstand, Höhenlage und Deckenstärke | 37 |
| 2.2.4.3 Achsabstand, Höhenlage und Materialien | 40 |
| 2.2.5 <i>Verschiedene Deckenstärken</i> | 42 |
| 2.2.5.1 Deckenstärke und Höhenlage..... | 43 |
| 2.2.6 <i>Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC</i> | 46 |
| 2.2.6.1 Materialien zu anderen Parametern | 47 |
| 2.2.7 <i>Höhenlage</i> | 50 |
| 2.2.7.1 Höhenlage zu anderen Parametern | 51 |
| 2.3 Conclusio..... | 53 |
| 2.3.1 <i>Ergebnis Darstellung von, Höhenlage, Achsabstand, Putz und Deckenstärke</i> | 53 |
| 2.3.2 <i>Ergebnisdarstellung von Material, Höhenlage und Rohrdurchmesser</i> | 57 |
| 2.4 Ausblick Kühlung..... | 62 |
| 2.4.1 <i>Ergebnisdarstellung von Material, Höhenlage und Rohrdurchmesser</i> | 63 |
| 2.4.2 <i>Ergebnisdarstellung von Material, Höhenlage und Rohrdurchmesser</i> | 65 |
| 3. Instationäre Untersuchung | 69 |
| 3.1 Beschreibung des Konstruktionsaufbau..... | 69 |
| 3.1.1 <i>Randbedingungen</i> | 69 |
| 3.2 Parameterstudie..... | 69 |
| 3.2.1 <i>Allgemeines</i> | 69 |
| 3.2.2 <i>Zyklischer Heiz-/Kühlvorgang</i> | 72 |
| 3.2.2.1 Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht | 73 |
| 3.2.2.2 Verschiedene Rohrdurchmesser..... | 75 |
| 3.2.2.3 Achsabstand..... | 77 |
| 3.2.2.4 Verschiedene Deckenstärken | 79 |
| 3.2.2.5 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC..... | 83 |
| 3.2.2.6 Höhenlage | 85 |
| 3.2.3 <i>Permanent An</i> | 87 |
| 3.2.3.1 Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht Teil 2 | 89 |
| 3.2.3.2 Verschiedene Rohrdurchmesser Teil 2 | 90 |
| 3.2.3.3 Achsabstand – Teil 2..... | 92 |
| 3.2.3.4 Wirtschaftlicher Aspekt des Achsabstands - Exkurs..... | 94 |
| 3.2.3.5 Verschiedene Deckenstärken – Teil 2 | 96 |
| 3.2.3.6 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC – Teil 2..... | 99 |
| 3.2.3.7 Höhenlage – Teil 2..... | 101 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.2.4 | <i>Permanent Aus</i> | 103 |
| 3.2.4.1 | Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht – Teil 3 | 104 |
| 3.2.4.2 | Verschiedene Rohrdurchmesser – Teil 3 | 105 |
| 3.2.4.3 | Achsabstand – Teil 3 | 107 |
| 3.2.4.4 | Verschiedene Deckenstärken – Teil 3 | 108 |
| 3.2.4.5 | Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC – Teil 3 | 112 |
| 3.2.4.6 | Höhenlage – Teil 3 | 113 |
| 4. | Integration der Ergebnisse als Fertigteilbauweise | 118 |
| 4.1 | Allgemeines | 118 |
| 4.2 | Interpretation der Parameter | 118 |
| 4.2.1 | <i>Interpretation einer verputzten Stahlbetonuntersicht</i> | 118 |
| 4.2.2 | <i>Interpretation verschiedener Rohrdurchmesser</i> | 119 |
| 4.2.3 | <i>Interpretation des Achsabstands</i> | 120 |
| 4.2.4 | <i>Interpretation der Deckenstärken</i> | 122 |
| 4.2.5 | <i>Interpretation der Materialien</i> | 124 |
| 4.2.6 | <i>Interpretation der Höhenlage</i> | 126 |
| 4.3 | Diskussion zur Implementation als Fertigteilbauweise | 127 |
| 4.3.1 | <i>Planungsgrundlagen</i> | 127 |
| 4.3.2 | <i>Positionierung im Querschnitt</i> | 128 |
| 4.3.3 | <i>Druckdichtheitsprüfungen und zusätzliches Know-How</i> | 129 |
| 4.4 | Ausblick | 129 |
| 5 | Zusammenfassung | 131 |
| 6. | Literaturverzeichnis | 133 |
| 7. | Abbildungsverzeichnis | 135 |
| 8. | Tabellenverzeichnis | 137 |
| 9. | Abkürzungsverzeichnis | 139 |
| 10. | Anhang – Stationäre Auswertung | 140 |
| 10.1 | Anhang A – Stationäre Auswertung Leichtbeton Ø 17 - Heizbetrieb | 140 |
| 10.2 | Anhang B – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 17 – Heizbetrieb | 142 |
| 10.3 | Anhang C – Stationäre Auswertung UHPC Ø 17 – Heizbetrieb | 145 |
| 10.4 | Anhang D – Stationäre Auswertung Leichtbeton Ø 17 – Kühlbetrieb | 148 |
| 10.5 | Anhang E – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 17 - Kühlbetrieb | 150 |
| 10.6 | Anhang F – Stationäre Auswertung UHPC Ø 17 – Kühlbetrieb | 153 |
| 10.7 | Anhang G – Stationäre Auswertung Leichtbeton Ø 20 – Heizbetrieb | 156 |
| 10.8 | Anhang H – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 20 - Heizbetrieb | 158 |
| 10.9 | Anhang I – Stationäre Auswertung UHPC Ø 20 - Heizbetrieb | 161 |
| 10.10 | Anhang J – Stationäre Auswertung Leichtbeton Ø 20 - Kühlbetrieb | 164 |
| 10.11 | Anhang K – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 20 - Kühlbetrieb | 166 |
| 10.12 | Anhang L - Stationäre Auswertung UHPC Ø 20 - Kühlbetrieb | 169 |
| 11 | Anhang – Instationäre Auswertung | 172 |
| 11.1 | Anhang A – Instationäre Auswertung Zyklus An/Aus | 172 |
| 11.2 | Anhang B – Instationäre Auswertung Permanent An | 176 |
| 11.3 | Anhang C – Instationäre Auswertung Permanent Aus | 179 |

1. Motivation und Zielsetzung

Ausschlaggebend für das Zustandekommen der Arbeit war ein Bauprojekt „Blue Living“ in Grödig bei Salzburg. Der Bauherr hatte für dieses Projekt das klare Ziel formuliert mit möglichst wenig Energiebedarf ein Wohnhaus zu klimatisieren. Da bereits aus Monitoringergebnissen von anderen bestehenden Projekten deutlich wurde, dass mittels Betonkernaktivierung eine erhebliche Reduzierung des Energiebedarfs für Heizen und Kühlen des Gebäudes realisiert werden kann, wurde beschlossen, das in diesem Projekt zu integrieren.

Die Idee von Alexandra Ainedter - Geschäftsführerin der ABEK GmbH, ein Betonfertigteilerhersteller - war es, mithilfe einer energieressourcenschonenden Methode Räume auf benutzerspezifische Wünsche zu temperieren. Durch die Einbindung von betonkernaktivierten Deckensystemen als Fertigteilbauweise kann dies realisiert werden. Schnell wurde klar, dass die Einbindung dieses Produkts zeitaufwendig und technisch anspruchsvoll ist, weshalb die Idee entstand, dieses Projekt im Zuge einer Diplomarbeit wissenschaftlich genauer zu untersuchen und von einer Universität mitbetreuen zu lassen.

Auch wenn der Stand der Technik einige Punkte untersucht hat, die auf die grundsätzliche Wirkung eines Heiz-/ Kühlsystem in einem betonkernaktivierten Fertigteillement rückschließen lassen, wurden keine detaillierten Angaben zu den bauphysikalischen Eigenschaften über die Fertigteilbauweise gemacht. Daher bestand der Bedarf das bestehende Wissen anzuwenden und durch eigene Erkenntnisse zu erweitern. Überdies wurde nicht nur auf die Interessen eines Fertigteilwerks eingegangen, sondern auch Parameter wie verschiedene Deckenstärke und Materialien betrachtet, die bisher kaum untersucht wurden.

Die eigentliche Fragestellung für diese Diplomarbeit wurde während der ersten Baugespräche geformt. Aufgrund von verschiedenen Erwartungshaltungen beispielsweise was passieren könnte, wenn einige Parameter wie etwa die Höhenlage der Rohrregister im Querschnitt variiert werden, wurde schnell klar, dass Ergebnisse von Nöten sind, die diese Fragen eindeutig klären. Um diese zu ermitteln wurde eine Software benötigt, um für einen Musterraum beim Projekt Blue Living Simulationen durchzuführen, die einerseits auf dieses Projekt angewendet werden können, andererseits aber auch allgemeine Gültigkeit haben und somit auch in weiteren Objekten zur Anwendung kommen.

Da am Institut für Hochbau an der TU Graz die Software HT-Flux bereits im Lehrplan verwendet wurde, war die Arbeit mit diesem Programm naheliegend. Durch die ständige Hilfsbereitschaft von Dipl.Ing. Daniel Rüdissler, dem Betreiber und Programmierer des Programms, bekam diese Arbeit viele Inputs bekommen, die zu einem übersichtlichen Wissen über die verschiedenen Tools des Programms und zu einer exakten Formulierung der Simulationsrandbedingungen führte.

Der Fokus dieser Arbeit richtet sich auf die Untersuchung von verschiedenen Parametern, die für die Umsetzung in Fertigteilbauweise wichtig und ebenso von akademischem Interesse sind. Es werden umfangreiche Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse interpretiert und beschrieben. Dabei werden nicht nur zeitunabhängige Betrachtungen durchgeführt, sondern ebenso instationäre Fälle betrachtet.

Zielsetzung ist die thermische Untersuchung der Funktionsweise einer betonkernaktivierten Decke in Fertigteilbauweise. Die Firma ABEK GmbH erhofft sich durch die Ergebnisse ein neues Produkt zu entwickeln, um moderne Anforderungen an Gebäuden zu erfüllen. Dabei soll das beachtliche Leistungspotential einer Deckenheizung und -kühlung veranschaulicht und mit Zahlenwerten unterstrichen werden. Durch die Betrachtung einzelner Parameter können Aussagen zum Verhalten getätigt werden, die das Verhalten des Systems beeinflussen. Weitere Schwerpunkte liegen auf den Untersuchungen vom zeitabhängigen Verhalten der betonkernaktivierten Decke. Hier stehen Überlegungen zu Aufheiz- und Abkühlvorgängen im Fokus. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit sollen dazu dienen, dass eindeutig bewiesen wird, dass das Einlegen der Heizregister in das Fertigteillement möglich ist und in manchen Fällen sogar günstig ist.

Es wurde bewusst auf akustische Untersuchungen verzichtet. Diese Themenstellung wäre von großem Interesse, da man aber im Zuge einer Diplomarbeit nicht auf alle Themen genauer eingehen kann, wurde dies bewusst weggelassen.

Ebenso wurden hygrische Überlegungen nicht weiter behandelt. Im Anwendungsfall muss ein Bauphysiker dieses Thema untersuchen und Beachtung schenken.

Eine 1 cm Innenputzschicht wurde deshalb gewählt, damit die Auswirkungen eines Putzes deutlicher auftreten, obgleich dies eine Sonderlösung darstellt.

Da bei bisherigen Arbeiten keine Vergleiche in Bezug auf die gegenseitige Wirkung der einzelnen Parameter zueinander gemacht wurden, verschiedene Deckenstärken und Materialien bisher noch gar nicht untersucht wurden, die Höhenlage in Bezug auf die Fertigteilbauweise nicht ausreichend betrachtet wurde und instationäre Fälle zwar untersucht wurden, nicht aber in diesem Umfang, ist es das Ziel dieser Arbeit, die offenen Punkte auszuräumen und eine übersichtliche Darstellung zu schaffen.

2. Stationäre Untersuchung

2.1 Beschreibung des Konstruktionsaufbau

Zu Beginn dieses Kapitels werden alle 6 Parameter dargestellt und erklärt. Dabei handelte es sich um:

- Betrachtung einer unverputzten Sichtbeton Decke und eines verputzten Stahlbetonquerschnitts
- Es werden zwei verschiedene Rohrdurchmesser betrachtet \varnothing 17 mm und \varnothing 20 mm
- Ein variabler Achsabstand von entweder 15 cm oder 20 cm wird simuliert
- Die Deckenstärke des Querschnitts wird verändert. Dabei bleibt der Fußbodenaufbau gleich, es ändert sich jedoch die Höhe des Betonquerschnitts. Dabei werden ein 22 cm, ein 25 cm und ein 30 cm hoher Querschnitt miteinander verglichen
- Um den Effekt von verschiedenen Materialien darzustellen, werden UHPC, Normal – und Leichtbeton während dieser Arbeit untersucht
- Die Höhenlage des Rohrregisters wird verändert

Es werden Hintergründe, warum Parameter und Randbedingungen gewählt wurden, erläutert und näher beschrieben. Außerdem wird auf Vereinfachungen bei der Berechnungsmethode eingegangen und es wird beschrieben, warum diese angewendet werden können. Die Berechnungen wurden mit HT-Flux durchgeführt. Teilweise waren hier Materialkennwerte hinterlegt, die in Bedarfsfällen verändert und adaptiert wurden.

2.1.1 Bauteilaufbau

Am Anfang des Projekts Blue Living wurden, in Zusammenarbeit mit den Architekten und einem Bauphysiker, die Details und Wünsche des Bauherren eingearbeitet. Dabei wurden wärmetechnische Anforderungen laut Salzburger Bautechnikerverordnung (S.BTV), das in den Grundzügen der OIB Richtlinie 6 entspricht und um einen landesspezifischen Teil erweitert wurde und schalltechnische Anforderungen nach OIB Richtlinie 5 eingehalten.¹ Für die Untersuchung des Deckenquerschnitts wurde ein Regeldetail zwischen zwei beheizten Räumen gewählt.

¹ Vgl. OIB-330.6-009/15; Richtlinie OIB-330.5-002/15; Salzburger Landesregierung 22.06.2016

Tab. 1: Übersicht der verwendeten Materialien

| | t [cm] | ρ [kg/m ³] | λ [W/mK] | c_p [J/kgK] | μ trocken/feuch |
|------------------------------------|--------|-----------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Bodenbelag (Holz) ² | 1,5 | 500 | 0,13 | 1600 | 40/30 |
| Estrich ³ | 8,0 | 1600 | 1,1 | 1080 | 35/15 |
| PE-Folie ³ | 0,002 | 950 | 0,35 | 2300 | 100000 |
| Mineralfaser MW-T 033 ³ | 3,0 | 75 | 0,041 | 1030 | 1 |
| PE-Folie ³ | 0,002 | 950 | 0,35 | 2300 | 100000 |
| Schüttung ³ | 7,5 | 100 | 0,06 | 900 | 3 |
| Aufbeton | 16,0 | | Variabel - Siehe Kapitel 2.2.6 | | |
| Elementdecke | 6,0 | | Variabel - Siehe Kapitel 2.2.6 | | |
| Deckenputz ³ | 1,0 | 1200 | 0,6 | 1000 | 10/6 |

Anhand der Angaben aus Tabelle 1 wurden später alle Berechnungen durchgeführt. Da für eine stationäre Berechnung Kennwerte für die Dichte ρ und die Wärmeleitfähigkeit λ notwendig waren, wurden Werte dafür aus Normen und Datenblättern von Herstellern ermittelt. Die Werte für den Beton veränderten sich je nach verwendetem Material, daher wird erst später darauf eingegangen.

Da der Beton einen der 6 verschiedenen Parameter darstellte, änderten sich die Werte für seine Dichte und Wärmeleitfähigkeit während der verschiedenen Untersuchungen. Die genaue Beschreibung und seine Werte finden sich weiter unten im Kapitel 2.2.6 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC.

² Vgl. ÖNORM EN 12524: 2000 09 01

³ Vgl. ÖNORM B 8110-7: 2013 03 15

MATERIALANSICHT

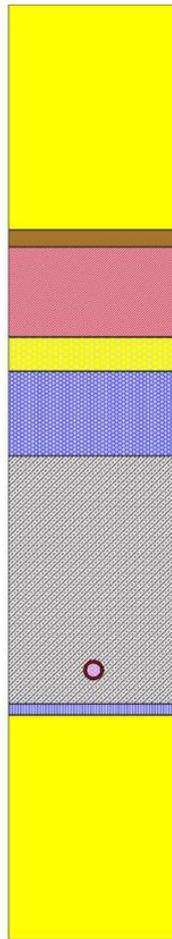


Abb. 1: Übersichtsdarstellung des Querschnitts und seiner Materialien

Einen wichtigen Teil der Eingabe für die Simulation stellten die Randbedingungen dar. Dabei wird auf die Arbeit von Prof. Kreč zum Thema Betonkernaktivierung verwiesen.⁴ Die hier gewählten Randbedingungen für Wärmeübergangskoeffizienten entsprechen dem Normenvorschlag.⁵⁶

⁴ Vgl. Krec 2015

⁵ Vgl. ÖNORM EN 1264-5: 2009 01 01

⁶ Vgl. ÖNORM EN ISO 6946: 2008 04 01

Tab. 2: Darstellung der Wärmübergangskoeffizienten

| | α [W/m ² K] | R_s [m ² K/W] | Quelle |
|---------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Deckenheizung | 6,5 | 0,15 | ÖNORM EN 1264-5: 2009 |
| Deckenkühlung | 10,8 | 0,09 | ÖNORM EN 1264-5: 2009 |

In Tabelle 2 ist die Übersicht der verwendeten Wärmeübergangskoeffizienten und der Kehrwert daraus – die Wärmeübergangswiderstände – dargestellt. Sie gibt die Wärmemenge an, die von einer Oberfläche auf ein Gas oder Fluid abgegeben wird. Im Berechnungsprogramm musste der Wert für den Wärmeübergangswiderstand zwischen der umgebenden Raumluft zu den begrenzenden Oberflächen eingegeben werden, und für den Heiz- bzw. Kühlbetrieb angepasst werden. Für den nach oben gerichteten Wärmestrom wurde der Wärmeübergangswiderstand mit $R_s = 0,17$ [m²K/W] angesetzt. Neben den Wärmeübergangskoeffizienten spielten für die thermische Analyse die Temperaturen der Innenräume die zweite zentrale Rolle bei der Eingabe der äußeren Randbedingungen. Dabei wurde für den Heizbetrieb eine Norminnentemperatur von 20 °C angesetzt, für den Kühlbetrieb 26 °C. Da in dieser Arbeit die Querschnitte nur thermisch untersucht wurden, war die relative Luftfeuchtigkeit nicht von Bedeutung und wurde auch nicht angegeben.⁷⁸

Es fehlte die Angabe der inneren Randbedingungen der Rohrleitungen. Dabei wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Rüdiger einige Simulationen ausgeführt, um das bestmögliche und genaueste Ergebnis zu erzielen. Für die Simulation wurde ein PEX-Rohr mit einer inneren Wärme-, bzw. Kühlquelle, in diesem Fall Wasser, als Heizmedium verwendet. Genauer werden diese Parameter in Kapitel 2.1.2.3 Parameter für Heizmedium beschrieben.

2.1.2 Vereinfachungen und spezielle Betrachtungen

Dieses Kapitel soll darstellen, welche Vereinfachungen möglich sind und welche genauer betrachtet werden müssen. Es wird auf den bereits vorhandenen Wissensstand verwiesen und eigene Erkenntnisse weiter ausgeführt.

2.1.2.1 Einfluss von Stahleinlagen

Der Stand der Technik ist, dass der Einfluss von Stahleinlagen eine Auswirkung auf die Wärmeleitfähigkeit des Betons hat. Der auftretende Unterschied der Wärmeabgabeleistung ist aber klein und somit vernachlässigbar. In „Energiespeicher Beton“ heißt es:

⁷ Vgl. ÖNORM EN 12831-1: 2014 11 15

⁸ Vgl. ÖNORM EN ISO 13790: 2008 10 01

„Es zeigt sich klar, dass ein Berechnungsmodell ohne detaillierte Angabe der Bewehrung die Wärmeabgabeleistung der aktivierten Geschoßdecke sehr genau beschreiben kann.“⁹

Daher wurde auch in dieser Arbeit der Effekt von Stahleinlagen vernachlässigt.

2.1.2.2 Querschnittsreduzierung und Rechenoptimierung

In diesem Kapitel wird erklärt, warum sich die thermische Untersuchung einer ganzen Decke auf die Betrachtung eines einzelnen Rohres reduzieren lässt. Dabei wird hier nicht nur eine Erklärung abgegeben, sondern auch der Beweis gezeigt, dass dies zulässig ist. Durch diese Vereinfachung wurde der zu untersuchende Simulationsbereich auf ein mögliches Minimum reduziert, was große Rechenvorteile und eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse bedeutete.

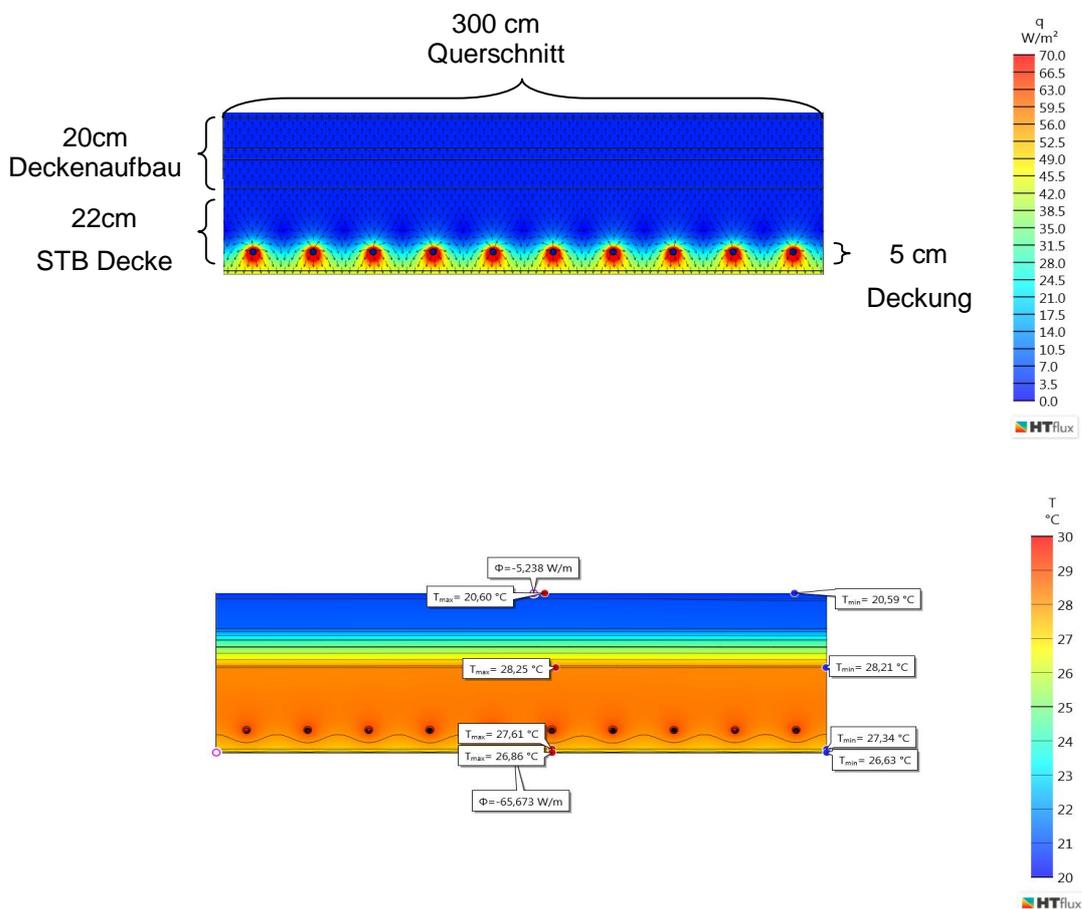


Abb. 2: Ergebnisdarstellung Gesamtquerschnitt

⁹ Krec 2015, 10

In Abbildung 2 ist ein 3 m breiter Deckenquerschnitt samt Heizregister zu erkennen. Die Rohrregister liegen 5 cm über der Stahlbetonunterkante, haben einen Durchmesser von 17 mm, einen Achsabstand von 15 cm und sind in einem 22 cm dicken Normalbetonquerschnitt eingebettet. Es wurde der Heizbetrieb simuliert. Werden die Isothermen rund um ein Rohr genauer betrachtet, ist erkennbar, dass diese symmetrisch verlaufen. Links und rechts neben dem gewählten Rohr herrschten dieselben Randbedingungen. Die Isothermen rund um andere Rohre verhielten sich genau gleich, wie beim zuvor betrachteten. Somit hat der Einfluss eines Heizregisters eine klar definierte Grenze.

Es wurde vermutet, dass der Querschnitt gleiche Ergebnisse liefern musste, wenn in der Hälfte des Rohrachsabstandes links und rechts eine adiabate Grenze eingefügt wird.

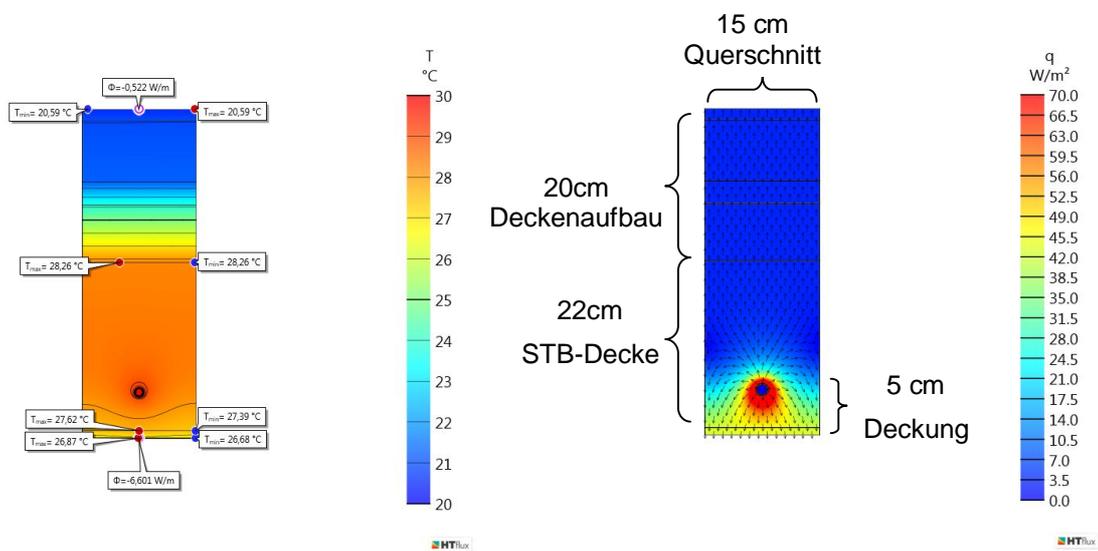


Abb. 3: Ergebnisdarstellung Teilquerschnitt

Die Randbedingungen waren dieselben wie für den Gesamtquerschnitt. Wie in Abbildung 3 erkennbar, ist eindeutig bewiesen, dass die zuvor getroffenen Annahmen sich als richtig herausgestellt haben. Durch diese Vereinfachung konnte Rechenzeit eingespart werden. Der physikalische Effekt ist in nachstehender Tabelle noch einmal übersichtlich mit Zahlen dargestellt.

Tab. 3: Ergebnisvergleich Gesamt- zu Teilquerschnitt

| | Gesamtquerschnitt | Teilquerschnitt | Δ | Δ [%] |
|--|-------------------|-----------------|----------|--------------|
| Temperatur _{Mittel} – Putz [°C] | 26,75 | 26,78 | 0,03 | 0,112 |
| Temperatur _{Mittel} – STB Unterkante [°C] | 27,48 | 27,51 | 0,03 | 0,109 |
| Temperatur _{Mittel} – STB Oberkante [°C] | 28,23 | 28,26 | 0,03 | 0,106 |
| Temperatur _{Mittel} – Fußboden [°C] | 20,60 | 20,59 | - 0,01 | 0,049 |
| Wärmestrom ϕ_{Unten} [W/m ²] | 65,673 | 6,601 | - | - |
| Wärmestrom ϕ_{Oben} [W/m ²] | 5,238 | 0,522 | - | - |

Tabelle 3 soll eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse zeigen. Es geht hervor, dass die Differenz zwischen Gesamt- und Teilquerschnitt gering ist. Im Schnitt veränderte sich der Wert für alle gemessenen **Temperaturen** um **0,03 °C**, was einer durchschnittlichen Änderung von **0,09 %** entspricht. Es ist eindeutig bewiesen, dass die Reduzierung des Querschnitts ohne Genauigkeitseinbußen anwendbar ist und repräsentativ für das Gesamtsystem steht. Es sei erwähnt, dass der Wärmestrom ϕ zu diesem Zeitpunkt nicht sinnvoll miteinander vergleichbar war. Die Werte wichen deutlich voneinander ab. Dies hing mit der Geometrie der beiden betrachteten Querschnitte zusammen, durch einfache Berechnungsschritte konnte das System aber miteinander verglichen werden.

2.1.2.3 Parameter für Heizmedium

Die Eingabe des Rohres und des Heizmediums wurde im Zuge dieser Arbeit ausführlicher behandelt. Auch wenn durch eine ungenauere Eingabe der Fehler gering war, war es von großem Interesse, möglichst genau die Realität abzubilden. Bei einem Baugespräch mit dem beteiligten Heizungstechniker wurde bekannt gegeben, dass beim Heizbetrieb ein Heizmedium (Wasser) mit 30 °C durch ein Kunststoffrohr (PEX) verwendet wird, für den Kühlbetrieb 16°C. Weil zu diesem Zeitpunkt die Detailberechnung fehlte, konnte der Rohrdurchmesser und der Achsabstand der Rohrregister nicht fixiert werden. Damit mussten zwei Parameter genauer betrachtet werden wie in Kapitel 2.2.3 Verschiedene Rohrdurchmesser und in Kapitel 2.2.4 Achsabstand zu lesen ist. Die Materialeigenschaften des PEX's sind $\rho_{\text{PEX}} = 950 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_{\text{Putz}} = 0,35 \text{ W/mK}$ und $c_p = 2300 \text{ J/kgK}$.

Zu Beginn dieser Diplomarbeit wurde das Rohr als Randbedingung mit 30 °C samt Wärmeübergangswiderstand von 500 W/m²K eingegeben.¹⁰ Dabei wurde dem kreisrunden Querschnitt ein Polygon eingeschrieben, um die Vermaschung des FE-Netzes zu gewährleisten. Bei HT-Flux, der verwendeten Software, handelt es sich nicht um ein klassisches FE-Programm, zwar wird ein „direktes Gleichungslösungsverfahren“ ähnlich anderen Programmen angewendet, die Vermaschung und die Zuweisung der Knotenpunkte erfolgt aber anders. Es wird eine quadratische Rasterung der Knotenpunkte in der geforderten Genauigkeit erstellt und verteilt. Später werden diese mit materialspezifischen Eigenschaften, Wärmeübergangswiderstände etc. „intelligent“ gemacht. Somit ist HT-Flux ein Hybrid- und kein klassisches FE-Programm.

- Vorteile von dieser Methode sind unter anderem die einfache Eingabe ohne größere Fehler einzugehen. Selbst durch das Verändern des Wärmeübergangswiderstandes begeht man keinen großen Fehler.¹¹ Es werden aber Eigenschaften von Materialien ausgeklammert. Zum einen ist das fließende Wasser im Rohr keine statische Randbedingung mit fixem Wärmeübergangskoeffizienten, zum anderen wird das PEX-Rohr bei dieser Art nicht simuliert.
- Diese Art der Eingabe liefert repräsentative Ergebnisse, die Unterschiede zu exakteren Untersuchungen liefert. Dadurch soll darauf aufmerksam gemacht werden, dass thermische Effekte vernachlässigt werden.

Um die Materialeigenschaften von PEX-Rohr und Heizmedium-Wasser besser abbilden zu können, wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Rüdiger einige Parameter adaptiert. Das Programm HT-Flux hat die Möglichkeit einem Material eine interne Wärmequelle zu geben. Es wurde ein Rohr mit einer Wandstärke von 2 mm eingegeben und diesem die Eigenschaften von PEX zugeordnet.¹² Dem Inneren des Rohres wurde Wasser als Material zugewiesen mit der erwähnten internen Wärmequelle von 30 °C (im Kühlfall 16 °C). Laut ÖNORM EN 12524 hat Wasser eine Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Wasser}} = 0,6 \text{ W/mK}$. Weil bei Wasser, ähnlich wie bei Luft, bei einem vorhandenen Temperaturgefälle konvektive Vorgänge auftreten, erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit des Wassers. Um den exakten Wert für Wasser zu erhalten, muss die Nusselt-Zahl für Wasser und Luft berechnet werden. Aus dem Verhältnis der Zahlen sowie einer dynamischen Luft-Simulation könnte der reale Wert hergeleitet werden. Da dies aber den Rahmen der Diplomarbeit sprengen würde, wurde an dieser Stelle darauf verzichtet.

- Aufgrund der Kenntnis, dass unbewegte Luft eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit besitzt als bewegte, wird hier die Annahme getroffen die Wärmeleitfähigkeit des Wassers auf $\lambda_{\text{Wasser}} = 1,0 \text{ W/mK}$ zu erhöhen. Insgesamt hat der Effekt einen kleinen Einfluss da das Volumen des Wassers im Vergleich zum Betonquerschnitt gering ist.

¹⁰ Vgl. Krec 2015

¹¹ Vgl Krec 2015

¹² Vgl. ÖNORM EN 12524: 2000 09 01

- Mit dieser Variante war unter anderem mehr Vorbereitungszeit für die Eingabe notwendig. Die dabei entstandene Differenz zum Ergebnis von vorhin ist erkennbar, kann aber in Bedarfsfällen ignoriert werden.
- Durch die exakte Abbildung des PEX-Rohrs und der internen Wärmequelle unterschieden sich die Ergebnisse sich diese Arbeit von bestehenden, welche sich nicht detaillierte mit dieser Thematik beschäftigten.

Tab. 4: Ergebnisvergleich Standardmethode zu Detail Variante

| | Standardmethode | Detailmethode | Differenz | Δ [%] |
|--|-----------------|---------------|-------------|--------------|
| Temperatur _{Mittel} – Putz [°C] | 27,23 | 26,78 | 0,45 | 1,68 |
| Temperatur _{Mittel} – STB Unterkante [°C] | 28,01 | 27,51 | 0,50 | 1,82 |
| Temperatur _{Mittel} – STB Oberkante [°C] | 28,81 | 28,26 | 0,55 | 1,95 |
| Temperatur _{Mittel} – Fußboden [°C] | 20,64 | 20,59 | <u>0,05</u> | 0,24 |
| Wärmestrom ϕ_{Unten} [W/m ²] | 7,039 | 6,601 | 0,438 | 6,64 |
| Wärmestrom ϕ_{Oben} [W/m ²] | 0,562 | 0,522 | 0,040 | 7,66 |

Wie in Kapitel 2.1.2.2 Querschnittsreduzierung und Optimierung wurden für diese Berechnung dieselben Randbedingungen vorausgesetzt. Anhand Tabelle 4 ist deutlich zu erkennen, dass die Ergebnisse einen Unterschied zueinander aufweisen. In Zahlen bedeutete dies eine durchschnittliche Differenz $\Delta_{\text{Temperatur}} = 0,50 \text{ °C}$. Das Mittel bezog sich auf die ersten 3 Werte, denn die Temperatur am Fußboden unterschied sich kaum zwischen den beiden Varianten. Die errechneten Temperaturen wiesen einen Unterschied auf, die Wertepaare sind dennoch in einer ähnlichen Größenordnung. Die Werte für die Kennliniensteigung zeigten aber, dass ein nicht zu unterschätzender Unterschied von **6,64 %** für den Wärmestrom an der Deckenuntersicht auszumachen war.

Insgesamt wurden **576 verschiedene stationäre Auswertungen** im Zuge dieser Arbeit gemacht. In den folgenden Kapiteln werden nicht alle Ergebnisse einzeln angeführt. Es sollen vielmehr Trendlinien zeigen und Erwartungshaltungen schürfen, was passiert, wenn einzelne Parameter geändert werden und welche Auswirkung diese haben.

2.2 Parameterstudie

2.2.1 Allgemeines

Die äußeren Randbedingungen wurden in Kapitel 2.1 Beschreibung des Konstruktionsaufbaus bereits erklärt. Nun müssen die inneren Parameter geklärt werden. Zu Beginn wurden mögliche relevante Themen diskutiert. Überdies wurden bei Baugesprächen mit den verschiedenen Gewerken weitere Inputs gesammelt und Parameter festgelegt. Sie sind weiter oben im Text nachzulesen

Zwar wurden einige dieser Parameter bereits in Arbeiten wie Energiespeicher Beton von Professor Krec betrachtet, nichts desto weniger sind die hier errechneten Ergebnisse für eine Fertigteilm Bauweise von großer Bedeutung, denn die Parameter wurden so gewählt, dass sie auf das Projekt Blue Living angewendet wurden und dennoch so allgemein als möglich gehalten, dass sie, ohne Abstriche machen zu müssen, auf andere Projekte anzuwenden sind.

Wie in Abbildung 2, Abbildung 3 und Tabelle 3, Tabelle 4 erkennbar, wurden Messergebnisse für die Temperatur an vier unterschiedlichen Orte innerhalb des Regelquerschnitts ermittelt. Es wurden sowohl die maximalen als auch die minimalen Werte der auftretenden Temperaturen ausgegeben.

- Temperaturen vom Putz
- Temperaturen von der Stahlbetonunterkante
- Temperaturen von der Stahlbetonoberkante
- Temperaturen des Fußbodenbelags

Überdies wurden zwei weitere Messungen getätigt, der Wärmestrom an der Deckenuntersicht ϕ_{Unten} des darunterliegenden Raums und der Wärmestrom an der Fußbodenoberkante ϕ_{Oben} des darüber liegenden Raumes. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass der Wert für den Wärmestrom ϕ_{Oben} bei sämtlichen Simulationen um ein Vielfaches kleiner ist als für ϕ_{Unten} . Dies ist durch den Fußbodenaufbau zu erklären. Die Schüttung und die Trittschalldämmung verhinderten einen konstanten Wärmefluss nach oben. Daher ist der Gesamt - Wärmestrom wie in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt nach unten gerichtet.

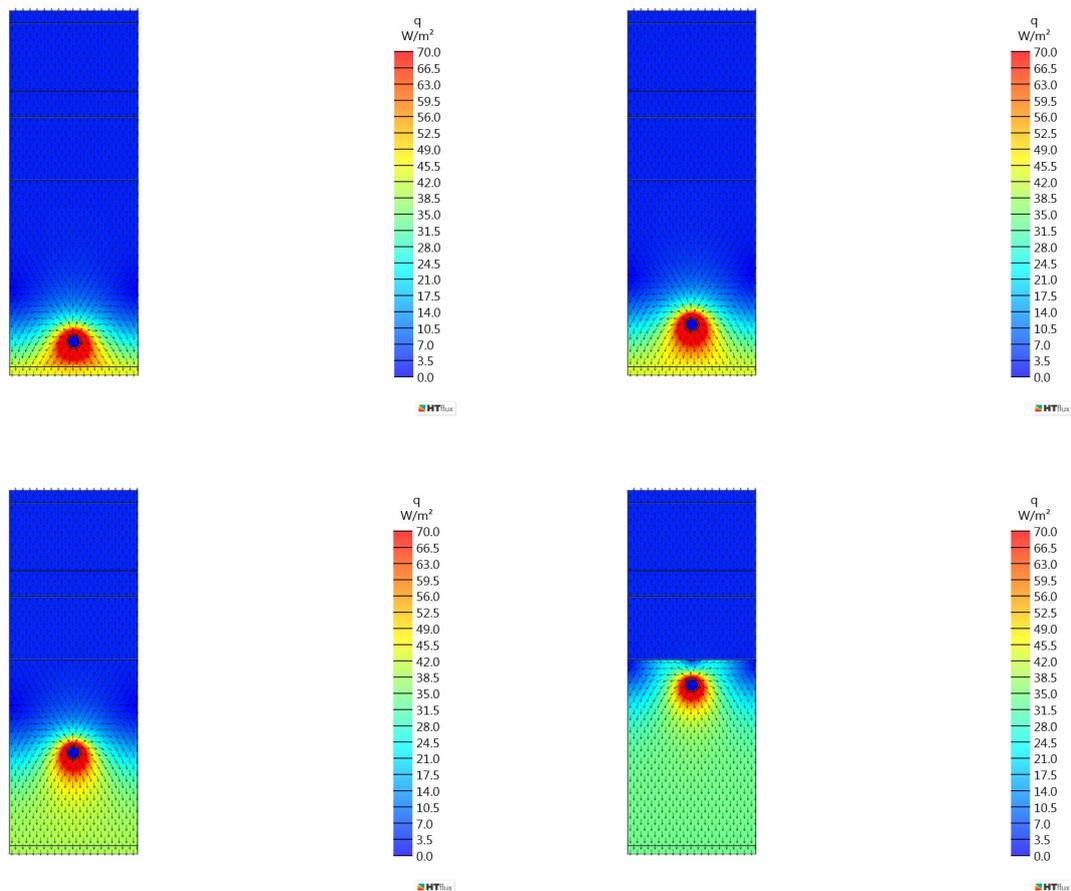


Abb. 4: Übersicht des Wärmestroms zu den vier untersuchten Höhenpositionen

Der Wärmestrom ist jener Wert mit dem später die Abgabeleistung einer Heizung einfach berechnet wird. In ÖNORM EN ISO 10211, sowie ÖNORM EN 1264-2 und ÖNORM EN 1264-3 ist ein aufwendiger Rechenweg beschrieben um genau diesen Wert zu errechnen.¹³¹⁴¹⁵ Durch die Arbeit mit HT-Flux konnte genau dieser Wert mit wenig Mühe ausgegeben werden lassen. Wie bereits vorher im Kapitel 2.1.2.2 Querschnittsreduzierung und Rechenoptimierung erkennbar, kann dieser Wert aber bei fehlendem Hintergrundwissen falsch interpretiert werden. Da man aber durch einfache Rechnungen den Wärmestrom auf die sogenannte Kennliniensteigung KH [W/m^2K], mit welchem man einen Wert erhält, der für alle Parameter und Querschnitte vergleichbar ist, umrechnen kann, ist ein übersichtlicher und vergleichbarer Wert für die Leistung eines solchen Heizsystems gegeben. Der Begriff Kennliniensteigung findet sich auch in einzelnen Normen wieder.¹⁶

$$KH = \frac{\phi}{t \cdot \Delta T} \quad [W/m^2K] \quad (1)$$

¹³ Vgl. ÖNORM EN ISO 10211: 2008 04 01

¹⁴ Vgl. ÖNORM EN 1264-2: 2013 01 01

¹⁵ Vgl. ÖNORM EN 1264-3: 2009 10 01

¹⁶ Vgl. ÖNORM EN 1264-2: 2013 01 01

Gleichung 1 zeigt die Formel zur Berechnung der Kennliniensteigung. Der aus dem Programm an der Grenzfläche des Querschnitts zur umgebenden Raumtemperatur ausgegebene Wärmestrom ϕ [W/m] wird durch die Dicke t [m] und dem Temperaturunterschied zwischen Norminnentemperatur und Heizmitteltemperatur [K] dividiert. In anderen Arbeiten wurden für die Kennliniensteigung unterschiedliche Bezeichnungen gewählt. Beispielsweise ist in „Energiespeicher Beton“ und in „Thermische Bauteilaktivierung“ sowie in einzelnen Normen von einem thermischen Leitwert die Rede.¹⁷¹⁸¹⁹

Mittels Kennliniensteigung ist es unkompliziert die Wärmeabgabeleistung q [W/m²] einer Heizung zu berechnen.

$$q = KH * \Delta T \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

Aus Gleichung 2 wird durch Multiplikation der Kennliniensteigung [W/m²K] und der Temperaturdifferenz zwischen gewünschter Rauminnentemperatur und Heizmitteltemperatur [K] schlussendlich die Wärmeabgabeleistung berechnet. Wie aus dem vorherigen Satz deutlich wird, hängt die Abgabeleistung von einer gewünschten, komfortablen Solltemperatur ab. Um die Ergebnisse schnellst möglich auf alle Szenarien anzupassen, wird auf Gleichung 2 und die damit errechnete Wärmeabgabeleistung in dieser Arbeit verzichtet, damit alles vergleichbar ist und bei Bedarf umgerechnet werden kann.

Vorweggenommen sei an dieser Stelle, dass bei einigen Vergleichen zusätzlich zur Untersuchung zweier Parameter ein dritter verwendet wurde, um die Ergebnisse zu verdeutlichen. Durch einige Simulationen und deren Auswertung ging hervor, dass dies am einfachsten mit dem Parameter Höhenlage zu vereinbaren ist. Auch wenn dieser von großer Bedeutung war und durch die verschiedenen Positionen im Querschnitt auffällige Effekte verdeutlichte, verhielt sich der Parameter Höhenlage trotz verschiedener Einflüsse ähnlich. Daher diente er oft zur Verdeutlichung eines Ergebnisses.

Damit wurden 6 verschiedene Parameter definiert. Anhand von Unterkapiteln wird zuerst auf die einzelnen Effekte eingegangen. Am Ende wird eine übersichtliche Grafik gezeigt, anhand welcher mehrere Effekte gleichzeitig abgelesen werden können.

2.2.2 Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht

Zu Beginn der Arbeit war eine umfangreiche Literaturstudie notwendig, damit sich der Verfasser einen Überblick über vorhandenes Wissen und den Stand der Technik schaffen konnte. Bei einer Deckenheizung und dem gewählten Fußbodenaufbau, spricht man unter anderem auch von einer Strahlungsheizung.²⁰ Hält man sich vor Augen, dass dieses Heizsystem in erster Linie über Strahlung seine Energie an die umgebenden Oberflächen abgibt, liegt die Vermutung nahe, dass eine verputzte Stahlbetonuntersicht andere

¹⁷ Vgl. Krec 2015

¹⁸ Vgl. Expertenforum Energiespeicher Beton et al. 2015

¹⁹ Vgl. Krec et al. 2015

²⁰ Vgl. Meier 2010

Ergebnisse liefert als eine nicht verputzte Sichtbeton - Fläche. Die Strahlungsleistung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz hängt unter anderem von der vierten Potenz der absoluten Temperatur ab.²¹

$$P = \sigma * A * T^4 \quad (3)$$

Gleichung 3 gilt für einen idealisierten Schwarzen Strahler. Für eine 1 cm dicke Kalkgipsputz-Schicht und der deutlich niedrigeren Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Kalkgipsputz}} = 0,60 \text{ W/mK}$ im Vergleich zum verwendeten Normalbeton $\lambda_{\text{Normalbeton}} = 2,10 \text{ W/mK}$ ist ein Unterschied gegeben. Damit muss die Temperatur an einer verputzten Untersicht einen geringeren Wert aufweisen als die unverputzte Variante.

2.2.2.1 Ergebnisse – Parameter Putz

Der Parameter Putz wird im Folgenden als Ergebnis mit Vergleich der anderen Parameter dargestellt. Hier wurde vor allem darauf eingegangen, welchen Einfluss das Aufbringen einer Putzschicht bei den einzelnen Vergleichen hat. Der strukturelle Aufbau gilt genauso für alle anderen Parameter.

Da in diesem Kapitel jeder untersuchte Parameter mit sich selbst und zumindest mit einem anderen Parameter dargestellt wird, würden sich einige Ergebnisse und Erklärungen wiederholen. Deswegen sei an dieser Stelle gesagt, dass bei wiederholenden Themen auf die bereits Erklärten verwiesen wird. Wichtig ist, sämtliche Prozentwerte in den folgenden Kapiteln werden nicht auf eine absolute Zahl bezogen, sondern die Wertepaare untereinander verglichen. Es wird das Maximum einer untersuchten Ergebnisreihe als 100 % Marke gesetzt. Ein Beispiel:

- *Beim Vergleich der Höhenlage der Rohrregister mit dem Parameter \emptyset , sind zwei verschiedene Maxima vorhanden. Bei $\emptyset 17 \text{ mm}$ und bei $\emptyset 20 \text{ mm}$ sind ungleiche Ergebnisse zu erwarten, obwohl die Höhenlage gleich verändert wurde und alle anderen Parameter vorgegeben sind und sich nicht verändern.*

Wenn nun Prozent - Werte angegeben sind, beziehen sie sich immer nur auf eine Reihe und nicht auf beide. Damit werden die Ergebnisse vergleichbar und stehen repräsentativ für einen Datensatz. Für alle weiteren stationären Parameter gelten dieselben hier beschriebenen Voraussetzungen.

²¹ Vgl. Zürcher und Frank 2014

2.2.2.2 Putz und Achsabstand

Tab. 5: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | x | | x | | | |
| Unveränderlich | | x | | x | x | x |

Für diese Untersuchung wurde ein Normalbetonquerschnitt mit einer Deckenstärke von 22 cm, einem Rohraußendurchmesser von 17 mm und einer Höhenlage von 3 cm über der Stahlbetonunterkante verwendet. Die Parameter, die hierbei verwendet wurden, waren ein variabler Achsabstand sowie eine verputzte bzw. unverputzte Untersicht. Außerdem wurde der Kühl- sowie Heizbetrieb gesondert betrachtet.

Tab. 6: Ergebnissdarstellung Putz – Achsabstand Heizbetrieb

| | $KH_{\text{Unten}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Oben}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Gesamt}} [W/m^2K]$ |
|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Achsabstand 15cm mit Putz | 4,579 | 0,346 | 4,925 |
| Achsabstand 15cm ohne Putz | 4,957 | 0,345 | 5,302 |
| prozentualer Unterschied | 8,27 % | 0,39 % | 7,66 % |
| Achsabstand 20cm mit Putz | 4,252 | <u>0,319</u> | 4,571 |
| Achsabstand 20cm ohne Putz | 4,578 | 0,315 | 4,893 |
| prozentualer Unterschied | 7,67 % | 1,25 % | 7,05 % |

In Tabelle 5 sind die berechneten Werte für die Kennliniensteigung übersichtlich dargestellt. KH_{Gesamt} ergab sich aus Addition der beiden anderen Werte. Damit wurde der gesamte Wärmestrom des Heizsystems dargestellt. Der wichtigste Wert in dieser Arbeit war aber KH_{Unten} , denn dieser gibt die Leistung an der Deckenunterseite an. Die anderen Beiden waren mehr von akademischer Bedeutung, da durch den Fußbodenaufbau keine Abgabeleistungen an der Oberseite zu erwarten waren, minimal jedoch auch hier auftraten. Das gaben die simulierten Ergebnisse aus Tabelle 5 wider. Es ist erkennbar, dass die Kennliniensteigung bei einem unverputzten Untergrund mit einem Achsabstand von 15 cm den größten Wert $KH_{\text{Unten}} = 4,957 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweist. Den niedrigsten Wert $KH_{\text{Unten}} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$ hatte die Heizung bei einer verputzten Untersicht mit einem Achsabstand von 20 cm.

In Tabelle 6 ersichtlich, lassen sich folgende Effekte ablesen: Wurde der Achsabstand erhöht, wirkte sich das auf die Wärmeabgabeleistung negativ aus. Der Unterschied der Achsabstände betrug im Mittel **7,39 %**. Ob eine verputzte oder unverputzte Untersicht gewählt wurde, hat einen gemittelten Effekt von **7,37 %**. Dies lässt auf Folgendes rückschließen:

- Sowohl der Putz als auch der Achsabstand wirkten sich deutlich auf die Wärmeabgabeleistung mit rund 7,5 % einer Deckenheizung aus. Die einzelnen Effekte durften bei dieser Betrachtung auf keinen Fall vernachlässigt werden, ansonsten kann das System falsch interpretiert werden.
- Betrachtet man beide Effekte gleichzeitig, sieht man, dass der prozentuale Unterschied zwischen Putz und Achsabstand um 0,6 % abnimmt. Der Trend, dass bei geringen Wärmeabgabeleistungen die berechneten Unterschiede zueinander konvergieren, wird sich auch später bei allen Parametern wiederfinden.

Der Kühlbetrieb war ähnlich zum Heizbetrieb, die zuvor beschriebenen Trends und Effekte traten ähnlich auf. Er unterschied sich jedoch in seinen Werten deutlich von den zuvor errechneten Ergebnissen. Daher soll am Ende jedes Parameters kurz auf die Kühlung eingegangen werden und die Ergebnisse mit jenen des Heizfalls verglichen werden.

- Der kleinste Wert für die Kennliniensteigung war wie zuvor bei einem Achsabstand von 20 cm und einer verputzten Stahlbetonuntersicht $KH_{\text{Unten}} = 5,799 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der größere Wert hingegen war $KH_{\text{Unten}} = 7,173 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei 15 cm Achsabstand und ohne Putz.
- Der prozentuale Unterschied im Mittel zwischen dem Achsabstand betrug im Kühlbetrieb 11,04 %. Für die Untersuchung des Putzes wurde ein Wert von 11,40 % berechnet.
- Wie vorhin ist erkennbar, dass das Aufbringen einer 1 cm Putzschicht eine ähnliche Auswirkung auf das System hat, wie das Verändern des Achsabstandes von 15 cm auf 20 cm.

2.2.2.3 Putz, Achsabstand und Rohrdurchmesser

Tab. 7: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | x | X | x | | | |
| Unveränderlich | | | | x | X | x |

Kapitel 2.2.2.2 Putz und Achsabstand ist die Grundlage für die weitere Untersuchung in diesem Kapitel. Dabei wurden die Ergebnisse aus Tabelle 5 um den Parameter Rohrdurchmesser erweitert. Im Unterschied zu vorher wurde der Durchmesser auf 20 mm erhöht.

Tab. 8: Ergebnisdarstellung Putz – Achsabstand mit Ø 20 mm Heizbetrieb

| | $KH_{\text{Unten}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Oben}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Gesamt}} [W/m^2K]$ |
|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Achsabstand 15cm mit Putz | 4,700 | 0,338 | 5,038 |
| Achsabstand 15cm ohne Putz | 5,097 | 0,331 | 5,428 |
| prozentualer Unterschied | 8,44 % | 1,97 % | 7,74 % |
| Achsabstand 20cm mit Putz | 4,389 | 0,334 | 4,723 |
| Achsabstand 20cm ohne Putz | 4,733 | <u>0,323</u> | 5,056 |
| prozentualer Unterschied | 7,84 % | 3,15 % | 7,06 % |
| Delta 1 | 2,01 % | 80,46 % | 1,02 % |
| Delta 2 | 2,17 % | 60,17 % | 0,24 % |

Die Ergebnisse des Rohrdurchmessers 20 mm wurden in Tabelle 8 bereits mit den Ergebnissen aus Tabelle 6 erweitert und verglichen. Für alle Ergebnisse galt, dass die höchsten Werte für die Kennliniensteigung bei einer unverputzten Stahlbetonunterseite mit 15 cm Achsabstand auftraten. Die Erhöhung des Rohrdurchmessers auf 20 mm hatte einen vergleichsweise kleinen Effekt auf das Gesamtergebnis. Sowohl für einen Achsabstand von 15 als auch 20 cm lieferte die Simulation bei größerem Rohrdurchmesser eine prozentuale Verbesserung der Abgabeleistung an der Deckenunterseite zu den vorhergegangenen Werten um **2,09 %**.

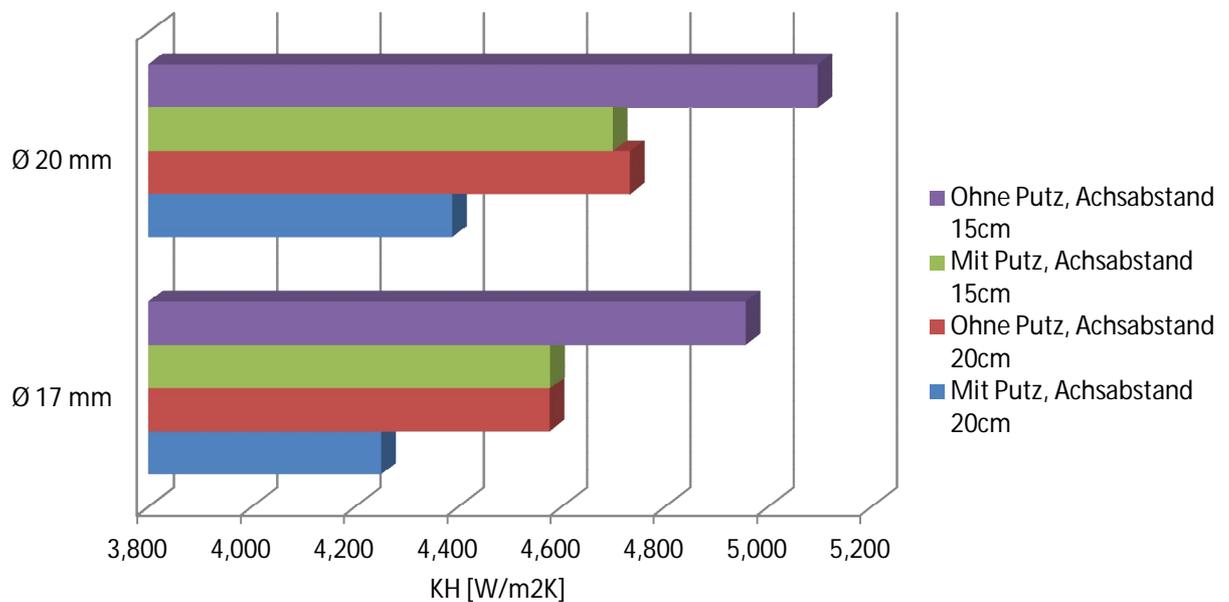


Abb. 5: Auswirkung von Putz, Achsabstand und Rohrdurchmesser

Aus dieser Abbildung wurde ein ganz deutlicher Trend ersichtlich. Betrachtete man nur die Ergebnisse für $\varnothing 17$ mm und $\varnothing 20$ mm erhielt man einen stufenförmigen Anstieg der Werte für die Kennliniensteigung.

Im Kühlbetrieb fielen die Werte für die Kennliniensteigung höher aus. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Rohrdurchmessern betrug bei einem Achsabstand von 15 cm 3,52 % bei 20 cm hingegen 4,00 %. Dieser Wert entsprach zwar dem ca. 2,64-fachen des Heizbetriebes, bedenkt man aber, dass durch die Erhöhung des Rohrdurchmessers eine Leistungssteigerung von maximal 0,45 % auftritt, ist die Relevanz dieses Effekts zu diskutieren.

2.2.2.4 Putz und Höhenlage

Tab. 9: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | x | | | | | x |
| Unveränderlich | | | x | x | x | x |

Als nächster Schritt wurde dargestellt wie sich das Aufbringen einer Putzschicht in Kombination mit einer vertikalen Verschiebung der Rohrregister veränderte. Das heißt, die Parameter wurden nicht verändert, lediglich die Höhenlage wurde mit einer verputzten und unverputzten Schicht verglichen.

Tab. 10: Ergebnisdarstellung Putz – Höhenlage Heizbetrieb

| | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Oben}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Gesamt}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ |
|--|---|--|--|
| 3cm Überdeckung | 4,579 | 0,346 | 4,925 |
| 5cm Überdeckung | 4,401 | 0,348 | 4,749 |
| Mitte | 3,899 | 0,361 | 4,261 |
| 3cm Überdeckung oben | 3,377 | 0,374 | 3,751 |
| <hr/> | | | |
| 3cm Überdeckung ohne Putz | 4,957 | <u>0,345</u> | 5,302 |
| 5cm Überdeckung ohne Putz | 4,753 | 0,345 | 5,098 |
| Mitte ohne Putz | 4,175 | 0,359 | 4,534 |
| 3 cm Überdeckung oben ohne Putz | 3,587 | 0,372 | 3,959 |
| <hr/> | | | |
| 3cm prozentualer Unterschied | 7,64 % | 0,39 % | 7,12 % |
| 5cm prozentualer Unterschied | 7,41 % | 0,77 % | 6,85 % |
| Mitte prozentualer Unterschied | 6,61 % | 0,74 % | 6,03 % |
| 3cm oben prozentualer Unterschied | 5,86 % | 0,54 % | 5,25 % |

Für eine verputzte sowie für eine unverputzte Stahlbetonunterseite galt, dass der höchste Wert bei einer Betondeckung von 3 cm über Stahlbetonunterkante erreicht wurde $KH_{\text{Unten,Putz}} = 4,579 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten,ohnePutz}} = 4,957 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Den niedrigsten Wert für die Kennliniensteigung erhielt man bei Einlegen der Rohrregister 3 cm unter der Stahlbetonoberkante $KH_{\text{Unten,Putz}} = 3,377 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten,ohnePutz}} = 3,587 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Tabelle 10 veranschaulicht dies. Deutlich wurde wiederum, dass bei geringeren Werten die einzelnen Effekte abgeschwächt wurden, hingegen bei hohen Werten größere Unterschiede auftraten. Bei 3 cm Überdeckung von unten war ein Unterschied zwischen einer verputzten Variante und jener ohne Putz von **7,64 %** vorhanden. Die Differenz in Prozent bei 3 cm Betondeckung von oben betrug nur mehr **5,86 %**.

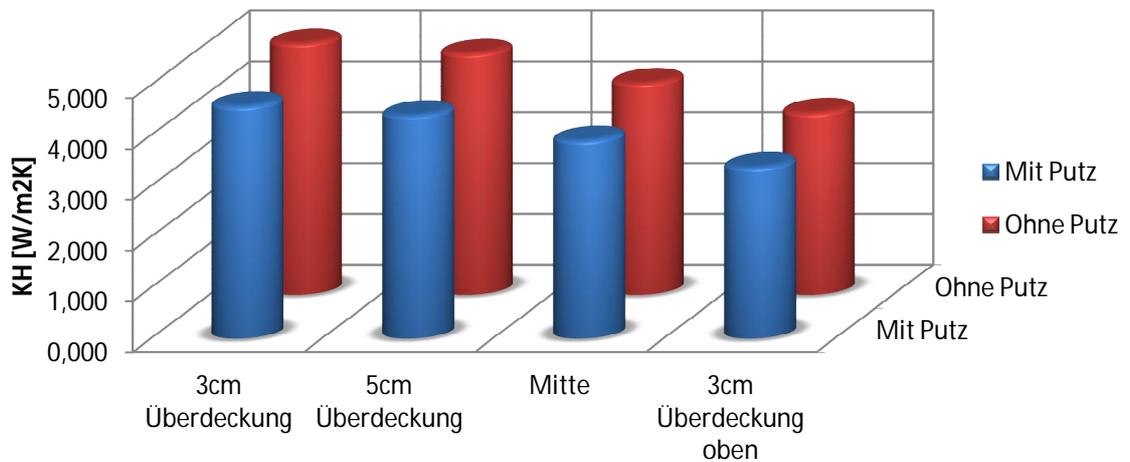


Abb. 6: Auswirkung von Putz und Achsabstand

Der Trend wird in Abbildung 6 deutlich. Mit steigender Betondeckung sank der Wert für die Kennliniensteigung und die verputzte Variante hatte für alle Höhenlagen weniger Abgabeleistung als die Variante ohne Putz. Auch hier galt der weiter oben beschriebene Effekt, dass sich die Werte bei einem niedrigen Wert für die Kennliniensteigung annäherten, bei vergleichsweise großen Werten der Unterschied der einzelnen Effekte deutlicher wurde.

- *Der Putz hatte in Kombination mit der Höhenlage einen Einfluss. Das Ergebnis brachte andere Zahlenwerte mit sich, wobei der Effekt bei niedriger Deckung höher war als bei hoher. Das heißt, wurden die Rohre weiter unten im Querschnitt positioniert, musste bei Verwendung einer Putzschicht bedacht werden, dass die Kennliniensteigung und damit die Abgabeleistung sank. Bei höherer Positionierung trat dieser Effekt abgeschwächt auf.*

Der Kühlbetrieb hatte bei selbiger Betrachtung die gleichen Effekte vorzuweisen wie der Heizbetrieb. Auffallend war aber, dass auch hier wieder durch die höheren Werte die Auswirkung deutlicher auftrat, als beim Heizbetrieb. Der höchste Wert für $KH_{\text{Unten,Putz}} = 6,402 \text{ W/m}^2\text{K}$, $KH_{\text{Unten,ohnePutz}} = 7,173 \text{ W/m}^2\text{K}$ lag wiederum für beide Varianten bei einer Betonüberdeckung von 3 cm oberhalb der Stahlbetonunterkante. Genau gleich wie der Heizbetrieb wurde der niedrigste Wert ganz oben im Querschnitt errechnet mit $KH_{\text{Unten,Putz}} = 4,279 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten,ohnePutz}} = 4,609 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dabei ließ sich ein Unterschied in Prozent von 10,75 % für die niedrigere Betondeckung und 7,16 % für die höhere Deckung erkennen. Wie bereits aus anderen Kapiteln hervorging, war eine Deckenkühlung mit denselben Parametern leistungsfähiger als eine Deckenheizung. Der Einfluss einer verputzten Schicht hatte dabei einen viel gewichtigeren Effekt als bei einer Heizung.

- *Der Höhenlage kam im Zusammenhang mit der Abgabeleistung einer Deckenheizung eine gewichtige Rolle zu. Aus den simulierten Ergebnissen ging hervor, dass sie ein zentraler Faktor für das Verhalten eines solchen Heizsystems war.*
- *Für das System in Fertigteilbauweise war dieser Punkt von höchstem Interesse, da ein Produkt entwickelt werden sollte, das das Prinzip des hohen Vorfertigungsgrad unterstützen sollte. Bei Halbfertigteilfabrikaten mit einer Plattenstärke von bis zu 6,5 cm kann man sofort erkennen, dass es lediglich 2 Optionen - bezogen auf die Höhenlage - für ein integriertes Deckenheizsystem gibt. Zum einen die Möglichkeit, die Rohrregister an die untere Bewehrungslage anzubinden und bereits als fertiges System an die Baustelle zu liefern. Zum anderen können die Leitungen auf die Platte gelegt werden und an die Gitterträger angebunden werden. Beide Varianten setzen eine Positionierung der Heiz- bzw. Kühlelemente im unteren Drittel des Betonquerschnitts voraus. Weitere Optionen sind die konventionellen Methoden einer Verlegung vor Ort, was den Fertigungsprozess aber nicht weiter betreffen würde.*
- *Durch die Simulationen der verschiedenen Höhenlagen ging hervor, dass sich die Positionierung nahe der Deckenuntersicht positiv auf die Abgabeleistung auswirkte. Damit wurde eine zentrale Frage der Durchführbarkeit eines solchen Heizsystems bewiesen.*

2.2.2.5 Putz, Höhenlage und Deckenstärke

Tab. 11: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | x | | | x | | x |
| Unveränderlich | | x | x | | x | |

Die in Kapitel 2.2.2.4 Putz und Höhenlage dargestellten Ergebnisse dienten als Grundlage für die in diesem Kapitel gezeigten Berechnungen und Grafiken. Erweitert wurden diese um den Parameter von verschiedenen Deckenstärken zur Untersuchung welche Auswirkung dieser auf eine Untersicht mit und ohne Putz haben könnte. Vorweggenommen sei an dieser Stelle, dass die Höhenlage der Rohrregister an verschiedenen Deckenstärken angepasst wurde.

- Die Höhenpositionen unterschieden sich bei den gewählten Deckenstärken. Die beiden Positionen unten mit niedriger Deckung waren für alle Deckenstärken ident, bei den anderen beiden Varianten traten hingegen geometrische Unterschiede auf. Wenn beispielsweise bei einem 22 cm Querschnitt von der Position in der Mitte des Querschnitts gesprochen wird, lag dieser bei 11 cm. Für eine 30 cm Decke war die Mittellage bei 15 cm. Die gewählten Höhenpositionen werden in Kapitel 2.2.7 Höhenlage genauer beschrieben und begründet.

Die Zahlenwerte der verschiedenen Deckenstärken machten deutlich, dass bei Verwendung ansonsten identer Parameter, die Ergebnisse für eine Betondeckung von 3 cm und 5 cm über der Untersicht kaum Abweichungen ergeben. Dies galt sowohl für eine verputzte als auch unverputzte Variante. Bei einer Positionierung in der Mitte des Querschnitts bzw. 3 cm unter der Querschnittoberkante waren Unterschiede auszumachen. In Zahlen ausgedrückt:

- Da sich die Ergebnisse für $KH_{\text{Unten},3\text{cm}}$ und $KH_{\text{Unten},5\text{cm}}$ für alle Deckenstärken sowie für die verputzte als auch unverputzte Variante stark ähnelten, war ein arithmetisches Mittel der Ergebnisse verständlich und vertretbar. Dadurch erhielt man einen Wert $KH_{\text{Unten},3\text{cm}} = 4,767 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für $KH_{\text{Unten},5\text{cm}} = 4,573 \text{ W/m}^2\text{K}$. Auffällig war die geringe Abweichung von 0,001 bzw. 0,002 $\text{W/m}^2\text{K}$ (Anm: ebenfalls gemittelte Werte).
- Die Betrachtung der Positionen $KH_{\text{Unten},\text{Mitte}}$ und $KH_{\text{Unten},\text{Oben},3\text{cm}}$ waren nicht einfach durch ein arithmetisches Mittel beschreibbar. Hier traten aufgrund der zuvor beschriebenen geometrischen Eigenheiten der Querschnitte Unterschiede auf. Dies hatte zur Folge, dass die Kennliniensteigung bei einer größeren Deckendicke einen geringeren Wert aufwies als bei einer niedrigeren Deckenstärke. Dies ist in nachstehender Abbildung abzulesen.

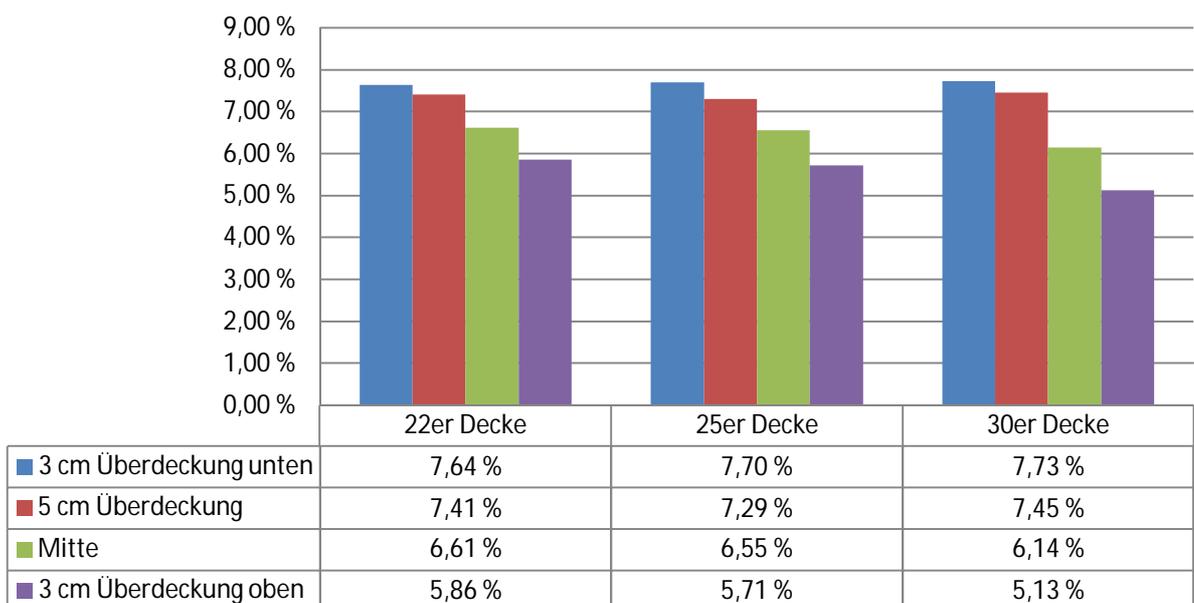


Abb. 7: Auswirkung von Putz, Höhenlage und Deckenstärke

In Abbildung 7 werden zuvor beschriebene Ergebnisse grafisch verdeutlicht. Hier wurden die Unterschiede einer verputzten zu einer unverputzten Variante in Prozent dargestellt. Zum einen sah man, dass die Ergebnisse für 3 cm Überdeckung unten und 5 cm Überdeckung nicht wesentlich voneinander abwichen. Maximal für beide Ergebnisse um **0,16 %**. Für die anderen beiden Ergebnisse war ein Trend erkennbar. Der prozentuale Unterschied nahm mit größerer Deckenstärke ab. Die maximale Differenz betrug **0,73 %**.

- Die Auswirkung des Putzes hatte bei verschiedenen Deckenstärken und unter Betrachtung der Höhenlage zwei verschiedene Ergebnisse aufzuweisen.
- Zum einen waren bei geringeren Überdeckungen keine Unterschiede hinsichtlich der Deckendicken auszumachen. Damit ließ dies die Aussage zu, dass Deckendicken nichts mit der Leistungsabgabe einer Deckenheizung in Kombination mit Putz zu tun hatten.
- Diese Aussage stimmt aber nur bedingt, da bei höheren Überdeckungen die Kennliniensteigung abfiel. Damit wurde deutlich, dass Putz, Höhenlage und Deckendicke in Kombination einen Effekt auf das Gesamtsystem hatten. Größere Deckendicken sowie eine Positionierung weiter oben im Querschnitt hatten zur Folge, dass eine Putzschicht weniger Auswirkung auf die Wärmeabgabeleistung hatte.

Auch an dieser Stelle sei der Vergleich zum Kühlsystem kurz gestattet. Standesgemäß waren höhere Werte vorhanden. Trends und qualitative Aussagen galten gleichermaßen für beide Systeme. Der Unterschied belief sich auf eine maximale Differenz von **0,08 %** bei einer Positionierung mit entweder 3 cm oder 5 cm Betondeckung. Die anderen beiden Höhenpositionen wiesen einen Unterschied von **1,03 %** auf. Diese Zahlenwerte belegten eindeutig die zuvor getroffenen Aussagen und verdeutlichten diese sogar.

2.2.2.6 Putz, Materialien und Deckenstärken

Tab. 12: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | x | | | x | x | |
| Unveränderlich | | x | x | | | x |

Das finale Kapitel für den Parameter Putz stellte der Vergleich zu verschiedenen Materialien dar. Mittels verschiedener Deckenstärken sollten auftretende Effekte übersichtlicher gemacht werden. Es wurde lediglich die Position 3 cm über der Unterkante des Querschnitts betrachtet und dabei mit den Deckenstärken und Materialien variiert. Ziel war es einen Zusammenhang zwischen den Parametern und dem Putz zu finden. Zum ersten Mal werden in dieser Arbeit verschiedene Materialien verwendet. Im Kapitel 2.2.6 Materialien -

Leichtbeton, Normalbeton und UHPC wird detaillierter über die Auswahl geschrieben. Vorwegzunehmen ist, dass diese Ergebnisse weniger von baupraktischen Lösungen als von akademischem Interesse sind. Eine Leichtbeton-Variante sowie eine UHPC Lösung sind für die Fertigteilbauweise nicht vorgesehen, da durch Spezialanwendungen die hohen Vorfertigungsgrade und somit die Vorteile einer Fertigteilvariante zu konventionellem Ortbeton und Schaltechniken entfallen.

Tab. 13: Ergebnisdarstellung Putz – Materialien und Deckenstärken

| | $KH_{\text{Unten,Putz}}$ [W/m ² K] | $KH_{\text{Unten,ohnePutz}}$ [W/m ² K] | $KH_{\text{Differenz}}$ [W/m ² K] |
|--|--|--|---|
| 22er Decke Leichtbeton | <u>3,009</u> | 3,150 | 0,141 |
| 25er Decke Leichtbeton | 3,012 | 3,143 | 0,131 |
| 30er Decke Leichtbeton | 3,015 | 3,154 | 0,139 |
| 22er Decke Normalbeton | 4,579 | 4,957 | 0,379 |
| 25er Decke Normalbeton | 4,577 | 4,959 | 0,382 |
| 30er Decke Normalbeton | 4,574 | 4,957 | 0,383 |
| | | | 0,000 |
| 22er Decke UHPC | 5,018 | 5,449 | 0,431 |
| 25er Decke UHPC | 4,989 | 5,446 | 0,457 |
| 30er Decke UHPC | 4,987 | 5,445 | 0,458 |
| <i>delta UHPC-Normalbeton_{Avg}</i> | <i>0,421</i> | <i>0,489</i> | <i>0,068</i> |
| <i>delta Normal-Leichtbeton_{Avg}</i> | <i>1,565</i> | <i>1,809</i> | <i>0,244</i> |
| <i>delta UHPC-Leichtbeton_{Avg}</i> | <i>1,986</i> | <i>2,298</i> | <i>0,312</i> |

Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse für den Vergleich der Deckenstärken mit Materialien und Putz. Die höchsten Kennliniensteigungs-Werte erhielt man bei unverputztem UHPC und einer 22 cm hohen Stahlbetondecke $KH_{\text{Unten,ohnePutz}} = 5,449 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die niedrigsten Werte waren für Leichtbeton und einer 22 cm Deckenstärke mit Putzschicht $KH_{\text{Unten,Putz}} = 3,009 \text{ W/m}^2\text{K}$. Beachtlich war hier, dass die Materialien einen großen Einfluss auf die Werte haben. Das wurde durch die $KH_{\text{Differenz}}$ Werte ersichtlich. Überdies wurde in Tabelle 13 der Unterschied zwischen den einzelnen Materialien und Deckenstärken dargestellt. Wie in Kapitel 2.2.2.6 Putz, Materialien und Deckenstärke bereits erklärt wurde, hatte die Deckenhöhe bei einer geringen Betondeckung kaum Einfluss auf die Abgabeleistung was sich auch in obenstehender Tabelle bestätigt. Es wurde ein Mittel über die Deckenstärken

gebildet. Der kleinste Unterschied lag bei dem Vergleich UHPC zu Normalbeton vor mit $KH_{\text{Differenz}} = 0,068 \text{ W/m}^2\text{K}$ und der größte bei UHPC zu Leichtbeton $KH_{\text{Differenz}} = 0,312 \text{ W/m}^2\text{K}$.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Deckenstärken für die verschiedenen Materialien nicht angepasst wurden. Beispielsweise ist ein UHPC Querschnitt mit einer Deckenstärke von 30 cm im Bauwesen nicht sinnvoll. Damit die Ergebnisse aber weiterhin vergleichbar sind, wurde hier mit den vorher definierten Deckendicken gearbeitet.

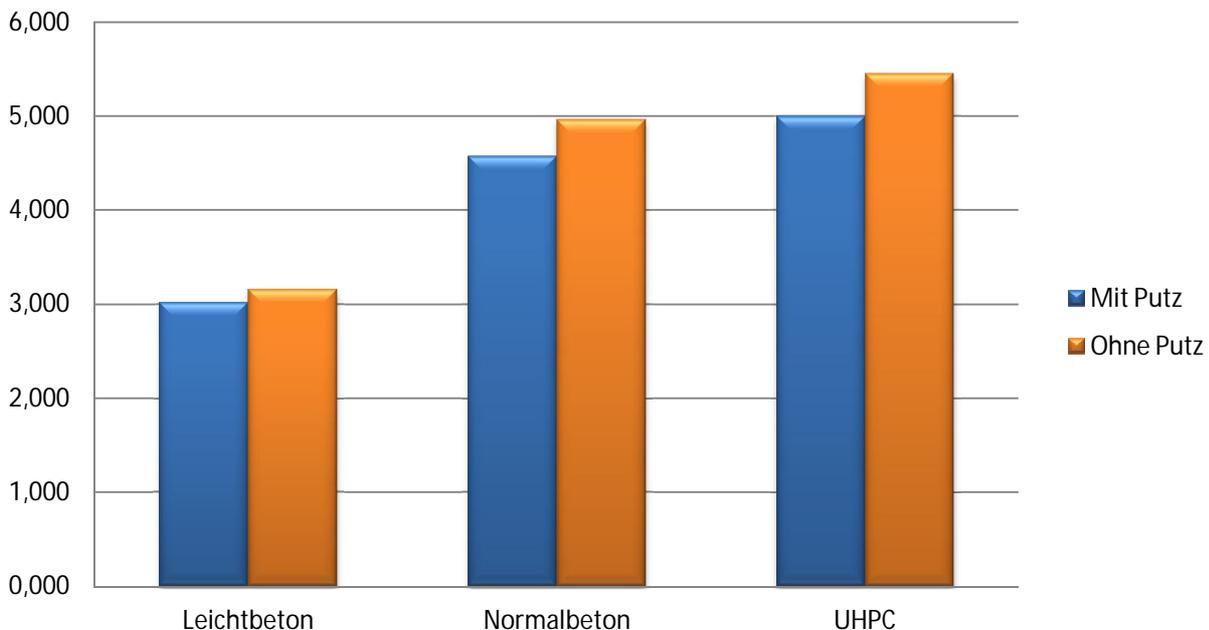


Abb. 8: Auswirkung von Putz, Deckenstärke und Materialien

Hier ist sehr anschaulich erkennbar, dass der Effekt von Putz zu keinem Putz bei Leichtbeton gering war, bei Normalbeton zunahm und sein Maximum beim UHPC besaß.

- Die deutliche Abweichung der einzelnen Materialien ließen sich durch die unterschiedlichen Rohdichten ρ sowie die Wärmeleitfähigkeiten λ erklären.

Durch Betrachtung des Kühlbetriebs ließen sich höhere Werte ausmachen. Der höchste Wert war ebenfalls der Wert für den unverputzten UHPC Querschnitt $KH_{\text{Unten,ohnePutz}} = 5,449 \text{ W/m}^2\text{K}$, der niedrigste Wert war für Leichtbeton $KH_{\text{Unten,ohnePutz}} = 5,449 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Differenz war höher als beim Heizbetrieb, mit $KH_{\text{Differenz}} = 0,228 \text{ W/m}^2\text{K}$ für den Vergleich von UHPC zu Normalbeton und $KH_{\text{Differenz}} = 0,762 \text{ W/m}^2\text{K}$ für UHPC zu Leichtbeton.

- Während dieses ganzen Kapitels wurden ähnliche Erkenntnisse gefunden. Damit wurde noch einmal verdeutlicht, dass der Einfluss des Putzes bei höheren Werten für die Kennliniensteigung wesentlicher ist, als bei geringeren Werten. Damit ging auch deutlich hervor, dass man bei Auslegung mit höheren Werten dem Putz eine besondere Rolle zukommen lassen sollte.

- *Es bleibt jedoch auch festzuhalten, dass selbst bei geringeren Werten der Effekt einen Einfluss auf das Gesamtverhalten des Systems hatte.*
- *Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Kapitel waren sowohl für den Heiz- als auch Kühlbetrieb gültig. Die Zahlenwerte unterschieden sich, qualitative Aussagen und Trends trafen auf beide Möglichkeiten zu.*

Die Untersuchung von verschiedenen Putzen und Möglichkeiten können vielfältig ausfallen. Da in dieser Arbeit aber ein spezielles Projekt behandelt wurde, wurde auf eine Ausweitung der Studie zu diesem Parameter verzichtet. Es soll an dieser Stelle lediglich der Hinweis erfolgen, dass sich bei Verwendung von anderen Putzsorten das Ergebnis verändert, nicht aber die qualitativen Ergebnisse. Trendlinien und allgemeine Aussagen aus diesem Kapitel, können auf andere Projekte angewendet werden. Eine weitere Untersuchung verschiedener Putzsorten würde aber den Umfang dieser Arbeit übersteigen.²²

2.2.3 Verschiedene Rohrdurchmesser

Zu Beginn dieser Arbeit wurden einige Parameter noch nicht fixiert. Darunter waren auch die Rohrdurchmesser. Es wurde diskutiert, ob Rohre mit einem außen Durchmesser von 17 mm oder 20 mm zur Verwendung kommen würden. Daher wurde dieser Parameter untersucht. Wie im Kapitel 2.1.2.3 Parameter für Heizmedium bereits erklärt wurde, wurden die Rohre als PEX simuliert mit einer Wandstärke von 2 mm. Als Heizmedium wurde Wasser verwendet, dem eine innere Wärmequelle zugewiesen wurde.

Da in den vorhergegangenen Kapiteln bereits einzelne Parameter miteinander verglichen und erklärt wurden, wird im Folgenden nur mehr auf die Vergleiche eingegangen, die noch nicht behandelt wurden.

2.2.3.1 Rohrdurchmesser und Höhenlage

Tab. 14: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | x | | | | x |
| Unveränderlich | x | | x | x | x | |

Durch den Vergleich verschiedener Rohrdurchmesser mit Höhenlage sollte dargestellt werden, ob und wie die thermischen Eigenschaften dieser beider Parameter beeinflusst wurden. Das Ergebnis wurde anhand von Normalbeton und einer 22 cm hohen, unverputzten Betonquerschnitt illustriert. Die Rohre waren 15 cm voneinander entfernt.

²² Vgl. ÖNORM EN 12524: 2000 09 01

Tab. 15: Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser - Höhenlage

| | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Oben}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Gesamt}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ |
|---------------------------------|---|--|--|
| 3cm Überdeckung Ø17 | 4,579 | 0,346 | 4,925 |
| 5cm Überdeckung Ø17 | 4,401 | 0,348 | 4,749 |
| Mitte Ø17 | 3,899 | 0,361 | 4,261 |
| 3cm Überdeckung oben Ø17 | 3,377 | 0,374 | 3,751 |
| 3cm Überdeckung Ø20 | 4,700 | <u>0,338</u> | 5,038 |
| 5cm Überdeckung Ø20 | 4,512 | 0,337 | 4,839 |
| Mitte Ø20 | 3,985 | 0,373 | 4,359 |
| 3cm Überdeckung oben Ø20 | 3,445 | 0,391 | 3,836 |
| prozentualer Unterschied | 2,65 % | 2,31 % | 2,65 % |
| prozentualer Unterschied | 2,53 % | 3,26 % | 2,53 % |
| prozentualer Unterschied | 2,21 % | 3,32 % | 2,21 % |
| prozentualer Unterschied | 2,03 % | 4,46 % | 2,08 % |

Wie aus Tabelle 15 hervorgeht, war der größte Wert bei 3 cm Betondeckung und einem Rohrdurchmesser von 20 mm $KH_{\text{Unten}} = 4,700 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, dem gegenüber stand der Wert für Ø 17 mm mit $KH_{\text{Unten}} = 4,579 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Das machte eine Differenz von $KH_{\text{Differenz}} = 0,121 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und in Prozent **2,65 %**. Die niedrigsten Werte waren für die Position 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante zum einen $KH_{\text{Unten}} = 3,445 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten}} = 3,377 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Die Differenz betrug $KH_{\text{Differenz}} = 0,068 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, **2,03%**. Man stellte für die Werte von KH_{Unten} fest, dass mit steigender Höhenlage die Differenz zwischen geringeren und höheren Rohrdurchmessern kleiner wird.

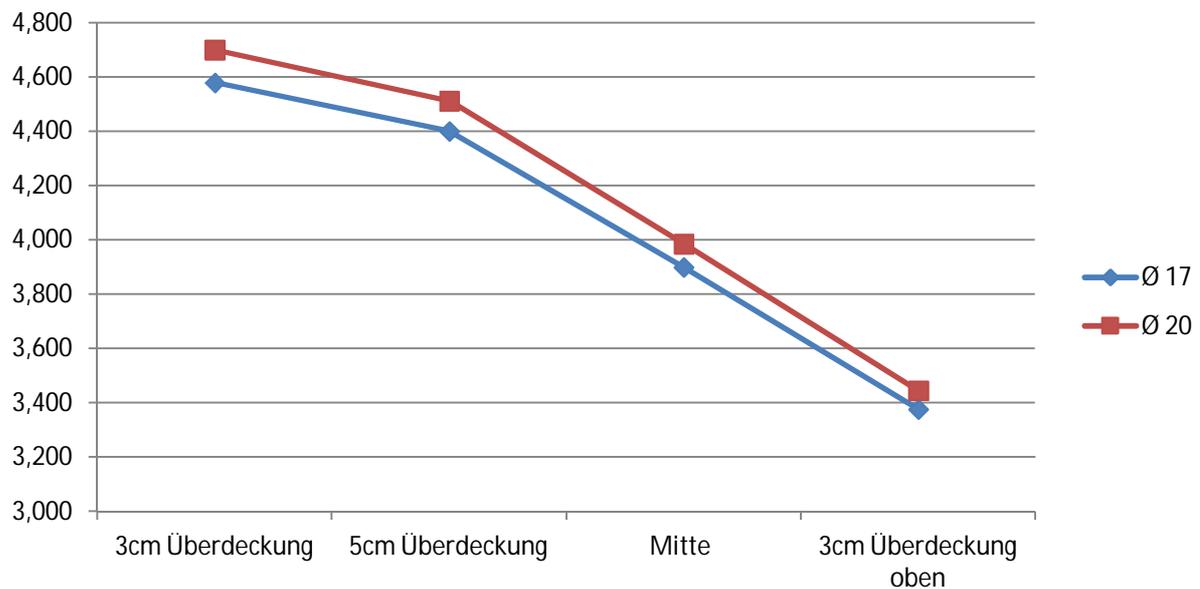


Abb. 9: Auswirkung von Rohrdurchmesser und Höhenlage

Anhand von Abbildung 9 sind die Effekte beider Parameter gut zu erkennen. Zum einen fielen beide Linien annähernd parallel aufgrund der Veränderung der Höhenposition im Querschnitt, zum anderen wurden der Abstand der beiden Punkte und damit die Differenz weniger. Damit waren die zuvor dargestellten Ergebnisse grafisch übersichtlich dargestellt.

- Die Veränderung der Rohrdurchmesser hatte eine geringe Auswirkung auf das Gesamtergebnis. Selbst der maximale Unterschied belief sich lediglich auf **2,65 %**.
- Durch das vertikale Verschieben der Rohrregister, wurde die Differenz der Werte für die beiden Rohrdurchmesser weniger. Damit galt wiederum, dass die Auswirkung der Effekte bei niedrigeren Werten für die Kennliniensteigung abgeschwächt wurde.

Im Kühlbetrieb konnten die Ergebnisse durch eine ähnliche Kurve wie im Heizbetrieb dargestellt werden. Die maximale Differenz für die kleinste Betondeckung war $KH_{\text{Differenz}} = 0,213 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die größte $KH_{\text{Differenz}} = 0,099 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit war für die Differenz ein Zusammenhang gegeben. Für Heiz- und Kühlbetrieb galt, dass die Differenz um rund **50 %** abnahm. (Anm. 56% für Heizbetrieb, 46 % für Kühlbetrieb). Das war insofern beeindruckend, als dass trotz Veränderung der äußeren und inneren Parameter, ein ähnliches Ergebnis erzielt werden konnte, was einerseits auf die Berechnungsgenauigkeit des Programms HT-Flux zurückzuführen ist, andererseits auf die Richtigkeit der Eingabe.

2.2.3.2 Rohrdurchmesser, Höhenlage und Deckenstärke

Tab. 16: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | x | | x | | x |
| Unveränderlich | x | | x | | x | |

Um repräsentative Werte zu erhalten wurden die Ergebnisse aus dem vorhergegangenen Kapitel um 2 Teile erweitert. Es gelten zwar die zuvor getätigten Aussagen auch für diesen Vergleich, die Simulationen wurden ebenfalls mit Deckenstärken 25 und 30 cm durchgeführt.

Abb. 10: Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Höhenlage und Deckenstärke

| | $KH_{\text{Unten},22}$ [W/m ² K] | $KH_{\text{Unten},25}$ [W/m ² K] | $KH_{\text{Unten},30}$ [W/m ² K] |
|---------------------------------|--|---|--|
| 3cm Überdeckung Ø17 | 4,579 | 4,577 | 4,574 |
| 5cm Überdeckung Ø17 | 4,401 | 4,398 | 4,395 |
| Mitte Ø17 | 3,899 | 3,795 | 3,626 |
| 3cm Überdeckung oben Ø17 | 3,377 | 3,213 | 2,984 |
| 3cm Überdeckung Ø20 | 4,700 | 4,695 | 4,701 |
| 5cm Überdeckung Ø20 | 4,512 | 4,509 | 4,506 |
| Mitte Ø20 | 3,985 | 3,883 | 3,693 |
| 3cm Überdeckung oben Ø20 | 3,445 | 3,283 | 3,035 |
| prozentualer Unterschied | 2,65 % | 2,56 % | 2,77 % |
| prozentualer Unterschied | 2,53 % | 2,52 % | 2,52 % |
| prozentualer Unterschied | 2,21 % | 2,34 % | 1,84 % |
| prozentualer Unterschied | 2,03 % | 2,18 % | 1,70 % |

Die Differenzwerte bei geringer Überdeckung ähnelten sich, wie bereits im Kapitel 2.2.2.5 Putz, Höhenlage und Deckenstärke. Man konnte dies wiederum auf Rechenungenauigkeiten zurückführen. Der maximale Unterschied ist 0,21 %, damit mussten diese Werte nicht weiter untersucht und hinterfragt werden. Für alle anderen Parameter galt, dass der Durchmesser 20 mm einen höheren Wert aufwies, als bei 17 mm. Gemittelt war die Differenz für die beiden geringen Betondeckungen $KH_{\text{Differenz},3\text{cm}} = 0,122 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Differenz},5\text{cm}} = 0,111$

W/m^2K . Dieser Vergleich machte Sinn bei 3 und 5 cm Deckung, bei der Position in der Mitte und 3 cm von oben war es von keiner großen Bedeutung.

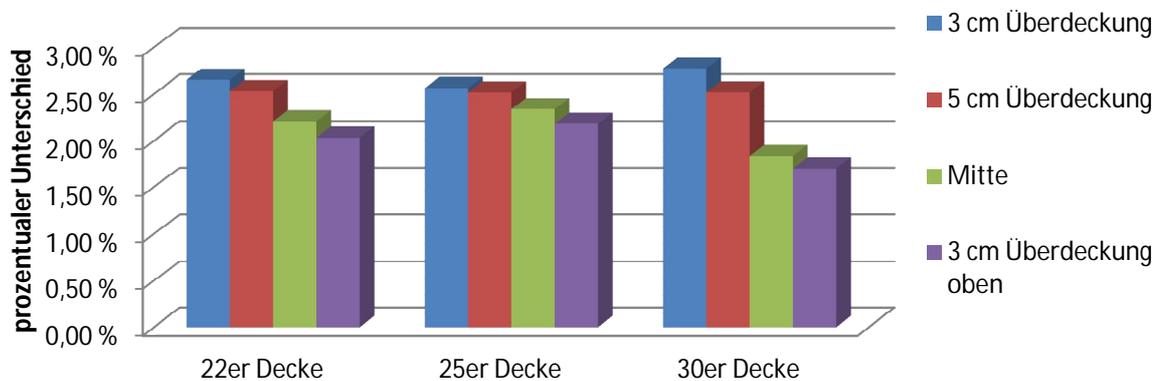


Abb. 11: Differenz der Rohrdurchmesser zu Deckenstärke und Höhenlage in Prozent

Noch einmal übersichtlich dargestellt wurde hier der Unterschied in Prozent. Bei allen 3 Deckenstärken sank die Differenz der Abgabeleistung mit steigender Betondeckung. Auffällig war, dass bei einer 30 cm Decke die Unterschiede höher ausfielen als bei niedrigeren Deckenstärken.

- *Der Unterschied zu den Deckenstärken ging stark mit der Höhenlage einher. Auch wenn nicht die exakt gleichen Zahlenwerte festgestellt werden konnten, waren die Ergebnisse doch so ähnlich, dass es die Behauptung zulässt, dass die Änderung der Deckenstärken kaum einen Effekt auf die Veränderung des Rohrdurchmessers hatte.*
- *Vernachlässigt man bei Auslegung einer Deckenheizung den thermischen Einfluss von verschiedenen Rohrdurchmessern, ist der maximal auftretende Fehler in diesem Fall **2,77 %**.*
- *Auch hier galt, wurden die Zahlenwerte niedriger, war auch die Differenz weniger.*

Unterschied zwischen Heiz und Kühlbetrieb lag wiederum in der Größe der Zahlen, wobei die Kühlung höhere Werte aufwies. Damit einher gingen größere Effekte bei den Zahlenwerten. Beim Vergleich der verschiedenen Deckenstärken mit dem Durchmesser und der Höhenlage wurde ein Wert für die Kennliniensteigung von maximal $KH_{\text{Unten}} = 6,627 W/m^2K$ für ein Rohr mit 20 mm Durchmesser simuliert. Die Differenz zu Durchmesser 17 mm war $KH_{\text{Differenz}} = 0,228 W/m^2K$. Das war insofern bedeutend, da die errechnete Abgabeleistung bei einer Deckenkühlung um **86 %** zunimmt. Insgesamt ist der Effekt vom Rohrdurchmesser nach wie vor von untergeordneter Bedeutung, denn durch die Änderung ist eine Verbesserung von **3,56 %** erzielt worden.

2.2.3.3 Rohrdurchmesser, Höhenlage und Materialien

Tab. 17: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | x | | | x | x |
| Unveränderlich | x | | x | x | | |

Dieses Unterkapitel stellte den finalen Vergleich zum Parameter Durchmesser dar. Es wurden die einzelnen Durchmesser mit Materialien und Höhenlage verglichen. Da bei den Vergleichen mit dem Material eine Vielzahl an Ergebnissen vorlagen, wurde auf die Übersichtstabelle verzichtet und einzelne Ergebnisse hervorgehoben.

- Die höchsten Werte waren bei einer Überdeckung von 3 cm und einem Durchmesser von 20 mm. UHPC hatte einen Wert von $KH_{Unten} = 5,091 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei Veränderung des Durchmessers errechnete sich der Wert $KH_{Unten} = 5,018 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit war ein Unterschied von 1,46 % vorhanden.
- Für denselben Vergleich gilt beim Material Leichtbeton: $KH_{Unten} = 3,151 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei Ø 20 mm und $KH_{Unten} = 3,009 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei Ø 17 mm. Damit war ein Unterschied von 4,74 % gegeben.
- Die Betrachtung der höchsten Überdeckung brachte folgendes Ergebnis. Für einen UHPC Querschnitt und 20 mm Rohrdurchmesser war die Kennliniensteigung $KH_{Unten} = 4,475 \text{ W/m}^2\text{K}$, bei 17 mm erhielt man $KH_{Unten} = 4,399 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit war der Unterschied in Prozent 1,71%.
- Die Leichtbetonvariante wurde wiederum gleich betrachtet und die Werte waren zum einen $KH_{Unten} = 1,353 \text{ W/m}^2\text{K}$ und zum anderen $KH_{Unten} = 1,333 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Unterschied betrug 1,50 %. Die Werte für Normalbeton lagen zwischen jenen für UHPC und Leichtbeton.

Dieses Ergebnis hatte auf den ersten Blick Unregelmäßigkeiten aufzuweisen. Bei allen anderen Betrachtungen galt, dass höhere Werte für die Kennliniensteigung größere Effekte beim Vergleich der einzelnen Parameter nach sich ziehen. Auffällig war hier aber, dass der UHPC Querschnitt einen deutlich geringeren Effekt auf die Abgabeleistung einer Deckenheizung hatte, als dies beim Leichtbeton der Fall war. Überdies war ersichtlich, dass der prozentuale Unterschied bei vertikaler Verschiebung der Rohre bei UHPC sogar zunimmt. Für Leichtbeton konnte man das übliche Verhalten beobachten, der Unterschied nimmt stark ab.

- Die Ergebnisse zeigten, dass der Einfluss der Rohrdurchmesser verglichen mit den Materialeigenschaften untergeordnet ist. Die Auswirkung der verschiedenen Werte für die Wärmeleitfähigkeit λ und die Rohdichte ρ waren gewichtiger als die Veränderung des Rohrdurchmessers. Damit konnte man auch das Verhalten des UHPC

Querschnitts erklären. Durch die Anordnung der Heizrohre ganz unten im Querschnitt und der vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeit, erreichte der Beton ähnlichere Temperaturen. Bei großer Überdeckung wurden - wenn auch geringe Abweichungen vorherrschen - ähnliche Werte gemessen.

- Die Erklärung für den Leichtbeton lieferten ebenfalls Dichte und Wärmeleitfähigkeit. Die Werte waren im Vergleich zu den anderen beiden Materialien niedrig, daher leitete der Beton die Wärme weniger durch den Querschnitt. Bei 3 cm Deckung der Heizrohre, wurde durch die geringe Deckung lokal ein höherer Wert für die Temperatur gemessen, die Randbereiche hingegen wiesen deutlich niedrigere Temperaturen auf. Bei einer Position 3 cm unterhalb der Oberkante des Betonquerschnitts entstand an der Unterseite eine annähernd konstante Temperatur.

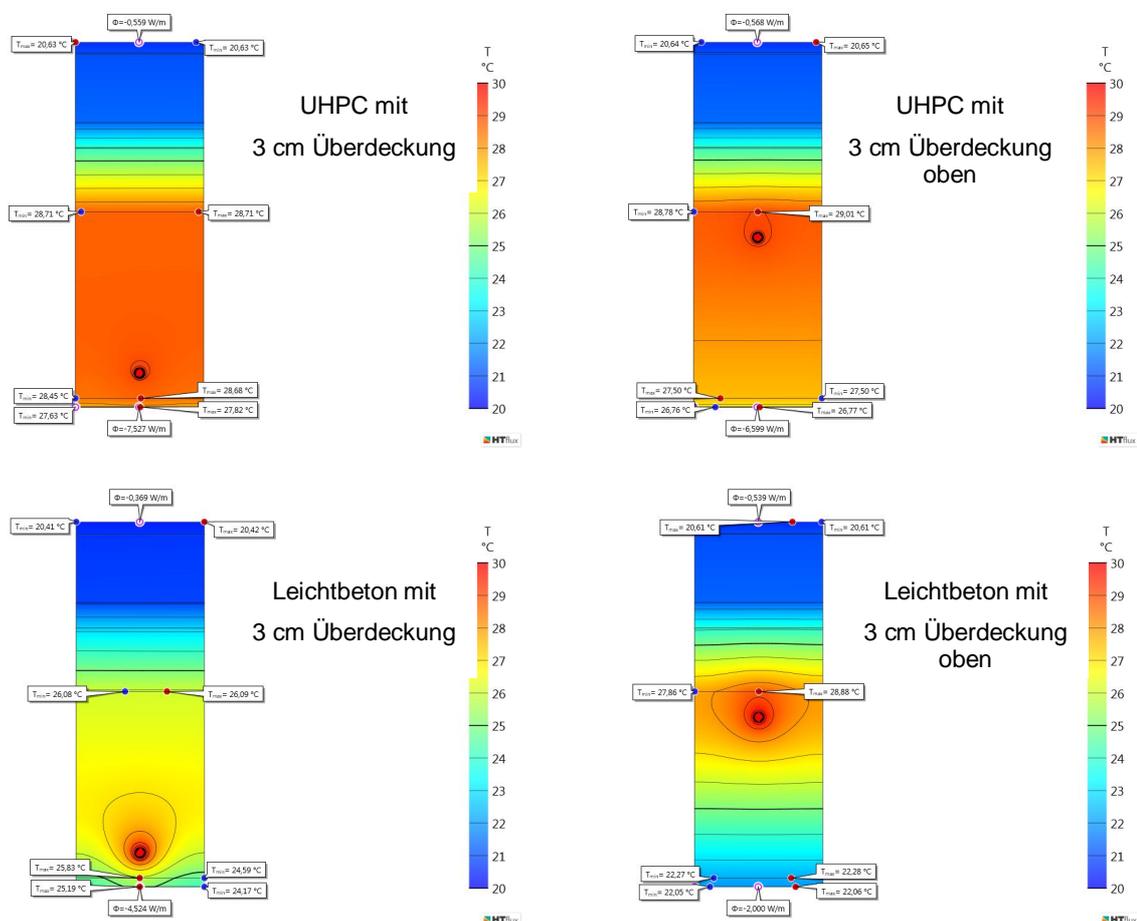


Abb. 12: Darstellung UHPC und Leichtbeton mit $\varnothing 17$ thermisches Verhalten

Diese Grafik fasst die beschriebenen Effekte anschaulich zusammen. Man konnte deutlich erkennen, wie die Isothermen bei einem UHPC Querschnitt, in Abbildung 12 oben dargestellt, annähernd horizontal verliefen. Dabei war egal ob eine geringe (linke Bilder) oder hohe Deckung (rechte Bilder) vorhanden ist. Betrachtet man den Leichtbeton – unten – wurden die zuvor getätigten Aussagen eindeutig bewiesen. Man konnte bei geringer Überdeckung erkennen, wie sich die Isothermen zum adiabaten Rand hin nach oben verschieben, in

Querschnittmitte höhere Temperaturen vorherrschten. Bei hoher Überdeckung hatte das Heizsystem wenig Einfluss aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit, die Isothermen verliefen annähernd horizontal.

Dieser Effekt hatte, einfach erklärt, mehr Einfluss als der kleinere der Rohrdurchmesser, dadurch waren die normalen Trends und Aussagen hier nur bedingt gültig.

Für den Kühlbetrieb konnte man sagen, dass sich der Leichtbeton genau gleich verhält wie in diesem Kapitel beschrieben. Die Werte für den UHPC entsprachen, anders als beim Heizbetrieb, wieder den normalen Trends, das heißt die Differenz nimmt bei steigender Überdeckung ab. Eine Begründung dafür war die Größe der Werte. Der Effekt der Rohrdurchmesser konnte dadurch besser zur Geltung kommen. Nichts desto weniger muss festgehalten werden, dass bei geringster Überdeckung ein Unterschied in Prozent von 2,87 % und bei höchster Deckung 2,46 % zwischen Durchmesser 17 mm und 20 mm vorherrschte. Damit wurde deutlich, dass auch für den UHPC die Materialeigenschaften überwiegen und die Aussagen von zuvor korrekt waren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei der Auswahl eines geeigneten Rohrdurchmessers für das System, das thermische Verhalten wenig Einfluss hatte. Insgesamt überwogen alle anderen Effekte jenen des Rohrdurchmessers. Dies ließ sich auf das Volumina Verhältnis von Betonquerschnitt zu Heizrohr zurückführen.

- *Ein 22 cm hoher Stahlbetonquerschnitt hatte auf den betrachteten Querschnitt eine Fläche von 330 cm². Ein Rohr mit Ø 17 mm besitzt eine Fläche von 2,27 cm², bei Ø 20 mm 3,14 cm². Damit errechnete sich ein Verhältnis von **0,00688** bzw. **0,00951**. Es war ein deutliches Volumen Ungleichgewicht zugunsten des Stahlbetons vorhanden, was den Effekt erklärte.*
- *Durch das vergleichsweise kleine Volumen der Rohre im Querschnitt wurde ersichtlich, dass durch Erhöhung des Rohrdurchmessers kaum ein Effekt erzielt wurde. Der Stahlbeton überwog, er wurde auch merklich durch das Einlegen der Rohre erwärmt bzw. gekühlt, die Abgabefläche der Rohre war aber so klein, dass man bei thermischen Betrachtungen auf eine Analyse verzichten durfte.*

Vielmehr stehen andere Überlegungen im Vordergrund wie Dauerhaftigkeit der verwendeten Materialien, hydraulische Eigenschaften, Nachhaltigkeit und leichte Einbaumöglichkeiten. Alleine die zuletzt genannten Punkte würden den Umfang dieser Arbeit sprengen, weshalb auch nicht näher darauf eingegangen wird.

2.2.4 Achsabstand

Durch die Literaturstudie ist hervorgegangen, dass der Achsabstand einen zentralen Parameter für Deckenheizsysteme darstellen würde. Auch die Ergebnisse hier belegten, dass eine Veränderung der Achsabstände deutliche Unterschiede hinsichtlich der Wärmeabgabeleistung nach sich zog. Überdies ist die Verlegung in einem Fertigteilwerk ein zentraler Faktor. Diese ganzen Punkte verdeutlichen die Dringlichkeit zur Betrachtung dieses

Parameters und somit konnte nicht auf die Untersuchung verzichtet werden, auch wenn dieser bereits in anderen Arbeiten untersucht wurde.²³²⁴

2.2.4.1 Achsabstand und Höhenlage

Tab. 18: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | | x | | | x |
| Unveränderlich | x | x | | x | X | |

In diesem Kapitel wurde die Auswirkung der Höhenlage auf den Achsabstand und umgekehrt untersucht. Dabei wurde ein Normalbetonquerschnitt bei einer 22 cm Decke und verputzter Untersicht mit Ø 17 mm als Untersuchungsquerschnitt gewählt.

Tab. 19: Ergebnisdarstellung Achsabstand – Höhenlage

| | KH _{Unten} [W/m ² K] | KH _{Oben} [W/m ² K] | KH _{Gesamt} [W/m ² K] |
|---------------------------------------|--|---|---|
| 3cm Überdeckung Achsabstand 15cm | 4,579 | 0,346 | 4,925 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand 15cm | 4,401 | 0,348 | 4,749 |
| Mitte Achsabstand 15cm | 3,899 | 0,361 | 4,261 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand 15cm | 3,377 | 0,374 | 3,751 |
| 3cm Überdeckung Achsabstand 20cm | 4,252 | <u>0,319</u> | 4,571 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand 20cm | 4,105 | 0,317 | 4,422 |
| Mitte Achsabstand 20cm | 3,674 | 0,344 | 4,018 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand 20cm | 3,189 | 0,357 | 3,545 |
| prozentualer Unterschied | 7,15 % | 7,80 % | 7,19 % |
| prozentualer Unterschied | 6,72 % | 9,05 % | 6,89 % |
| prozentualer Unterschied | 5,78 % | 4,94 % | 5,71 % |
| prozentualer Unterschied | 5,57 % | 4,68 % | 5,48 % |

²³ Vgl. Krec 2015

²⁴ Vgl. Expertenforum Energiespeicher Beton et al. 2015

Die Kennliniensteigung mit dem höchsten Wert errechnete sich bei 3 cm und einem Achsabstand von 15 cm zu $KH_{\text{Unten}} = 4,579 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei gleicher Höhenlage aber 20 cm Rohrregisterachsabstand erhielt man den Wert $KH_{\text{Unten}} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Differenz betrug $KH_{\text{Differenz}} = 0,327 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent 7,15 %. Bei steigender Überdeckung nahm die Leistung der Deckenheizung ab. Bei der höchsten Betondeckung erhielt man einen Wert für 15 cm Achsabstand $KH_{\text{Unten}} = 3,377 \text{ W/m}^2\text{K}$ und bei 20 cm $KH_{\text{Unten}} = 3,189 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dabei war die Differenz $KH_{\text{Differenz}} = 0,188 \text{ W/m}^2\text{K}$, oder 5,57 %. Für diesen Vergleich galten die bekannten Trends, mit einem niedrigeren Wert für die Kennliniensteigung nimmt der Effekt der verschiedenen Achsabstände ab.

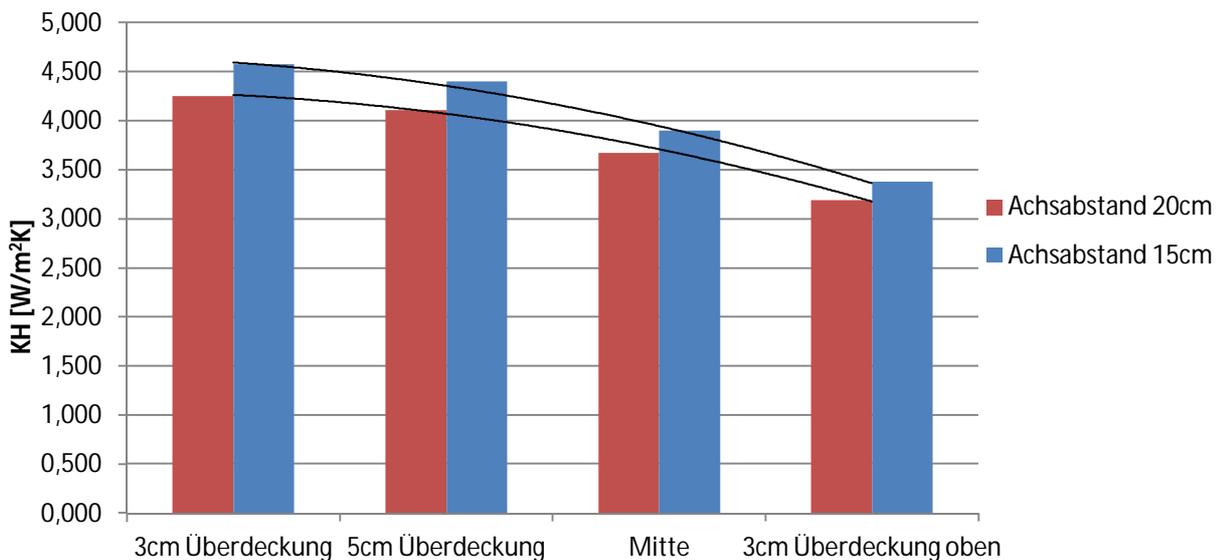


Abb. 13: Auswirkung von Achsabstand und Höhenlage

Wie in Grafik 13 ersichtlich, sind die Ergebnisse aus Tabelle 19 hier dargestellt. Hier wurden zwei Trendlinien dargestellt, um die Ergebnisse zu verdeutlichen. Zum einen war erkennbar, dass sowohl Achsabstand 15 cm als auch Achsabstand 20 cm sichtbar abnahmen, zum anderen, dass beide Linien mit steigender Betondeckung konvergierten und die Differenz der beiden Ergebnisse abnahm.

- *Insgesamt war der Effekt von Achsabstand und Höhenlage ein offensichtlicher. Bereits bei einer Änderung des Achsabstandes von 5 cm war die höchste Differenz 7,15 %. Die niedrigste Differenz war immerhin auch noch 5,57%.*
- *Bei der Auslegung einer Deckenheizung sind deutliche Unterschiede zu erwarten, wenn man verschiedene Achsabstände wählt. Die beteiligten Planer müssen sich dieses Effekts bewusst sein.*

Für ein Kühlsystem waren die Werte größer. Bei einer Deckung von 3 cm und einem Achsabstand von 15 cm errechnete sich die Kennliniensteigung auf $KH_{\text{Unten}} = 6,402 \text{ W/m}^2\text{K}$,

bei 20 cm ist der Wert $KH_{\text{Unten}} = 5,799 \text{ W/m}^2\text{K}$. Mit einer Differenz von $KH_{\text{Differenz}} = 0,603 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem Unterschied in Prozent von **9,42 %**. Für die höchste Deckung galt bei 15 cm Achsabstand ein Wert von $KH_{\text{Unten}} = 4,279 \text{ W/m}^2\text{K}$ und bei 20 cm $KH_{\text{Unten}} = 3,981 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Unterschied war dabei $KH_{\text{Differenz}} = 0,298 \text{ W/m}^2\text{K}$, was **6,97 %** entsprach. Auch für den Kühlbetrieb galten die Trends wie im Heizbetrieb gleichermaßen.

2.2.4.2 Achsabstand, Höhenlage und Deckenstärke

Tab. 20: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | | x | x | | x |
| Unveränderlich | x | x | | | x | |

Die zuvor verwendeten Darstellungen und Rechnungen galten als Grundlage für das kommende Kapitel. Dabei galt, sämtliche Parameter wie Putz, Materialien oder Rohrdurchmesser blieben unverändert. Die anderen Parameter waren variabel und wurden miteinander verglichen.

Tab. 21: Ergebnisdarstellung Achsabstand – Höhenlage und Deckenstärke

| | 22er Decke | 25er Decke | 30er Decke |
|---------------------------------------|---|---|---|
| | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ |
| 3cm Überdeckung Achsabstand 15cm | 4,579 | 4,577 | 4,574 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand 15cm | 4,401 | 4,398 | 4,395 |
| Mitte Achsabstand 15cm | 3,899 | 3,795 | 3,626 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand 15cm | 3,377 | 3,213 | 2,984 |
| 3cm Überdeckung Achsabstand 20cm | 4,252 | 4,258 | 4,257 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand 20cm | 4,105 | 4,107 | 4,109 |
| Mitte Achsabstand 20cm | 3,674 | 3,577 | 3,436 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand 20cm | 3,189 | 3,050 | <u>2,842</u> |
| prozentualer Unterschied | 7,15 % | 6,98 % | 6,94 % |
| prozentualer Unterschied | 6,72 % | 6,63 % | 6,51 % |
| prozentualer Unterschied | 5,78 % | 5,75 % | 5,25 % |
| prozentualer Unterschied | 5,57 % | 5,10 % | 4,76 % |

Das Ergebnis aus Tabelle 21 spiegelte die Erwartungshaltung wieder. Für alle 3 Deckenstärken galt, dass die höchsten Werte bei einer Deckung von 3 cm auftraten, für 15 cm Achsabstand im Mittel $KH_{\text{Unten}} = 4,576 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Für 5 cm über Stahlbetonunterkante war der Wert im Mittel $KH_{\text{Unten}} = 4,398 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Verglichen mit einem Achsabstand von 20 cm ergab die Simulation hier für 3 cm Deckung $KH_{\text{Unten}} = 4,256 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und für 5 cm $KH_{\text{Unten}} = 4,107 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Damit ließ sich der Unterschied zwischen den Achsabständen im Mittel zu 7,03 % und 6,62 % berechnen. Auffallend bei diesen Ergebnissen war, dass die Werte für eine geringe Betondeckung minimal voneinander abwichen. Bei der Position Mitte und 3 cm unter der Querschnittoberkante wichen die Kennliniensteigung mehr zwischen den einzelnen Deckenstärken ab. Es war egal welcher Achsabstand betrachtet wurde, der höchste Wert wurde bei einer 22 cm starken Decke festgestellt.

Den größten Unterschied zwischen den Achsabständen erhielt man beim Vergleich der Werte für eine Deckung mit 3 cm mit 7,15 %. Der kleinste Wert war bei einer 30 cm starken Decke und einer Position 3 cm unterhalb der Oberkante mit 4,76 %.

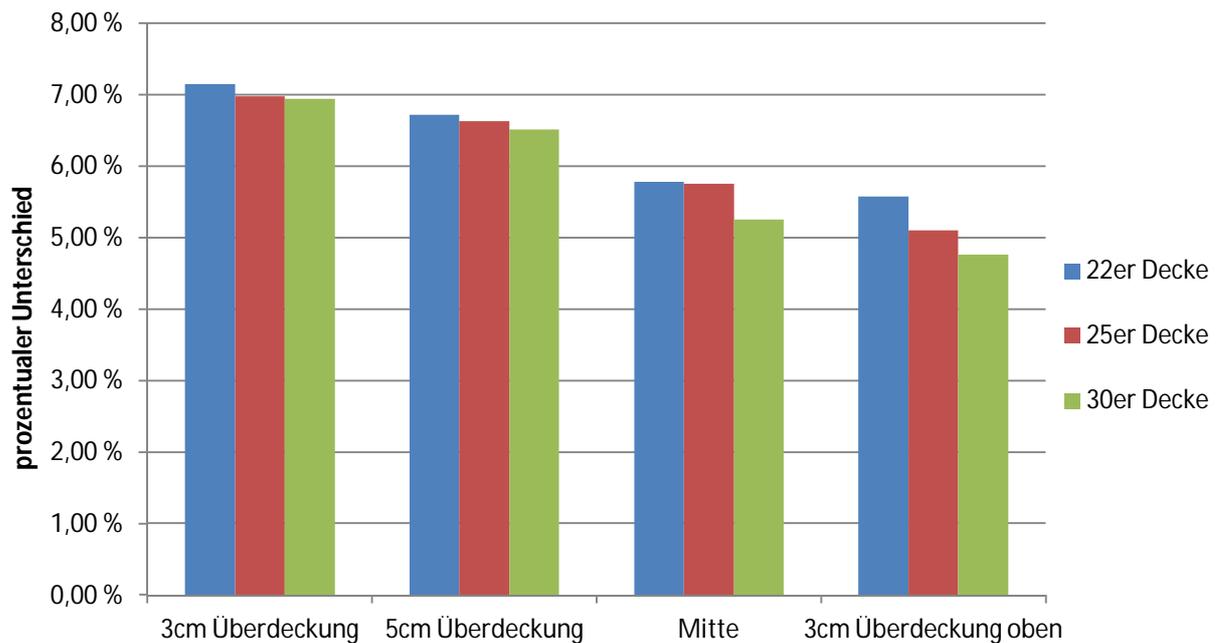


Abb. 14: Differenz der Achsabstände zu Höhenlage und Deckenstärke

In Abbildung 14 sieht man den Trend für diesen Vergleich. Mit steigender Überdeckung wurde der Effekt der Achsabstände geringer. Ebenfalls ersichtlich war, wie sich bei geringer Betondeckung trotz verschiedener Deckenstärken kaum Veränderungen ergaben. Hingegen zeigte die letzte Säule den Unterschied am deutlichsten. Bei hohen Deckungen hatte die Deckenstärke einen Einfluss auf die Achsabstände und umgekehrt.

- *Damit galt für den Vergleich der Achsabstände, Höhenlage und Deckenstärken, dass bei einer geringen Betondeckung die Deckenstärke nahezu keine Rolle spielte und man diese vernachlässigen konnte.*
- *Bei mehr Überdeckung sollte der Effekt zumindest überlegt werden, was dieser für das Gesamtsystem Deckenheizung bedeutet. Er variierte zwischen maximal 5,57 % und minimal 4,76 %, damit waren Überlegungen durchaus von Interesse, konnten aber im Bedarfsfall vernachlässigt werden.*
- *Der Vergleich der Höhenlage 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante zeigte, dass der Effekt bei hoher Deckung von Interesse war und nicht mehr einfach vernachlässigt werden konnte.*

Der Kühlbetrieb stellte wiederum das Ende dieses Vergleichs dar. Die Werte dafür lagen im Mittel für 3 cm Betondeckung und einem Achsabstand von 15cm bei $KH_{\text{Unten}} = 6,398 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für 5 cm Deckung $KH_{\text{Unten}} = 6,042 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei einem Achsabstand von 20 cm ergaben sich die beiden Werte $KH_{\text{Unten}} = 5,797 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten}} = 5,530 \text{ W/m}^2\text{K}$. Das brachte einen Unterschied von **9,41 %** für 3 cm Deckung und **8,48 %** für 5 cm Deckung.

2.2.4.3 Achsabstand, Höhenlage und Materialien

Tab. 22: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | | x | | x | X |
| Unveränderlich | x | x | | x | | |

Hier wurde UHPC, Normalbeton und Leichtbeton mit dem Achsabstand und der Höhenlage verglichen. Die verputzte Decke blieb dabei konstant bei 22 cm und der Durchmesser ist 17 mm.

Tab. 23: Ergebnisdarstellung Achsabstand – Höhenlage und Materialien

| | Leichtbeton | Normalbeton | UHPC |
|---------------------------------------|--|--|--|
| | KH _{Unten} [W/m ² K] | KH _{Unten} [W/m ² K] | KH _{Unten} [W/m ² K] |
| 3cm Überdeckung Achsabstand 15cm | 3,009 | 4,579 | 5,018 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand 15cm | 2,608 | 4,401 | 4,913 |
| Mitte Achsabstand 15cm | 1,854 | 3,899 | 4,683 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand 15cm | 1,333 | 3,377 | 4,399 |
| 3cm Überdeckung Achsabstand 20cm | 2,583 | 4,252 | 4,748 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand 20cm | 2,281 | 4,105 | 4,685 |
| Mitte Achsabstand 20cm | 1,675 | 3,674 | 4,470 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand 20cm | <u>1,221</u> | 3,189 | 4,204 |
| prozentualer Unterschied | 14,16 % | 7,15 % | 5,39 % |
| prozentualer Unterschied | 12,54 % | 6,72 % | 4,65 % |
| prozentualer Unterschied | 9,68 % | 5,78 % | 4,54 % |
| prozentualer Unterschied | 8,43 % | 5,57 % | 4,45 % |

In obenstehender Tabelle dargestellt, die Werte für Achsabstände und Materialien. Wie im Kapitel 2.2.3.3 Rohrdurchmesser, Höhenlage und Materialien erklärt wurde, traten hier

ähnliche Effekte auf. Der höchste Wert für die Kennliniensteigung trat bei einem UHPC Querschnitt, 3 cm Überdeckung und einem Achsabstand von 15 cm auf $KH_{\text{Unten}} = 5,018 \text{ W/m}^2\text{K}$, bei 20 cm war der Wert $KH_{\text{Unten}} = 4,748 \text{ W/m}^2\text{K}$, damit ergab sich ein Delta von $KH_{\text{Differenz}} = 0,270 \text{ W/m}^2\text{K}$ und **5,39 %**. Die kleinsten Werte waren bei Leichtbeton für 3 cm unterhalb der Querschnittoberkante mit $KH_{\text{Unten}} = 1,333 \text{ W/m}^2\text{K}$ für 15 cm Achsabstand und $KH_{\text{Unten}} = 1,221 \text{ W/m}^2\text{K}$ für 20 cm, was eine Differenz von $KH_{\text{Differenz}} = 0,112 \text{ W/m}^2\text{K}$ oder **8,43 %** ergab. In Tabelle 23 sind alle Differenzwerte in Prozent dargestellt, daraus wurde ersichtlich, dass die höchste Differenz der Achsabstände mit **14,16 %** bei einem Leichtbetonquerschnitt auftritt. Damit war der Effekt von Achsabständen mehr von Bedeutung als beispielsweise bei einem Normalbeton oder einem UHPC Querschnitt.

- *Die Ergebnisse innerhalb einer Materialengruppe entsprachen den üblichen Trends und bisher getätigten Aussagen. Bei jeder einzelnen Gruppe nahm die Differenz für die Kennliniensteigung ab. Damit war der Effekt bei geringeren Werten weniger stark ausgeprägt als bei großen Werten.*
- *Verglich man aber die verschiedenen Materialien untereinander mit den Achsabständen, galten die zuvor getätigte Aussage nicht mehr. Durch den Einfluss der Materialeigenschaften veränderte sich das Ergebnis. Obwohl die Simulation des Leichtbetons für beide Achsabstände und sämtlichen Höhenpositionen die geringsten Werte für KH ergaben, waren die Differenzen ebenso für alle Höhenpositionen die größten. Dieser Effekt war auf die Wärmeleitfähigkeit λ sowie die Rohdichte ρ zurückzuführen. Genauer ist dieser Effekt in Kapitel 2.2.6 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC nachzulesen.*

Im Vergleich zum Heizbetrieb traten beim Kühlen einer Decke höhere Werte für die Kennliniensteigung auf. Es errechneten sich für einen Querschnitt mit 15 cm Achsabstand der Rohre und 3 cm Überdeckung für UHPC $KH_{\text{Unten}} = 7,219 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei 20 cm ergibt sich $KH_{\text{Unten}} = 6,733 \text{ W/m}^2\text{K}$. Daraus resultierte eine Differenz von $KH_{\text{Differenz}} = 0,486 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent **6,73 %**. Die niedrigste Wärmeabgabeleistung war bei Leichtbeton und 3 cm unterhalb der Querschnittoberkante für 15 cm $KH_{\text{Unten}} = 1,455 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für 20 cm $KH_{\text{Unten}} = 1,318 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Differenz ergab sich zu $KH_{\text{Differenz}} = 0,137 \text{ W/m}^2\text{K}$, **9,43 %**. Den höchsten Differenzwert erhielt man ebenfalls für einen Leichtbetonquerschnitt bei 3 cm Deckung von **16,40 %**.

Zum Abschluss vom Vergleich des Achsabstandes mit anderen Parametern sollen weitere Möglichkeiten aufgezeigt werden. Für diese Arbeit wurden zwei Achsabstände definiert. Sie wurden vom beteiligten Heizungstechniker vorgeschlagen. Für weitere Untersuchungen könnte es von Interesse sein, wie sich unterschiedliche Änderungen der Achsabstände auf die Ergebnisse auswirken. In „Energiespeicherbeton“ heißt es dazu:

„Eine Analyse, [...], zeigt, dass die beiden Kurven [Kühl- und Heizkurve – Anm. d. Verf.] im Bereich der Achsabstände zwischen 5 cm und 50 cm mit sehr hoher Genauigkeit durch ein Polygon 2ten Grades, [...], approximiert werden können.“²⁵

²⁵ Krec 2015, 18

Mithilfe dieser Approximationskurve kann man erkennen, wie die Kennliniensteigung mit steigendem Rohrachsabstand sinkt.

- *Ein Mittel über alle Ergebnisse ergibt einen prozentualen Unterschied von **6,90 %**. Der Achsabstand wirkt sich stärker aus, umso höher die Werte für die Abgabeleistung im Allgemeinen ist.*

Es wurden weitere Untersuchungen des Achsabstandes vernachlässigt, weil sie für diese Arbeit ausreichend in anderer Literatur behandelt wurden.

2.2.5 Verschiedene Deckenstärken

Üblicherweise geben die leitenden Tragwerksplaner Dimensionen für Deckenstärken vor.

„So beeinflusst die Lage und die Geometrie der Rohre den Schubwiderstand. Das hat dazu geführt, dass Regeln für den Rohrdurchmesser und deren gegenseitige Abstände vorgegeben werden.“²⁶

Wenn man sich für ein Deckenheizsystem entscheidet, muss die Entscheidung früh während eines Projekts fallen. Damit einher gehen die Vorgaben für Deckenstärken und die sogenannten Sperrzonen, in denen eine erhöhte Schubbeanspruchung zu erwarten ist und keine Querschnittreduzierung zulässig ist.²⁷

Verschiedene Deckenstärken sind auf ihre thermischen Eigenheiten zu untersuchen, es liegt daher auf der Hand und ist von großem Interesse diesen Parameter extra zu betrachten. Für die Fertigteilmontage ändern sich lediglich die herzustellenden Plattendicken, der Ablauf bleibt derselbe.

Die Auswirkung verschiedener Deckenstärken wurde bis jetzt noch wenig in anderen Arbeiten untersucht, deswegen stellte dieser Punkt in gewissem Grade ein Novum für eine Parameterstudie zu diesem Thema dar.

²⁶ Friedrich 2014, 19

²⁷ Vgl. Friedrich 2014

2.2.5.1 Deckenstärke und Höhenlage

Tab. 24: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | | | x | | x |
| Unveränderlich | x | X | X | | x | |

Des Öfteren wurde während dieser Arbeit bereits ein Vergleich von diesen zwei Parametern durchgeführt. Meist diente das zur Verdeutlichung einzelner Ergebnisse. An dieser Stelle sollten die Unterschiede zwischen den Deckenstärken 22,25 und 30 cm verglichen und mit den Höhenpositionen im Querschnitt genauer ausgearbeitet werden. Andere Parameter spielten für diesen Vergleich vorerst keine Rolle mehr. Es wurde ein verputzter Normalbetonquerschnitt mit Achsabstand 15 cm und einem Rohrdurchmesser von 17 mm untersucht.

Tab. 25: Ergebnisdarstellung Deckenstärke und Höhenlage

| | 22er Decke | 25er Decke | 30er Decke |
|----------------------------------|---|---|---|
| | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ |
| 3cm Überdeckung Achsabstand | 4,579 | 4,577 | 4,574 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand | 4,401 | 4,398 | 4,395 |
| Mitte Achsabstand | 3,899 | 3,795 | 3,626 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand | 3,377 | 3,213 | <u>2,984</u> |
| Differenz in Prozent | | 0,03 % | 0,07 % |
| Differenz in Prozent | | 0,06 % | 0,06 % |
| Differenz in Prozent | | 2,76 % | 4,65 % |
| Differenz in Prozent | | 5,08 % | 7,69 % |

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse des Vergleichs für den Heizbetrieb dargestellt. Den höchsten Wert erhielt man für eine 22 cm starke Decke bei einer Deckung von 3 cm mit $KH_{\text{Unten}} = 4,579 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Werden die ersten beiden Zeilen für die Differenzwerte genauer betrachtet, war erkennbar, dass die Ergebnisse wenig voneinander abwichen, um genau zu sein um **0,7 %**. Wie auch schon in anderen Kapiteln gemacht, wurde ein Mittelwert für die

Kennliniensteigung gebildet. Damit ergab sich für 3 cm Deckung ein Wert $KH_{\text{Unten}} = 4,577 \text{ W/m}^2\text{K}$, für 5 cm lag er bei $KH_{\text{Unten}} = 4,398 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Positionen weiter oben im Querschnitt wichen deutlich mehr voneinander ab. Die geringste Kennliniensteigung lag bei einer 30 cm Decke und der größten Betondeckung bei $KH_{\text{Unten}} = 2,984 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Prozentwerte bezogen sich dabei auf den Vergleich der nächst größeren Deckenstärken.

- Der Unterschied von 7,56 % errechnete sich aus dem Vergleich von 3 cm unterhalb der Oberkante und den dazugehörigen Werten einer 25 und 30 cm Decke. Der Vergleich von 22 und 30 cm wurde in Tabelle 25 nicht dargestellt.

Auffällig war, dass die Differenz bei steigender Deckenhöhe zunahm, damit war ein neuer Trend erkennbar.

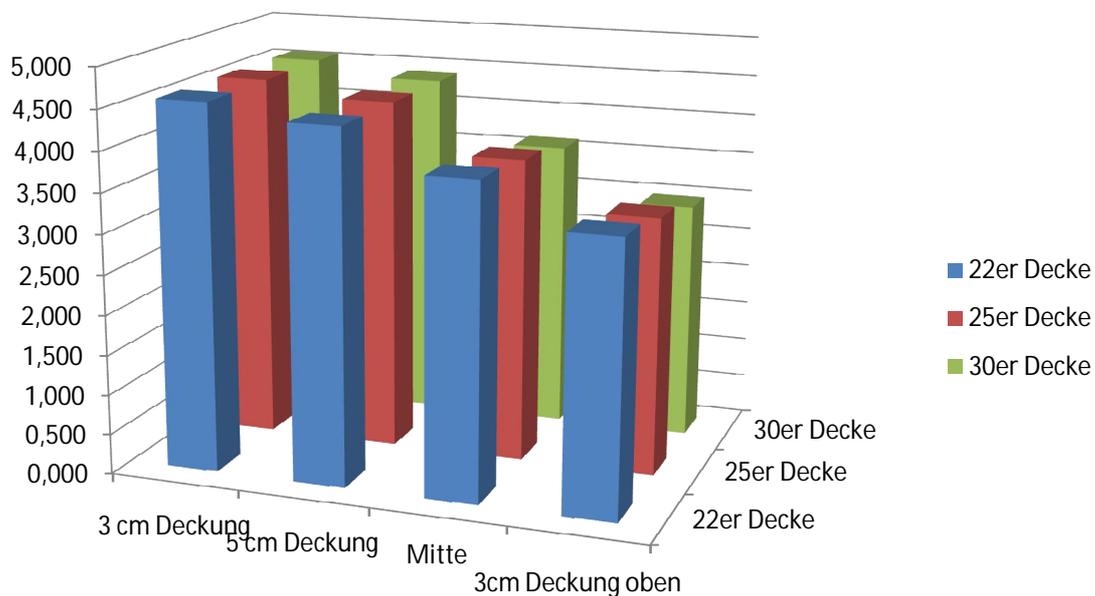


Abb. 15: Auswirkung von Deckenstärke und Höhenlage

Mit Grafik 15 werden die Ergebnisse aus Tabelle 25 übersichtlich dargestellt. Man kann erkennen, dass die Ergebnisse für 3 und 5 cm Deckung auf ähnlichem Niveau liegen. Für die anderen beiden galt, dass bei zunehmender Deckenstärke die Werte für die Kennliniensteigung abnahmen.

- Für den Vergleich der Deckenstärken mit der Höhenlage waren die üblichen Trends erkennbar. Eine geringe Deckung veränderte die Leistungsabgabe einer Deckenheizung trotz verschiedener Deckenstärken kaum. Damit kann beim Vordimensionieren der Deckenheizung und Statik auf eine weitere thermische Untersuchung verzichtet werden.

- Für größere Überdeckungen änderte sich die Leistung bei den gewählten Parametern um bis 7,69 %. Daher gilt für die Auslegung einer Deckenheizung, dass man sich je nach Deckenstärke bei der Positionierung weiter oben im Querschnitt, des Verlusts um rund 8 % bewusst sein sollte.

Im Allgemeinen konnte man den Effekt auf einen geometrischen Zusammenhang zurückführen. Am besten erklärt ist das durch ein einfaches Beispiel:

- Bei einer 22 cm Decke lag die am höchsten untersuchte Position 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante. Setzte man den Nullpunkt eines Koordinatensystems genau an die Unterkante des betrachteten Querschnitts, ergab sich eine vertikale Position von 19 cm. Für einen Betonquerschnitt mit der Höhe 30 cm war die Position bei 27 cm.
- Einen Mittelwert über die Deckenstärken zu bilden war nicht günstig, da bei geringer Deckung annähernd keine Veränderungen auftraten, hingegen bei hohen Decken der Effekt immer deutlicher wurde.

Durch diesen einfachen geometrischen Zusammenhang ließen sich die Ergebnisse einfach begründen. Der Grund weshalb die Positionen so gewählt wurden, war mit Überlegungen der Durchführbarkeit und des Interesses einzelner Positionen begründet. Genauer wird dieses Thema in Kapitel 2.2.7 Höhenlage diskutiert. Interessant bleibt aber die Frage, ob bei einer vertikalen Position von 19 cm, aber bei einem 30 cm hohen Stahlbetonquerschnitt, ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind.

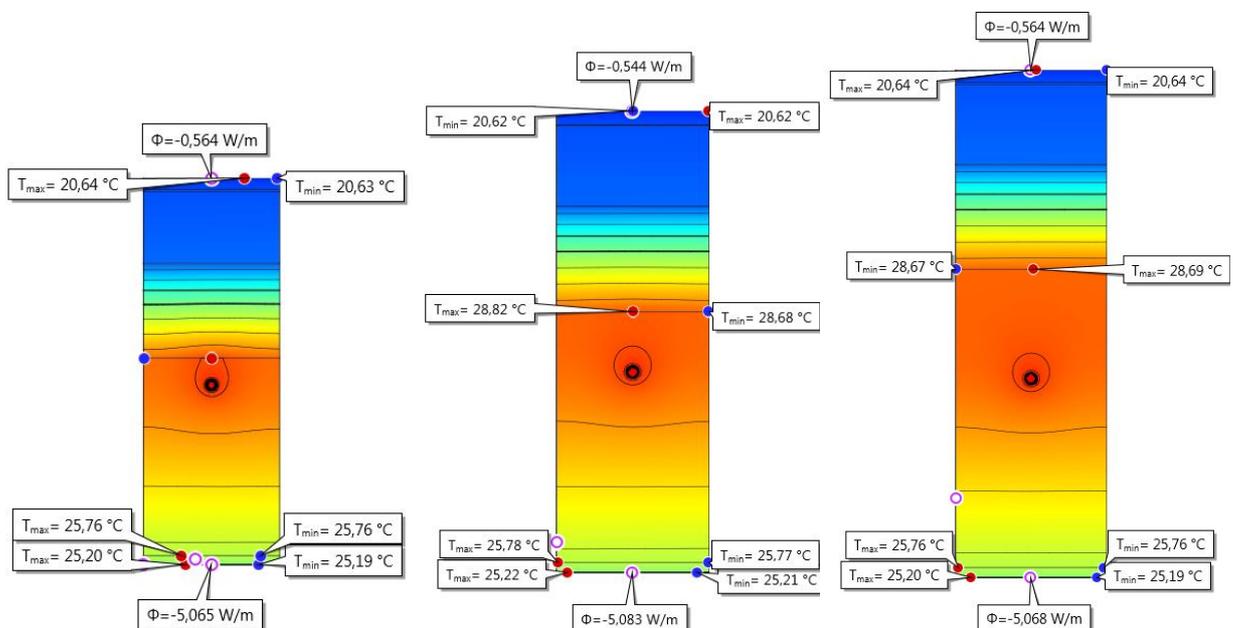


Abb. 16: Darstellung unterschiedlicher Deckenstärken mit konstante Überdeckung 19 cm

Tab. 26: Vergleich veränderte Höhenlage – Überdeckung 19 cm

| | $T_{\min,1}$ [°C] | $T_{\max,1}$ [°C] | $T_{\min,2}$ [°C] | $T_{\max,2}$ [°C] | $T_{\min,3}$ [°C] | $T_{\max,3}$ [°C] | $T_{\min,4}$ [°C] | $T_{\max,4}$ [°C] | Wärmestrom Unten [W/m] | Wärmestrom Oben [W/m] |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|
| 22er Decke | 25,19 | 25,20 | 25,76 | 25,76 | 28,55 | 29,06 | 20,63 | 20,64 | 5,065 | 0,561 |
| 25er Decke | 25,21 | 25,22 | 25,77 | 25,78 | 28,68 | 28,82 | 20,62 | 20,62 | 5,083 | 0,544 |
| 30er Decke | 25,19 | 25,20 | 25,76 | 25,76 | 28,67 | 28,69 | 20,64 | 20,64 | 5,068 | 0,564 |

Mit Tabelle 26 wird gezeigt, dass sich bei identer Positionierung im Querschnitt nahezu keine Änderungen ergaben. Die Messpunkte waren dieselben wie weiter vorne in dieser Arbeit erklärt. Ein etwas größerer Unterschied ergab sich lediglich an der Stahlbetonoberseite T_3 . Diese Abweichung war so zu erwarten, da sich aufgrund der Geometriebedingungen andere Werte einstellen mussten.

Weitere Untersuchungen zum Thema Deckenstärke waren für diese Arbeit nicht mehr notwendig, denn es wurde eindeutig bewiesen, welche Effekte sich für die einzelnen Deckenstärken einstellten. Durch eine größere Anzahl an verschiedenen Parameter würde das Ergebnis zwar verfeinert, in seiner Aussage aber nicht verändert werden.

2.2.6 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC

Ein weiterer Themenbereich bei den stationären Untersuchungen stellte das Thema Materialien dar. Es wurden die Materialien Leichtbeton, Normalbeton und UHPC definiert. Für ein Fertigteilwerk sind diese Materialien zwar von geringerer Bedeutung, die Ergebnisse haben aber gezeigt, dass sie interessante Erkenntnisse zum gesamten Themenbereich beisteuern.

Tab. 27: Verwendete Materialien und Kennwerte

| | Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] | Rohdichte ρ [kg/m ³] | Spez. Wärmekapazität c_p [J/kgK] | Quelle |
|-------------|--|--|--|---|
| Leichtbeton | 0,4 | 1,500 | 1000 | ÖNORM EN 12524; ÖNORM EN ISO 10456 ÖNORM EN 206 ÖNORM B-4710-2 |
| Normalbeton | 2,1* | 1500 | 1000 | ÖNORM EN 12524; ÖNORM EN ISO 10456 ÖNORM EN 206 |
| UHPC | 6,0 | 2790 | 850 | Daten FA Durcrete Produkt Nanodur Beton E80 |

Die in Tabelle 27 dargestellten Werte stellen die Grundlage für die Berechnung dar. Sowohl die Zahlen für Leichtbeton als auch Normalbeton wurden aus Normen entnommen. Der UHPC wurde vom Hersteller Durcrete angegeben. Die Wärmeleitfähigkeit des Normalbetons wurde für diese Arbeit mit $\lambda_{\text{Normalbeton}} = 2,1 \text{ W/mK}$ angesetzt. Dieser Wert wurde von einem Hersteller für Beton, der für die Firma ABEK produziert wird, ermittelt.²⁸²⁹³⁰³¹

2.2.6.1 Materialien zu anderen Parametern

Wie weiter oben erwähnt, werden die bereits erläuterten Parameter nicht noch einmal dargestellt. Nichts desto weniger soll an dieser Stelle die Auswirkung des Materials auf das Gesamtsystem besprochen werden.

Wie aus den einzelnen Parameterstudien hervorging, hatten die Veränderungen des Materials und die damit einhergehenden thermischen Eigenschaften große Effekte für das Gesamtsystem. Um repräsentative Werte zu erhalten, wurden die Materialien öfter mit der

²⁸ Vgl. ÖNORM EN 206: 2017 05 01

²⁹ Vgl. ÖNORM EN ISO 10456: 2010 02 15

³⁰ Vgl. ÖNORM B 4710-2: 2008 09 01

³¹ Vgl. Durcrete GmbH 2017

Höhenlage und einem zusätzlichen Parameter verglichen. Wenn man nur eine Höhenlage betrachtete und alleine die Materialien veränderte, stellte sich folgende Situation ein.

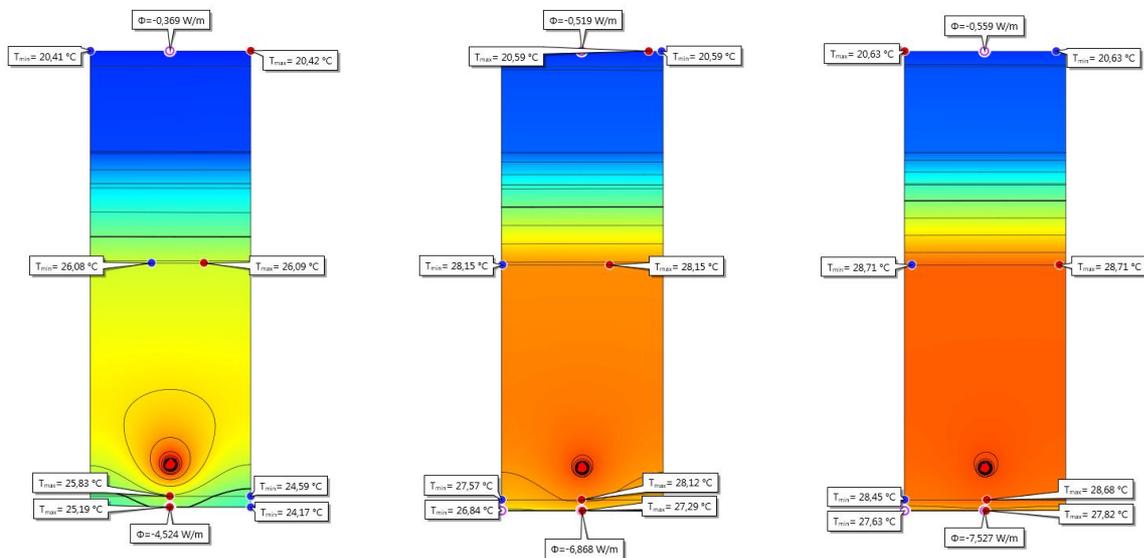


Abb. 17: Temperaturentwicklung von links nach rechts: Leichtbeton, Normalbeton und UHPC

Abbildung 17 stellt zum ersten Mal alle 3 Materialien gegenüber. Sie dient der Visualisierung der Ergebnisse. Man konnte hier die Wärmeentwicklung innerhalb des Querschnitts erkennen. Leichtbeton mit der niedrigsten Wärmeleitfähigkeit hinderte die durch das Heizmedium eingespeiste Energie am effektivsten durch den Beton zu gelangen. Bei Normalbeton und UHPC war qualitativ kein großer Unterschied auszumachen, lediglich die Isothermen glichen nicht einander, die Intensität der Farben war leicht unterschiedlich.

Verschiedene Materialien hatten eine große Auswirkung auf das thermische Verhalten des Gesamtsystems. Bei allen bisherigen Vergleichen und Untersuchungen war der Effekt groß und darf bei der Auslegung nicht vernachlässigt werden. Für die Fertigteilbauweise stellen die Materialien Leichtbeton und UHPC nicht realisierbare Varianten dar. Weniger weil technische Lösungen nicht möglich wären, sondern vielmehr aus ökonomischer Sicht. Bereits angesprochen wurden Vorteile hinsichtlich des hohen Vorfertigungsgrades. Dadurch werden wertvolle Ressourcen wie Zeit und Personal im Vergleich zu Ortbeton Lösungen eingespart. Damit verbunden sind aber Standard – Lösungen hinsichtlich der Betonqualität und Güte. Alleine daraus wird ersichtlich, dass für ein System in Fertigteilbauweise diese Überlegungen nicht sinnvoll erscheinen. Überdies gilt, dass Leichtbeton - und UHPC – Decken eine Seltenheit in der Baubranche darstellen. Der Wert dieses Parameters kann dennoch von großem Interesse sein. Für Anwendungen mit veränderten Werten für Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und spezifischer Wärmekapazität (Anmerkung: bei stationärer Betrachtung vernachlässigt) sind Ergebnisse vorhanden an denen man sich orientieren kann.

- Bei Vergrößerung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte eine konstantere Temperaturverteilung innerhalb des Querschnitts. Kommen solche Systeme zur Anwendung, kann eine optimierte Auslegung des Heizsystems Energie und Geld einsparen. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit hatte einen großen Effekt auf das System. Dies zeigten auch die Werte aus den Ergebnisdarstellungen, die Änderung des Normalbetons zu UHPC betrug im Maximum 23,25 % wie in Tabelle 27 weiter unten dargestellt.
- Ein geringerer Wert für die Wärmeleitfähigkeit, konnte das System sogar noch stärker verändern. Für ein konkretes Beispiel wurde gezeigt, dass die Leistung der Deckenheizung bei einem Achsabstand von 15 cm einen Durchmesser von 17 mm und einer verputzten 22 cm Normalbetondecke bei der höchsten untersuchten Deckung um 61,71 % abnahm. Wird dies bei der Planung einer Deckenheizung vernachlässigt können grobe Fehler bei der Auslegung passieren.
- Ein Mittelwert aller Ergebnisse war nur sinnvoll, wenn die einzelnen Materialien untereinander verglichen wurden. Der prozentuale Unterschied zwischen Leichtbeton und Normalbeton beträgt **43,31 %**. Für Normalbeton und UHPC errechnete sich ein Unterschied von **12,88 %** und zwischen Leichtbeton und UHPC ergab sich **50,02 %**.

Tab. 28: Ergebnisdarstellung Materialien und Höhenlage

| | Leichtbeton | Normalbeton | UHPC |
|----------------------------------|---|---|---|
| | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ |
| 3cm Überdeckung Achsabstand | 3,009 | 4,579 | 5,018 |
| 5cm Überdeckung Achsabstand | 2,608 | 4,401 | 4,913 |
| Mitte Achsabstand | 1,854 | 3,899 | 4,683 |
| 3cm Überdeckung oben Achsabstand | <u>1,333</u> | 3,377 | 4,399 |
| Differenz zu Normalbeton | 34,29 % | | 8,76 % |
| Differenz zu Normalbeton | 40,74 % | | 10,43 % |
| Differenz zu Normalbeton | 52,45 % | | 16,73 % |
| Differenz zu Normalbeton | 60,51 % | | 23,25 % |

Der Kühlbetrieb brachte zusätzliche Erkenntnisse zu diesem Themengebiet. Die Ergebnisse waren wieder deutlich höher als bei einer Heizung. Auffällig war, dass die Differenzwerte eine ähnliche Größenordnung aufwiesen wie das bei der Heizung der Fall war. Im Mittel

betrug der Unterschied bei Leicht- und Normalbeton zum Heizbetrieb **6,80 %**, für Normalbeton und UHPC betrug der Unterschied **4,41 %**.

2.2.7 Höhenlage

Der letzte zu untersuchende Parameter war die Höhenlage. Ähnlich wie im Kapitel zuvor wurden auch hier alle Effekte bereits einmal miteinander verglichen. Nichts desto weniger, sollte dieser Punkt noch einmal besprochen werden, da er einen besonderen Aspekt in dieser Arbeit darstellte. Bereits zu Beginn wurden Vorschläge für das Blue Living Projekt die Heizregister weiter unten im Querschnitt zu positionieren stets kritisch betrachtet. Für die Fertigteilbauweise waren die Ergebnisse dieser Position aber von höchstem Interesse. Bei Standard Fertigteillementen mit einer Dicke zwischen 5,5 cm und 6,5 cm wurde schnell deutlich, dass wenig Platz übrig bleibt, wenn vorgeschriebene Betondeckung und Platz für die untere Bewehrungslage, Querbewehrung sowie Gitter- und Schubträger vorhanden sein sollten. Die Höhenlage bezog sich immer auf den Schwerpunkt des Heizrohres. Dadurch wurden die verschiedenen Positionen wie folgt gewählt:³²³³

- *3 cm Deckung – Damit ist die Position 3 cm über der Stahlbetonunterkante gemeint. Diese Position ist für das Projekt von großer Bedeutung, da dadurch eine Position simuliert wird, bei der man die Heizrohre direkt an die untere Bewehrung anbinden kann und dadurch bereits im Werk einlegen kann.*
- *5 cm Deckung – Diese Position ist deswegen so gewählt worden, damit der Vergleich dieser Arbeit mit bereits bestehenden leichter funktioniert. Die viel wichtigere Entscheidung für diese Position ist aber die Überlegung, dass die Heizregister auf die Platte gelegt werden könnten, was in ausreichend exakter Annäherung dieser Position entspricht.*
- *Mitte des Querschnitts – Die nächste gewählte Option ist die Querschnittmitte. Dabei stehen hier weniger baupraktische Maßnahmen als statische Überlegungen im Vordergrund. Durch die Position in der Mitte, würde man die Rohre im Fall einer ideal gelagerten Platte genau in den Biegespannungsnullpunkt legen. Dadurch verliert die Decke in Bezug auf seinen Biegegegenstand kaum an Tragfähigkeit. Für die Schubtragfähigkeit gilt, dass für Platten ohne erforderliche Zusatz - Schubbewehrung, ein Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der Rohrdurchmesser zu statischer Nutzhöhe vorgesehen ist.³⁴*

³² Vgl. Bergmeister et al. 2016

³³ Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1: 2015 02 15

³⁴ Vgl. Furche und Bauermeister 2015

- 3 cm Deckung von oben – Die letzte Variante stellt zugleich die höchste vertikale Position dar. Sie befindet sich unmittelbar unter der oberen Bewehrungslage. Sie ist deswegen von großem Interesse, weil sie die Kontraposition zur geringsten Deckung ist. Man kann die Heizregister entweder auf Abstandshalter oder Gitterträger anbinden, und danach die obere Bewehrungslage darüber legen.

2.2.7.1 Höhenlage zu anderen Parametern

Dieses Kapitel widmete sich ausschließlich der Höhenlage, denn die anderen Vergleiche zu diesem Parameter wurden bereits durchgeführt. Repräsentativ wurde für die Untersuchung eine verputzte Normalbetonuntersicht gewählt. Der Rohrregisterabstand betrug 15 cm mit \emptyset von 17 mm, die Deckenstärke ist 22 cm.

Tab. 29: Ergebnisdarstellung Höhenlage

| | $KH_{\text{Unten}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Oben}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Gesamt}} [W/m^2K]$ |
|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 3cm Überdeckung | 4,579 | <u>0,346</u> | 4,925 |
| 5cm Überdeckung | 4,401 | 0,348 | 4,749 |
| Mitte | 3,899 | 0,361 | 4,261 |
| 3 cm Überdeckung Oben | 3,377 | 0,374 | 3,751 |
| Differenz 3-5 cm | 3,89 % | 0,57 % | 3,57 % |
| Differenz 5 - Mitte | 11,39 % | 3,69 % | 10,28 % |
| Differenz Mitte - 3 cm oben | 13,40 % | 3,39 % | 11,97 % |
| Differenz 3 unten - 3 oben | 35,60 % | 8,09 % | 31,30 % |

Tabelle 29 zeigt rein den Vergleich der Höhenlage mit sich selbst. Den höchsten Wert für die Kennliniensteigerung erhielt man bei 3 cm Deckung mit $KH_{\text{Unten}} = 4,579 W/m^2K$. Der niedrigste Wert war bei der größten Überdeckung 3 cm unterhalb des Betonquerschnitts, mit $KH_{\text{Unten}} = 3,377 W/m^2K$. Daraus errechnete sich eine Differenz von $KH_{\text{Differenz}} = 1,202 W/m^2K$, in Prozent **35,60 %**.

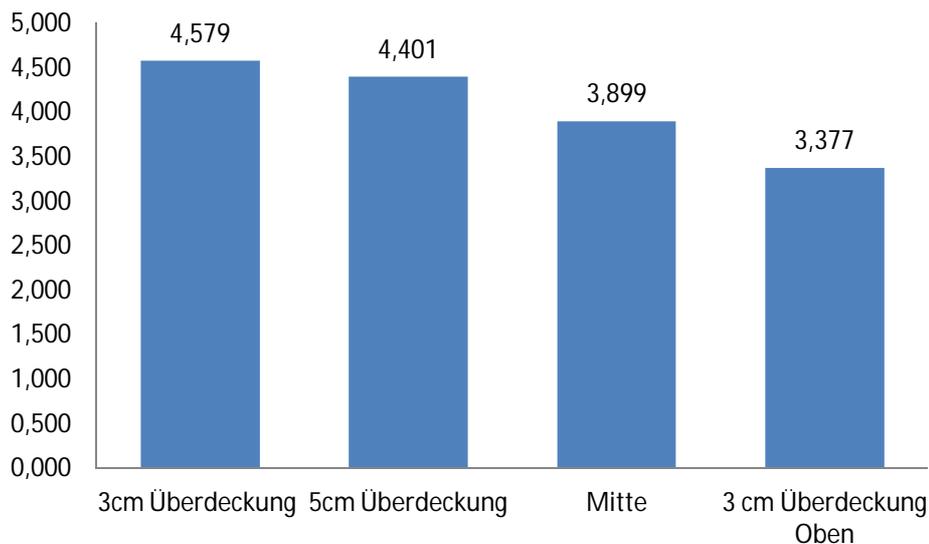


Abb. 18: Auswirkung von verschiedenen Höhenpositionen

Mit Abbildung 18 werden die Ergebnisse grafisch dargestellt. Es war zu erkennen, dass die Wärmeabgabeleistung mit steigender Betondeckung abnahm.

- *Wenn für die Auslegung einer Deckenheizung die Frage auftritt, ob man die Register in die Platte einbauen, oder auf die Platte legen sollte, kann man aus thermischer Sicht auf eine genauere Betrachtung verzichten. Der Effekt kann, ohne grobe Fehler zu machen, vernachlässigt werden.*
- *Steht eine Entscheidung im Raum, ob die Rohre oben oder unten im Querschnitt eingebracht werden sollten, darf dieser Effekt auf keinen Fall vernachlässigt werden. Mit 35,60 % war ein großer Leistungsunterschied vorhanden. Die Planer dürfen diese Besonderheit nicht vergessen.*
- *Ein arithmetisches Mittel über die gesamten Positionen zu machen, war nicht von Interesse, da bei geringer Deckung kaum Unterschiede auszumachen waren, hingegen bei großer Betondeckung hohe prozentuale Unterschiede auszumachen waren. Deswegen wurde hier der Unterschied der Position von der niedrigsten Deckung zu allen anderen Positionen verglichen. Der Mittelwert für die Differenz der Deckung 3 cm zu 5 cm ergibt einen prozentualen Wert von **4,77 %**, im Schnitt ergab sich eine Verringerung der Kennliniensteigung 3 cm zu der Position in der Mitte von **19,11 %** und der Vergleich von 3 cm unten zu 3 cm oben ergab eine Differenz von **31,83 %**.*

Um die Kühlung zu vergleichen, wurden auch hier für die Höhenlage die gleichen Parameter verwendet und lediglich die für die Norminnentemperatur, Wärmeübergangswiderstandskoeffizienten und Heizmediumtemperatur verändert.^{35 36} Die

³⁵ Vgl. ÖNORM EN 1264-5: 2009 01 01

³⁶ Vgl. ÖNORM EN ISO 13790: 2008 10 01

Ergebnisse waren ähnlich dem des Heizbetriebs. Den höchsten Wert für die Kennliniensteigung erhielt man bei einer Deckung von 3 cm mit $KH_{\text{Unten}} = 6,402 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für die höchste Deckung errechnete sich ein Wert von $KH_{\text{Unten}} = 4,279 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit erhielt man die Differenz $KH_{\text{Differenz}} = 2,123 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent **49,60 %**. Es bestätigte sich auch der Trend, dass bei höheren Werten für die Kennliniensteigung die Effekte deutlicher zum Vorschein kommen.

Dieser Parameter hatte so große Bedeutung, weil man genau wissen wollte, ob eine Positionierung der Heizregister innerhalb oder auf der Fertigteilplatte thermisch Sinn macht. Nach genauer Studie der Ergebnisse der stationären Simulationen konnte ganz klar gesagt werden, dass eine Positionierung weit unten im Querschnitt möglich ist. Es war nicht nur aus thermischen Überlegungen möglich sondern hatte sogar positive Auswirkungen. Für alle Betrachtungen galt, dass die Leistungsabgabe einer Deckenheizung bei wenig Betondeckung die höchste war. Bei dem gegebenen Bauteilaufbau und dem gewünschten Effekt, dass der Wärmestrom zum Raum hin nach unten geht, war es offensichtlich, dass umso näher die Wärmequelle am gewünschten Ort ist, umso höher die gemessenen Temperaturen dort ausfallen würden. Für die Höhenlage mussten keine weiteren Positionen untersucht werden, da für alle Möglichkeiten zumindest eine Variante in dieser Arbeit vorliegen. Später in dieser Arbeit wird die Auswirkung von instationären Simulationen diskutiert, dadurch werden alle Möglichkeiten für die Höhenpositionen untersucht.

2.3 Conclusio

Um die zuvor erläuterten Ergebnisse übersichtlich darzustellen, wurden Diagramme und Tabellen angefertigt, anhand deren man mehrere Effekte gleichzeitig ablesen kann. Diese sollten veranschaulichen, wo größere und wo kleinere Unterschiede auftraten. Wie bei der Ergebnisdarstellung von vorhin, wurden gewisse Parameter vorgegeben, die sich nicht änderten, damit die verschiedenen Versuchsaufbauten miteinander vergleichbar waren. Dabei wurden im Wesentlichen zwei Grafiken erstellt, anhand deren man die 6 Parameter ansehnlich miteinander vergleichen konnte.

2.3.1 Ergebnis Darstellung von, Höhenlage, Achsabstand, Putz und Deckenstärke

Tab. 30: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | x | | x | x | | x |
| Unveränderlich | | x | | | x | |

Der erste Block bestand darin die Höhenlage, den Achsabstand, eine verputzte bzw. unverputzte Stahlbetonuntersicht und Deckenstärke miteinander zu vergleichen. Damit wurden bereits 4 der 6 verschiedenen Parameter dargestellt.

Tab. 31: Ergebnisse Heizbetrieb-Leichtbeton für 22cm Deckenstärke und Ø 17 mm

| | $KH_{\text{Unten}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Oben}} [W/m^2K]$ | $KH_{\text{Gesamt}} [W/m^2K]$ | spez. Wärmeabgabeleistung q_{Unten} |
|------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---|
| 15A 3Ü | 3,009 | <u>0,245</u> | 3,253 | 24,07 |
| 15A 3Ü OP | 3,150 | 0,283 | 3,433 | 25,20 |
| 20A 3Ü | 2,583 | 0,293 | 2,876 | 20,66 |
| 20A 3Ü OP | 2,673 | 0,283 | 2,956 | 21,38 |
| 15A 5Ü | 2,608 | 0,281 | 2,889 | 20,86 |
| 15A 5Ü OP | 2,725 | 0,282 | 3,007 | 21,80 |
| 20A 5Ü | 2,281 | 0,323 | 2,596 | 18,25 |
| 20A 5Ü OP | 2,367 | 0,315 | 2,682 | 18,94 |
| 15A 11Ü | 1,854 | 0,319 | 2,173 | 14,83 |
| 15A 11Ü OP | 1,912 | 0,319 | 2,231 | 15,30 |
| 20A 11Ü | 1,675 | 0,365 | 2,040 | 13,40 |
| 20A 11Ü OP | 1,724 | 0,339 | 2,063 | 13,79 |
| 15A 19Ü | 1,333 | 0,359 | 1,693 | 10,67 |
| 15A 19Ü OP | 1,369 | 0,357 | 1,726 | 10,95 |
| 20A 19Ü | 1,221 | 0,328 | 1,549 | 9,77 |
| 20A 19Ü OP | 1,247 | 0,435 | 1,682 | 9,97 |

Aus Tabelle 31 werden noch einmal die Ergebnisse aus der Parameterstudie zusammengefasst und mit der Variante „Leichtbeton“ bestätigt. Der Vergleich der einzelnen Trendlinien aus den Kapiteln zuvor setzte sich auch mit Leichtbeton fort. Dasselbe galt auch für die Variante mit UHPC und Normalbeton.

Den höchsten Wert für die Kennliniensteigung erhielt man bei einem Rohrachsabstand von 15cm einer Höhenlage von 3cm über einer nicht verputzten Deckenuntersicht $KH_{\text{Unten}} = 3,150 W/m^2K$. Der niedrigste Wert $KH_{\text{Unten}} = 1,221 W/m^2K$ errechnete sich bei einem Achsabstand von 20 cm einer Höhenlage von 19 cm über einer verputzten Deckenuntersicht. Das ergab ein $KH_{\text{Delta}} = 1,929 W/m^2K$. Die Leistung des niedrigsten Wertes entsprach in diesem Fall **38,76 %** gegenüber der Variante mit dem Höchsten oder einem Leistungsabfall

von **61,24 %**. Wurden in den vorhergegangenen Kapiteln einzelne Parameter verglichen, so wurden hier mehrere Ergebnisse simultan betrachtet. Durch das gemeinsame Wirken von Höhenlage, Achsabstand der Rohrregister und der Betrachtung einer verputzten bzw. einer unverputzten Untersicht errechnete sich dieses Ergebnis. Innerhalb dieser 3 Parametern hatte der **Achsabstand** einen Effekt mit **8,57 %**, die Position des Höhenregisters wirkte sich von **3 cm Überdeckung von Deckenuntersicht bis 3 cm unterhalb des Stahlbetonquerschnitts** mit **49,56 %** aus, und der Vergleich der Variante **mit und ohne Putz** ergab einen Unterschied von **2,38 %**. Das Maximum der Kennliniensteigung $KH_{\text{Unten}} = 3,150 \text{ W/m}^2\text{K}$ wurde als 100% - Marke festgesetzt. Für die einzelnen Parameter wurde das arithmetische Mittel verwendet.

Nach derselben Methode wurden auch Werte für einen 25 cm bzw. 30 cm hohen Stahlbetonquerschnitt berechnet. Daraus ist die Grafik in Abb. 19 entstanden.

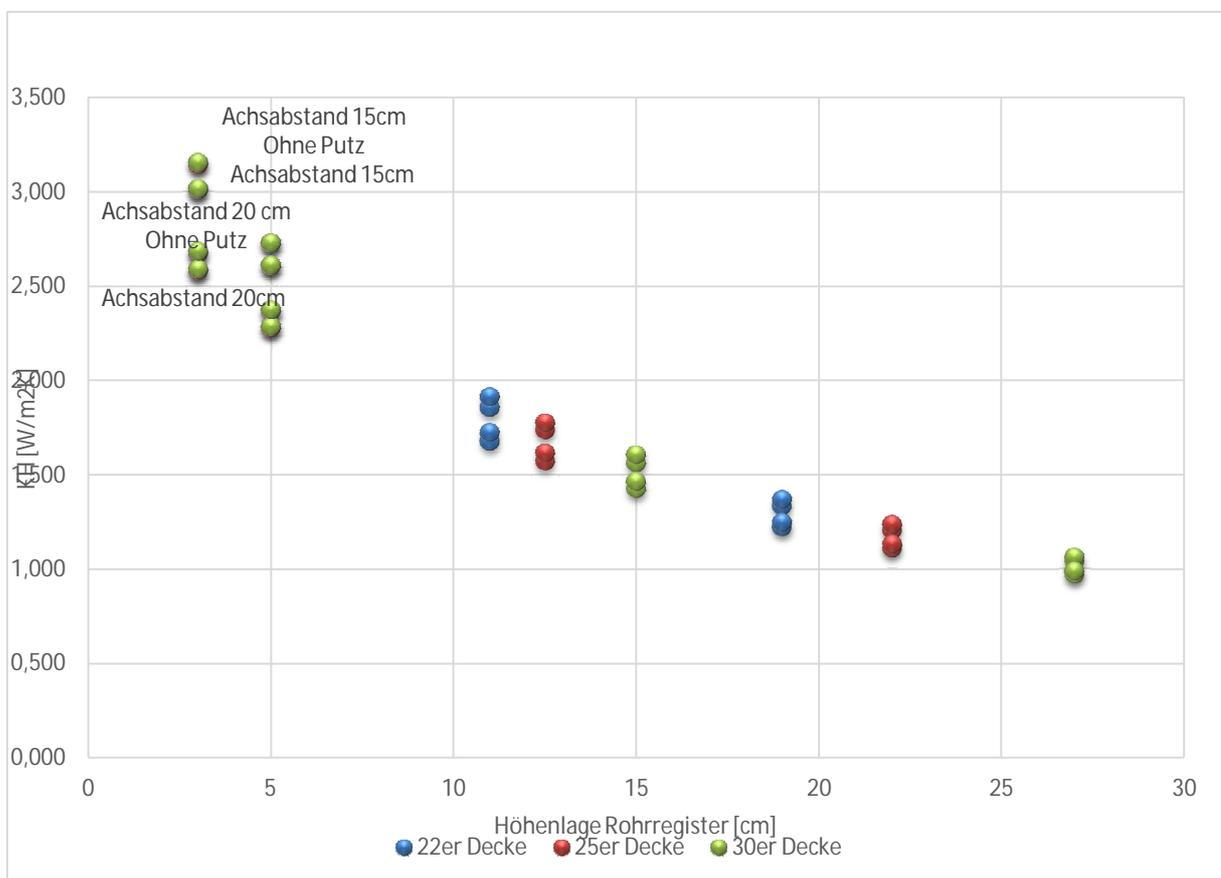


Abb. 19: Ergebnisse Heizbetrieb-Leichtbeton und $\varnothing 17\text{mm}$

Abbildung 19 veranschaulicht dieses Ergebnis grafisch. Zusätzlich zu den bereits erklärten Phänomenen, war der Effekt verschiedener Deckenstärken auf die Leistung erkennbar. Gleich wie in Kapitel 2.2.5 Verschiedenen Deckenstärken bezieht sich die Höhenlage auf die Deckenstärke wie bereits weiter oben beschrieben auf die Höhenlage.

Aus dieser Grafik sind einige Besonderheiten abzulesen. Erstens war es offensichtlich, dass die Leistung bei einer Deckenstärke und einer Höhenlage von 3 cm und 5 cm über der Stahlbetonunterkante kaum Abweichungen zueinander aufweisen. Werden die Rohre aber in der Mitte des Querschnitts angebracht, war ein Unterschied zu erkennen.

- Für einen **22 cm** hohen verputzten **Stahlbetonquerschnitt** bei einem Achsabstand von 15 cm mit einer **Höhenlage** der Rohrregister von **3 cm** erhielt man einen Wert für die Kennliniensteigung von **3,009 W/m²K**. Veränderte man nur den Stahlbeton Querschnitt, so war der Wert für **25 cm 3,012 W/m²K** und für **30 cm 3,015 W/m²K**. Damit war ein maximaler Unterschied von **0,20 %** gegeben. Bei einer **Überdeckung** von **5 cm** war der maximale Unterschied **0,11%**.
- Wenn nun wieder dieselben Parameter mit dem Unterschied die Höhenlage zu verändern wie beim eben genannten Beispiel weiterverwendet, stieg der Unterschied auf **15,86 %** für eine untersuchte Höhenlage in der **Mitte** zwischen den verschiedenen Deckenstärken. Bei einer Lage **3 cm unterhalb** der Stahlbetonoberkante betrug der Unterschied **21,66 %**.
- Wie weiter oben im Kapitel 2.1 Beschreibung des Konstruktionsaufbaus bereits erklärt, wurde die Höhenlage bewusst gewählt. Würde man Trendlinien über die Ergebnispunkte legen, ist der Geometrie geschuldet zu erwarten, dass sich die Ergebnisse für die Mitte des Querschnitts und 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante deutlich voneinander unterscheiden.

Des Weiteren hatte der Achsabstand bei einer Lage nahe der Stahlbetonunterkante einen deutlichen Effekt auf die Kennliniensteigung. Ähnlich dem Achsabstand wies auch der Parameter Putz diese Eigenschaften auf. Was beide gleichermaßen betraf, war, dass die Ergebnisse konvergierten und der anfangs deutliche Effekt stark abnahm. In Zahlen bedeutete das:

- Der **Achsabstand von 15 cm** hatte bei einer Überdeckung von 3 cm eine gemittelte Leistung von **3,080 W/m²K**. Wenn der Achsabstand bei ansonsten gleichbleibenden Parametern auf **20 cm** erhöht wurde, so errechnete sich das Mittel zu **2,628 W/m²K**. Dies entsprach einem **Delta von 0,452 W/m²K** und einem Unterschied in Prozent von **14,68 %**.
- Vergleicht man genau dasselbe bei einer Höhenlage von 3cm unter der Stahlbetonoberkante, erhielt man die gemittelten Werte **1,351 W/m²K** für 15 cm Achsabstand und **1,234 W/m²K** für 20 cm. Der Unterschied betrug hier **0,117 W/m²K** und wiederum in Prozent **8,66 %**.
- Bei einer **unverputzten Untersicht** und einer Überdeckung von 3 cm betrug die Kennliniensteigung **2,915 W/m²K** und für die **verputzte Variante 2,796 W/m²K**. Hier wurde das Mittel aus 15 cm und 20 cm Achsabstand verwendet. Rechnerisch entsprach das Delta einem Wert von **0,119 W/m²K** oder in Prozent **4,08 %**.
- 3 cm unter der Stahlbetonoberkante erhielt man die Werte **1,308 W/m²K** und **1,277 W/m²K**. Das Delta betrug hier **0,031 W/m²K** und in Prozent **2,37 %**.

- Die weiter oben postulierte These wurde hier eindeutig bewiesen. Man konnte erkennen, dass der Effekt bei beiden Parametern etwas weniger als um die Hälfte abnahm. Sollte man beim Einbauen zu einer Variante tendieren, die Rohrregister im Stahlbetonquerschnitt höher als die Hälfte einzubauen, war dieser Effekt klein und konnte beim Putz bewusst vernachlässigt werden, der Achsabstand hatte dennoch 8,66 % Einfluss. Hingegen bei einer Variante, bei welcher Rohrregister nahe der Unterkante des Stahlbetonquerschnitts lagen, sollte man sich bei der Auslegung einer Heizung dessen bewusst sein, dass die Leistung um bis zu 14,68 % im Fall der Achsabstände und 4,08 % mit verputzten bzw. unverputzten Oberflächen variierte.

2.3.2 Ergebnisdarstellung von Material, Höhenlage und Rohrdurchmesser

Tab. 32: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|----------------|------|---|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Variabel | | x | | | x | x |
| Unveränderlich | x | | X | x | | |

Der zweite große Übersichtsblock beschäftigte sich mit den Auswirkungen von den verschiedenen Materialien, was passierte wenn man den Durchmesser des Kühl-/Heizrohrs und die Höhenlage des Rohrregisters veränderte.

Tab. 33: Heizbetrieb mit verputztem Querschnitt, Achsabstand 15 cm und Ø 17 mm

| | KH_{Unten} [W/m ² K] | KH_{Oben} [W/m ² K] | KH_{Gesamt} [W/m ² K] | spez. Wärmeabgabeleistung q_{Unten} [W/m ²] |
|--|---|--|--|---|
| 22er Decke Leichtbeton | 3,009 | <u>0,245</u> | 3,253 | 24,07 |
| 25er Decke Leichtbeton | 3,012 | 0,251 | 3,263 | 24,10 |
| 30er Decke Leichtbeton | 3,015 | 0,245 | 3,260 | 24,12 |
| 22er Decke Normalbeton | 4,579 | 0,346 | 4,925 | 36,63 |
| 25er Decke Normalbeton | 4,577 | 0,345 | 4,923 | 36,62 |
| 30er Decke Normalbeton | 4,574 | 0,327 | 4,901 | 36,59 |
| 22er Decke UHPC | 5,018 | 0,373 | 5,391 | 43,59 |
| 25er Decke UHPC | 4,989 | 0,376 | 5,365 | 39,91 |
| 30er Decke UHPC | 4,987 | 0,368 | 5,355 | 39,89 |
| delta UHPC- Normalbeton_{Avg} | 0,421 | 0,033 | 0,454 | 4,52 |
| delta Normal- Leichtbeton_{Avg} | 1,565 | 0,092 | 1,657 | 12,52 |
| delta UHPC- Leichtbeton_{Avg} | 1,986 | 0,125 | 2,111 | 17,04 |

Wiederum wurden hier die Ergebnisse aus den vorhergegangenen Kapiteln bestätigt und übersichtlich dargestellt. Die Werte bezogen sich dabei auf folgende Parameter:

- Rohre mit Ø 17 – Dieser Parameter wird ab Abb. 2 berücksichtigt und eingearbeitet
- Der Rohrachsabstand beträgt 15 cm
- Der Stahlbetonuntersicht ist verputzt

Den höchsten Wert für die Kennliniensteigung erhielt man bei der Variante UHPC mit der Deckenstärke 22 cm $KH_{\text{Unten}} = 5,018 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der niedrigste Wert $KH_{\text{Unten}} = 3,009 \text{ W/m}^2\text{K}$ war bei einer 22 cm hohen Leichtbetondecke zu finden. Überdies ist aus Tab. 2 abzulesen, dass der Normalbeton ein maximales $KH_{\text{Unten}} = 4,579 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer Deckenstärke von 22 cm besitzt. Das maximal errechnete Delta $KH_{\text{Delta}} = 2,009 \text{ W/m}^2\text{K}$ was einem prozentualen Unterschied von **40,04 %** entsprach, ergab sich ausgehend vom niedrigsten Wert Leichtbeton mit Deckenstärke 22 cm zum höchsten Wert UHPC mit 22 cm Deckenstärke. Da

sich sämtliche Werte hier auf eine Überdeckung von 3 cm über der Unterkante der verschiedenen Betonmaterialien bezogen, wichen die Werte, wie vorhin bereits erläutert, sehr wenig voneinander ab, im Mittel um **0,18 %**. Daher war ein Vergleich der Mittelwerte ein probates Mittel, um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Die größte Differenz bestand zwischen UHPC und Leichtbeton im Mittel $\mathbf{KH_{Delta} = 1,986 \text{ W/m}^2\text{K}}$ und in Prozent **39,74 %**, zwischen Normalbeton und Leichtbeton bestand ein gemitteltes $\mathbf{KH_{Delta} = 1,565 \text{ W/m}^2\text{K}}$ und **31,31 %**. Der geringste Unterschied bestand zwischen UHPC und Normalbeton bei einem $\mathbf{KH_{Delta}}$ im Mittel von **0,421 W/m²K**, das einem Unterschied von **8,42 %**.

Eine Erklärung für die Abweichung lieferten hierbei die Wärmeleitfähigkeitswerte für die einzelnen Querschnitte, Leichtbeton mit einem $\lambda_{\text{Leichtbeton}} = 0,40 \text{ W/mK}$ im Vergleich zum Wert für Normalbeton $\lambda_{\text{Normalbeton}} = 2,1 \text{ W/mK}$ und UHPC $\lambda_{\text{UHPC}} = 6,0 \text{ W/mK}$. Diese wurden ebenfalls im Kapitel 2.2.6 Effekte der Materialien Leichtbeton, Normalbeton und UHPC genauer erklärt.³⁷³⁸³⁹⁴⁰

Mittels der gleichen Methode wurden die Ergebnisse für die verschiedenen Höhenlagen im Querschnitt, sowie für einen Rohrdurchmesser von $\varnothing 17 \text{ mm}$ und $\varnothing 20 \text{ mm}$ ermittelt.

³⁷ Vgl. Durcrete GmbH 2017

³⁸ Vgl. ÖNORM B 4710-2: 2008 09 01

³⁹ Vgl. ÖNORM EN 206: 2017 05 01

⁴⁰ Vgl. ÖNORM EN 206: 2017 05 01

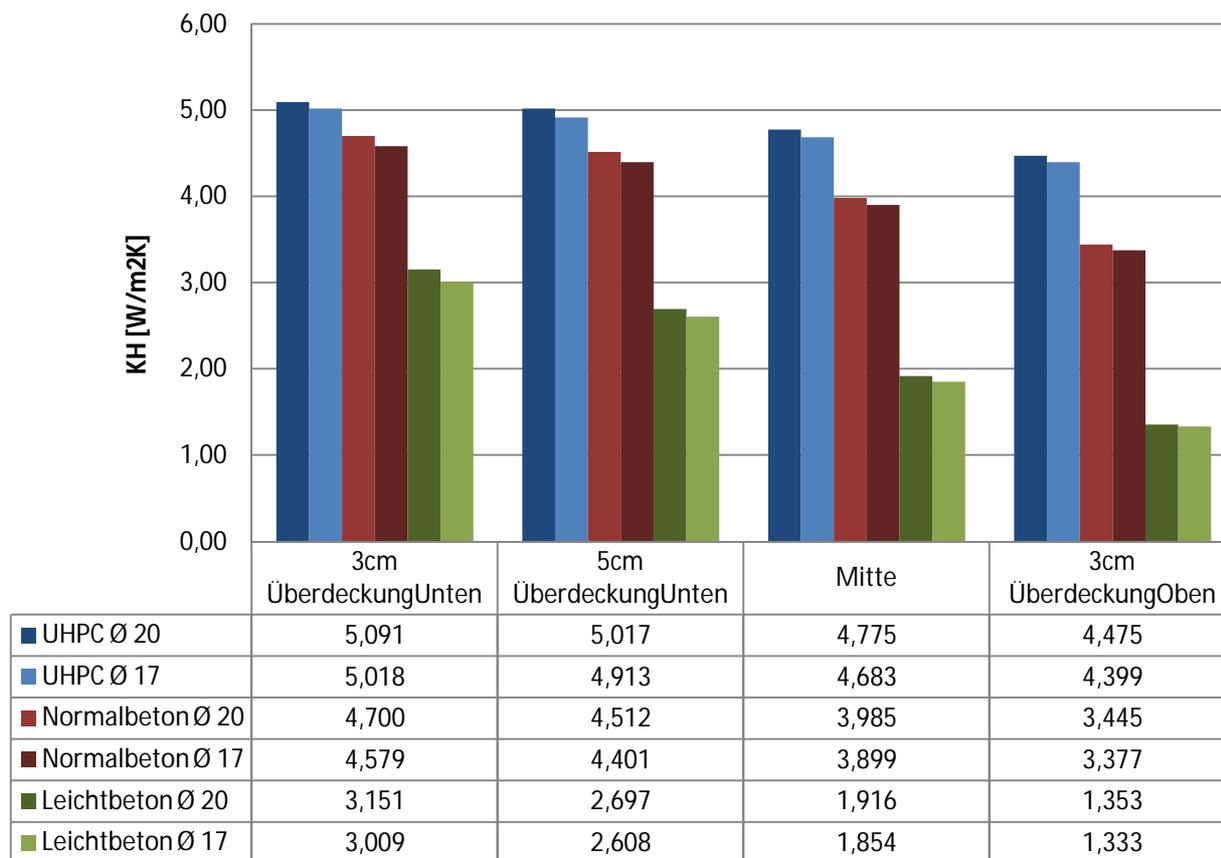


Abb. 20: Ergebnisse Heizbetrieb 22 cm hoher Querschnitt und Achsabstand 15 cm

Wie in Abbildung 20 zu sehen, wurden die zuvor getätigten Aussagen hier grafisch bestätigt. Außerdem ist in dieser Grafik der Effekt der Höhenposition des Rohrregisters zu erkennen. An dieser Stelle noch einmal der Hinweis, dass die Höhenlage gleich wie in Kapitel 2.2.7 Höhenlage angewendet wurde. Für diese Grafik wurde eine konstante Deckenstärke mit 22 cm gewählt, der Achsabstand verändert sich nicht. Ebenso wurden sämtliche Ergebnisse mit einer verputzten Untersicht dargestellt.

Werden die verschiedenen Positionen der Höhenlage einzeln betrachtet, schlossen der Trend und die Ergebnisse an die zuvor getätigten Aussagen an. Wie bereits in Abbildung 19 zu sehen war, ist auch hier in Abbildung 20 ein ähnliches thermisches Verhalten vom Querschnitt erkennbar. Würde man wieder eine Trendlinie über die verschiedenen Höhenpositionen legen, wäre qualitativ dieselbe Kurve zu sehen.

- Bei Betrachtung des **Normalbetons** und einer Höhenlage von **3 cm über Stahlbetonunterkante** betrug der gemittelte Wert aus beiden Durchmessern $KH_{Average} = 4,640 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei einer **Überdeckung** von 5 cm lag bereits eine Differenz $KH_{Delta} = 0,183 \text{ W/m}^2\text{K}$ vor. Bei dieser Veränderung der Höhenposition um 2 cm nach oben, veränderte sich die Leistung einer Deckenheizung **3,94 %**. Auffallend war, dass sich dieses Ergebnis deutlich von dem der anderen beiden Materialien unterschied.

Der **UHPC** Querschnitt wies mit einem $KH_{\text{Delta}} = 0,090 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem Unterschied in Prozent von **1,77 %** auf. Hingegen besaß der Leichtbetonquerschnitt den höchsten $KH_{\text{Delta}} = 0,428 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hier entsprach das einem Unterschied von **13,88 %**.

- Bei weiterer Untersuchung der Höhenlage wurden folgende Erkenntnisse erzielt. Durch das Verschieben der Rohrregister in die **Mitte des Querschnitts**, wurde ein Unterschied bei **Normalbeton** von $KH_{\text{Delta}} = 0,515 \text{ W/m}^2\text{K}$ mit einem prozentualen Unterschied von **11,56 %** errechnet. Positionierte man nun die Rohre **3 cm unterhalb** der Betonoberkante veränderte sich der Unterschied der Abgabeleistung auf $KH_{\text{Delta}} = 0,531 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent **13,47 %**. Der **UHPC** hatte ähnlich wie zuvor ein geringeres Delta mit $KH_{\text{Delta}} = 0,236 \text{ W/m}^2\text{K}$ und **4,75 %** für die Mitte des Querschnitts, bei der Position **3 cm unterhalb** des untersuchten Querschnitts wurde ein $KH_{\text{Delta}} = 0,292 \text{ W/m}^2\text{K}$ und **6,17 %** festgestellt. Der **Leichtbeton** hatte ein $KH_{\text{Delta}} = 0,768 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einen Unterschied von **28,95 %** für die **Mitte** des Querschnitts und für **3 cm unterhalb** der Oberkante ergab sich $KH_{\text{Delta}} = 0,542 \text{ W/m}^2\text{K}$, das wiederum entsprach **28,75 %**.
- Die Unterschiede der verschiedenen Materialien schienen zunächst keinen Trend wiederzugeben. Bei genauerer Betrachtung wurden aber zwei Punkte offensichtlich. Zum einen nahmen die Delta Werte für Normalbeton und UHPC bei steigender Überdeckung zu. Beim Leichtbeton fiel der letzte Wert aus der Reihe. Durch den im Vergleich zu den anderen beiden Materialien niedrigen Wärmeleitfähigkeitswert $\lambda_{\text{Leichtbeton}} = 0,40 \text{ W/mK}$ stellten sich im ganzen Querschnitt Temperaturen mit einem niedrigeren Gradienten ein als bei Normalbeton und UHPC. Damit wurde auch diese Eigenheit des Leichtbetons erklärt, denn durch die ähnliche Temperaturverteilung und die höhere Positionierung der Rohrregister, näherten sich die Temperaturen mehr an als das bei den anderen Materialien der Fall war. Zum anderen waren die verschiedenen Wärmeleitfähigkeitswerte für die unterschiedlichen Kennliniensteigungen verantwortlich. Für die Auslegung einer Deckenheizung sollte den Planern daher bewusst sein, dass man durch die Verwendung von verschiedenen Materialien, deutlich unterschiedliche Ergebnisse erzielen kann. Für die Fertigteilbauweise sind sowohl die Variante Leichtbeton, als auch UHPC nebensächlich, da hier der Schwerpunkt der Wertschöpfungskette auf den hohen Vorfertigungsgrad liegt und man oft Standardlösungen anstrebt, daher sind die beiden anderen Varianten von theoretischem Interesse.

Aus Abbildung 20 geht zusätzlich der Unterschied von verschiedenen Rohrdurchmessern hervor. Die beiden gewählten Varianten $\varnothing 17 \text{ mm}$ und $\varnothing 20 \text{ mm}$ wurden wie bereits in Kapitel 2.2.3 Verschiedene Rohrdurchmesser gewählt. Zusätzlich wurden hier noch die verschiedenen Materialien sowie die Höhenlage überprüft.

Tab. 34: Differenz von verschiedenen Rohrdurchmessern bezogen auf ihre Lage im Querschnitt

| | $KH_{\Delta,3cm,unten}$ [W/m ² K] | $KH_{\Delta,5cm,unten}$ [W/m ² K] | $KH_{\Delta,Mitte}$ [W/m ² K] | $KH_{\Delta,3cm,oben}$ [W/m ² K] |
|-------------|---|---|---|--|
| UHPC | <u>0,073 (1,43%)</u> | 0,104 (2,07%) | 0,092 (1,93%) | 0,076 (1,70%) |
| Normalbeton | 0,121 (2,57%) | 0,111 (2,46%) | 0,086 (2,16%) | 0,068 (1,97%) |
| Leichtbeton | 0,142 (4,51%) | 0,089 (3,30%) | 0,062 (3,24%) | 0,02 (1,48%) |

Der größte Unterschied war bei der Variante Leichtbeton mit 3 cm Überdeckung auszumachen, der geringste ebenfalls bei einer Überdeckung von 3 cm beim Material UHPC. Somit konnte man, wie bereits in Kapitel 2.2.6 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC erklärt, sagen:

- *Bei einer geringen Überdeckung und niedrigem λ -Wert hatte der Rohrdurchmesser größeren Einfluss, als bei jenen mit höherer Überdeckung und vor allem höheren λ -Wert. Im Allgemeinen war aber festzuhalten, dass dieser Unterschied von geringer Bedeutung war, was die prozentualen Unterschiede unterstrichen. Zurückzuführen war diese Eigenschaft auf die Verhältnisse der Volumina von Querschnitt zu Heizrohr. Genauer ist dieser Effekt oben beschrieben.*
- Somit lässt sich allgemein sagen, dass der höchste Wert für die Kennliniensteigung für alle Höhenpositionen der UHPC Querschnitt war. Des Weiteren ging hervor, dass sich bei Betrachtung von verschiedenen Durchmessern die Werte für die Kennliniensteigung änderte, dies aber einen geringen Effekt hat. Wie bereits in Kapitel 2.2.7 erklärt, war auch hier die Leistung der Höhenposition mit geringer Überdeckung höher, als die mit hoher Überdeckung.

Anhand von 2 verschiedenen Grafiken wurden alle auftretenden Effekte aus der Gesamtheit aller Parameter erklärt und veranschaulicht. Dabei muss gesagt werden, dass sich die Werte aus diesem Kapitel auf die genauen Ergebnisse von zuvor stützen und diese bekräftigen.

2.4 Ausblick Kühlung

Im letzten Schritt soll hier noch kurz auf den Unterschied zwischen Heiz- und Kühlbetrieb eingegangen werden. Bevor aber mit dem Vergleich begonnen wird, hier noch einmal der Hinweis, dass Heiz- und Kühlbetrieb verschiedene Randbedingungen und daher komplett verschiedene Ergebnisse darstellen.

2.4.1 Ergebnisdarstellung von Material, Höhenlage und Rohrdurchmesser

Der Kühlbetrieb unterscheidete sich in den Werten doch deutlich von dem zum Heizbetrieb. Dennoch treffen Trends und qualitativ getätigte Aussagen auch hier zu.

Tab. 35: Ergebnisse Kühlbetrieb-Leichtbeton für 22cm Deckenstärke und \varnothing 17mm

| | KH_{Unten} [W/m ² K] | KH_{Oben} [W/m ² K] | KH_{Gesamt} [W/m ² K] | spez. Wärmeabgabeleistung q_{Unten} |
|---------------|--|---|---|--|
| 15A 3Ü | 3,729 | 0,222 | 3,951 | 29,83 |
| 15A 3Ü OP | 3,959 | 0,221 | 4,179 | 31,67 |
| 20A 3Ü | 3,117 | 0,205 | 3,322 | 24,94 |
| 20A 3Ü OP | 3,270 | <u>0,195</u> | 3,465 | 26,16 |
| 15A 5Ü | 3,120 | 0,257 | 3,377 | 24,96 |
| 15A 5Ü OP | 3,295 | 0,249 | 3,545 | 26,36 |
| 20A 5Ü | 2,673 | 0,225 | 2,897 | 21,38 |
| 20A 5Ü OP | 2,798 | 0,219 | 3,017 | 22,38 |
| 15A 11Ü | 2,107 | 0,299 | 2,406 | 16,86 |
| 15A 11Ü OP | 2,189 | 0,297 | 2,485 | 17,51 |
| 20A 11Ü | 1,878 | 0,297 | 2,174 | 15,02 |
| 20A 11Ü OP | 1,946 | 0,296 | 2,242 | 15,56 |
| 15A 19Ü | 1,455 | 0,343 | 1,798 | 11,64 |
| 15A 19Ü OP | 1,487 | 0,343 | 1,831 | 11,90 |
| 20A 19Ü | 1,318 | 0,311 | 1,629 | 10,54 |
| 20A 19Ü OP | 1,353 | 0,312 | 1,665 | 10,82 |

An dieser Stelle noch einmal dieselben Aussagen von zuvor zu wiederholen, ist nicht notwendig daher soll der Unterschied zwischen Heiz- und Kühlbetrieb hier möglich sein.

Der höchste Wert $KH_{\text{Unten}} = 3,959 \text{ W/m}^2\text{K}$ trat wieder bei einem **Achsabstand** von **15 cm** bei einer **unverputzten** Untersicht und einer **Höhenlage 3 cm über** der **Querschnittsunterkante** auf. Im Vergleich zum Heizbetrieb hatte der Kühlbetrieb eine größere Differenz mit $KH_{\text{Delta}} = 0,809 \text{ W/m}^2\text{K}$, **20,43 %** als der Heizbetrieb. Der minimale

Unterschied zwischen den beiden Fällen war bei einer Höhenlage von 3 cm unter der Stahlbetonoberkante mit Putz und einem Achsabstand von 20 cm mit $KH_{\text{Delta}} = 0,096 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent **7,32%** zu erkennen. Unter Anbetracht der anderen Ergebnisse sah man, dass dieser Unterschied bei einer geringen Überdeckung deutlicher auszumachen war, als bei einer hohen Überdeckung. Diese Aussage traf auf alle Ergebnisse bei allen Parametern zu.

Ein weiterer Unterschied zum Heizbetrieb war, dass alle Parameter bei einer Deckenkühlung wie bereits festgestellt, weiter voneinander abwichen als dies beim Heizen festzustellen war. Damit bleibt festzuhalten, dass eine größere Leistung einer Deckenheizung bzw. -kühlung, mit größeren Unterschieden der einzelnen Parameter einhergehen. Somit waren die einzelnen Parameter umso gewichtiger umso höher die Abgabeleistung war.

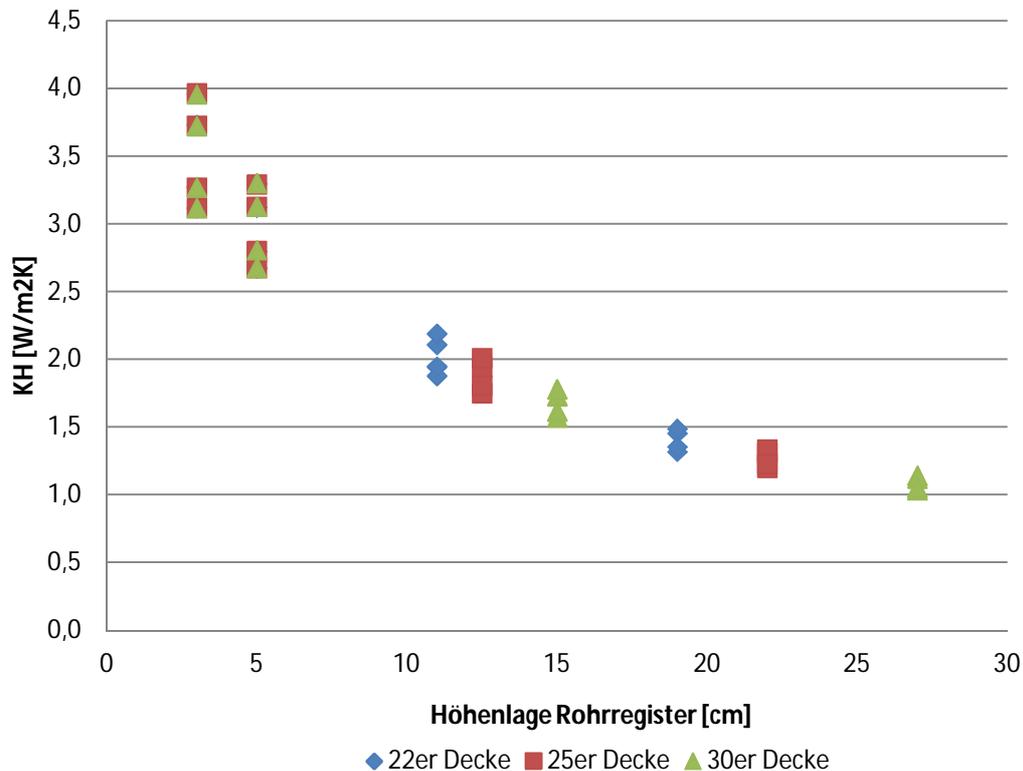


Abb. 21: Ergebnisse Kühlbetrieb-Leichtbeton und Ø 17mm

In Abbildung 21 wurde die gleiche allgemeine Grafik wie im Heizbetrieb nun für den Kühlbetrieb angewendet. Dabei blieben die Parameter für die Decke dieselben, es wurden

lediglich wie in Kapitel 2.1 beschrieben die Randbedingungen der Heizung, der vorhandenen Norminnentemperatur und die Wärmeübergangskoeffizienten angepasst.⁴¹⁴²

Wie bereits erwähnt wurde, waren die hier erzielten Ergebnisse höher als beim direkten Vergleich zum Heizbetrieb. Dies lässt sich folgendermaßen in Zahlen ausdrücken.

- Die Kennliniensteigung betrug für **3 cm** über Stahlbetonunterkante im Mittel über die verschiedenen Deckenstärken eine Differenz von $KH_{\text{Delta}} = 0,714 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem Unterschied in Prozent von **19,16 %**. Bei einer Deckung von **5 cm** errechnete sich eine Differenz von $KH_{\text{Delta}} = 0,518 \text{ W/m}^2\text{K}$ und dabei ein Unterschied von **16,57 %**. Der **Leistungsunterschied** zum Heizbetrieb betrug bei einer geringen Überdeckung damit **annähernd 20 %**.
- Für eine noch höhere Positionierung der Rohrregister im Querschnitt machte das Errechnen des Mittelwerts wenig Sinn, da aufgrund der geometrischen Unterschiede, die Werte deutlich voneinander abwichen. Der Trend bzw. die qualitativen Ergebnisse waren aber auch hier 1:1 anzuwenden. Daher zwei Beispiele: Für die Positionierung des Rohres in der Mitte lag das größte Delta bei einer 22 cm hohen Decke mit **12,02 %** und das kleinste bei einer 30 cm Decke mit **9,79 %**. Ähnlich verhielt sich die gleiche Betrachtung bei der höchsten Deckungslage. Mit einer 22 cm starken Leichtbetondecke erhielt man einen Unterschied von **8,43 %** und damit den höchsten Wert bei einer 30 cm Decke hingegen ein Delta von **6,79 %**. Die Ergebnisse bezogen sich hier auf eine verputzte Untersicht mit einem Achsabstand von 15 cm.
- Hieraus bestätigte sich noch einmal die bereits getätigte Aussage von vorhin. Bei einer größeren Leistungsabgabe war das vorhandene Delta höher als bei geringeren Werten für die Kennliniensteigung. Daraus resultierten die größeren Unterschiede für eine geringe Überdeckung.

2.4.2 Ergebnisdarstellung von Material, Höhenlage und Rohrdurchmesser

In diesem Kapitel soll kurz auf die Unterschiede zwischen Heiz- und Kühlbetrieb bei Veränderung von Material, Höhenlage und Durchmesser eingegangen werden.

⁴¹ Vgl. ÖNORM EN ISO 13790: 2008 10 01

⁴² Vgl. ÖNORM EN 1264-5: 2009 01 01

Tab. 36: Kühlbetrieb mit verputztem Querschnitt, Achsabstand 15 cm und Ø 17 mm

| | KH_{Unten} [W/m ² K] | KH_{Oben} [W/m ² K] | KH_{Gesamt} [W/m ² K] | spez. Wärmeabgabeleistung q_{Unten} [W/m ²] |
|---|---|--|--|---|
| 22er Decke Leichtbeton | 3,729 | 0,222 | 3,951 | 29,83 |
| 25er Decke Leichtbeton | 3,726 | 0,234 | 3,960 | 29,81 |
| 30er Decke Leichtbeton | 3,723 | <u>0,221</u> | 3,943 | 29,78 |
| 22er Decke Normalbeton | 6,402 | 0,322 | 6,724 | 51,22 |
| 25er Decke Normalbeton | 6,394 | 0,321 | 6,715 | 51,15 |
| 30er Decke Normalbeton | 6,399 | 0,328 | 6,727 | 51,19 |
| 22er Decke UHPC | 7,219 | 0,345 | 7,564 | 57,75 |
| 25er Decke UHPC | 7,214 | 0,337 | 7,551 | 57,71 |
| 30er Decke UHPC | 7,218 | 0,342 | 7,560 | 57,74 |
| delta UHPC-Normalbeton_{Avg} | <i>0,818</i> | <i>0,018</i> | <i>0,836</i> | <i>6,55</i> |
| delta Normal-Leichtbeton_{Avg} | <i>2,673</i> | <i>0,098</i> | <i>2,771</i> | <i>21,38</i> |
| delta UHPC-Leichtbeton_{Avg} | <i>3,491</i> | <i>0,116</i> | <i>3,607</i> | <i>27,93</i> |

Die in Tabelle 36 dargestellten Ergebnisse haben dieselbe Bedeutung wie die im Kapitel zuvor. Eine detaillierte Analyse des Kühlbetriebs war an dieser Stelle nicht mehr notwendig, da wie bereits erwähnt wurde, sich qualitativ die gleichen Trendlinien wie im Heizbetrieb einstellen würden. Daher wiederum kurz der Vergleich zwischen Heiz- und Kühlvariante.

Den höchsten Wert für die Kennliniensteigung hatte dem Heizbetrieb ähnlich der UHPC Querschnitt. Bei einer Überdeckung von 3 cm errechnete sich ein Unterschied von $KH_{\text{Delta}} = 2,219 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für den Vergleich mit Normalbeton ergab sich ein $KH_{\text{Delta}} = 1,822 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für **Leichtbeton** ein $KH_{\text{Delta}} = 0,714 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit die Materialien ebenfalls repräsentativ vergleichbar waren, bezogen sich die Prozentwerte nur auf die maximalen Ergebnisse innerhalb eines Materials. Damit ergaben sich die Ergebnisse für den **UHPC** zu **30,75 %** für **Normalbeton 28,47 %** und für den **Leichtbeton 19,16 %**.

Hier war wiederum der Einfluss der Materialien und der dazugehörigen Eigenschaften (Anm.: Dichte und Wärmeleitfähigkeit) sowie die höheren Leistungsabgaben der Kühlung erkennbar. Was auffällig war, dass auch beim Vergleich der Materialien des Kühlbetriebs die größeren Werte für die Kennliniensteigung deutlich mehr Unterschiede aufwiesen als die des Heizbetriebs.

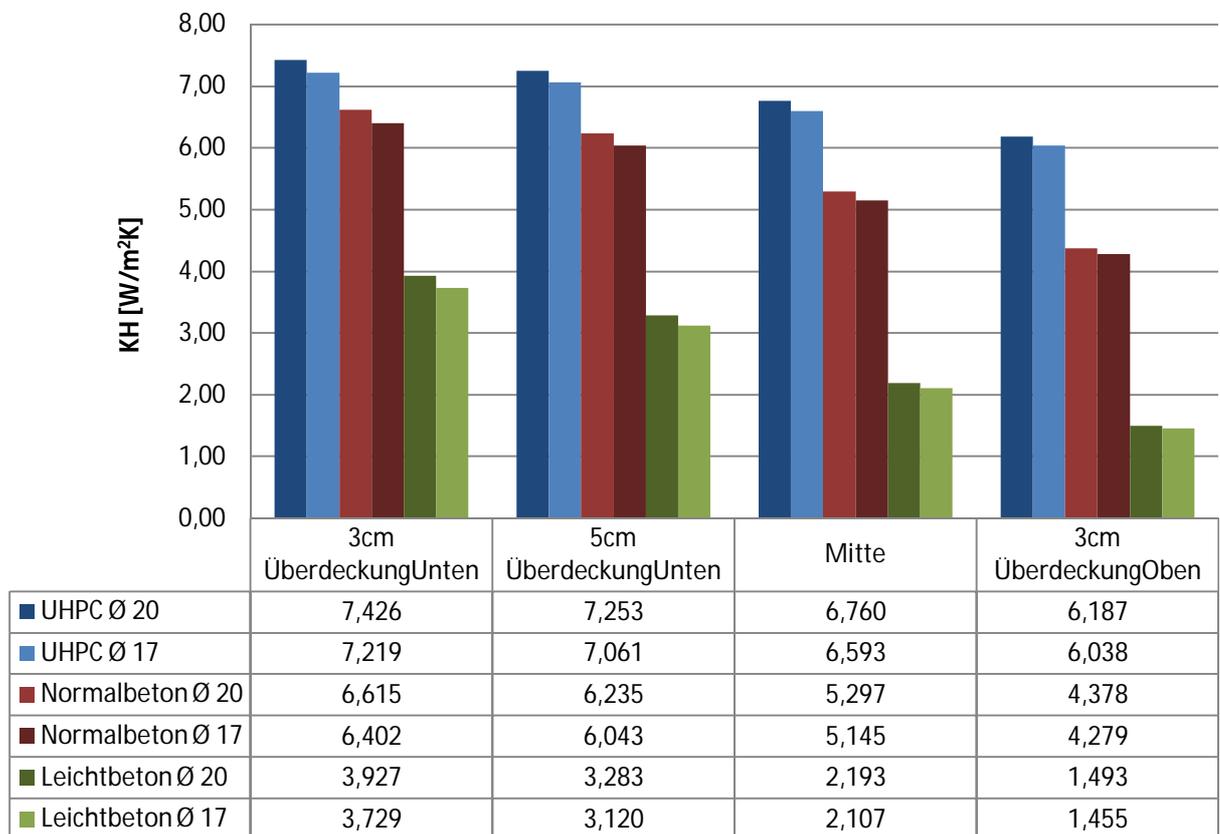


Abb. 22: Ergebnisse Kühlbetrieb 22 cm hoher Querschnitt und Achsabstand 15 cm

Mit Abbildung 22 wurde noch einmal der Unterschied zwischen Kühl- und Heizbetrieb dargestellt. Die Auswirkung von Durchmesser, Material und Höhenlage wurden hier für den Kühlbetrieb noch einmal deutlich dargestellt. Da auch hier qualitativ dieselben Ergebnisse auftraten wie bereits erklärt, wurde hier nicht mehr auf die einzelnen Parameter eingegangen. Was jedoch auch hier auffiel, war die erhöhte Leistung einer Kühlung im Vergleich zur Heizung.

Allgemein ließ sich der Unterschied von Heiz- und Kühlbetrieb deutlich feststellen. Bei genauerer Betrachtung wurde aber ersichtlich, dass Trendlinien und qualitative Aussagen gleichermaßen für beide Varianten galten. Die Ergebnisse der Deckenkühlung wurden in den Abbildungen dieses Kapitels dabei entlang der Ordinate nach oben verschoben. Bei höherer Überdeckung, größerem Achsabstand, geringerem Durchmesser, unverputzter Untersicht, höherer Deckenstärke und einem Material mit vergleichsweise zu den anderen Materialien geringerer Wärmeleitfähigkeit, nahm der Leistungsunterschied zwischen Heiz- und Kühlbetrieb ab. Dennoch war dieser Effekt deutlich ersichtlich.

Die gewählten Parameter wurden auf die Bedürfnisse in Fertigteilbauweise abgestimmt, dennoch lassen sich die hier erzielten Ergebnisse ohne Abstriche zu machen auch auf Ortbetonlösungen anwenden. Dabei treten für ein Fertigteilwerk andere Fragen auf, als bei Ortbeton. Der wohl wichtigste Parameter ist die Höhenlage der Rohrregister, das hat sich bei den Gesprächen mit Technikern und Projektverantwortlichen herauskristallisiert. Würde man die Register erst vor Ort direkt auf der Baustelle positionieren, wären keine Veränderungen durch den im Endzustand vorherrschenden monolithischen Querschnitt zu erwarten. Die anderen Parameter ob Achsabstand, Durchmesser oder andere untersuchte Parameter wirken sich gleichermaßen auf Fertigteilplatte und Ortbeton aus. Die anfänglichen Bedenken, dass der Beton seine Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Heiz- bzw. Kühlleistung nicht erreichen könnte, wurde damit eindeutig abgewendet. Die stationären Berechnungen belegen die Leistungssteigerungen einer Deckenheizung mit einer geringen Betondeckung. Im nächsten Schritt sind mit denselben Parametern zeitlich abhängige Berechnungen durchgeführt worden. Der gewichtigste Punkt liegt dabei auf der Untersuchung, ob durch die Position der Rohrregister die gewünschte Speicherwirkung des Betonquerschnitts verloren geht, damit die thermische Bauteilaktivierung mehr und mehr in den Hintergrund gerät sowie ob bei einer oberflächennahen Heizung gar noch von Betonkernaktivierung die Rede sein kann. All diese Fragen werden in Kapitel 3 beantwortet.

Wenn man wollte, könnte man die Anzahl der Varianten innerhalb der gewählten Parameter erhöhen, damit würden die Ergebnisse verfeinert werden, qualitativ sind keine Abweichungen zu erwarten. Die Untersuchung eines anderen Fußbodenaufbaus, könnte interessant sein. Bei weniger gedämmten Aufbauten würde vermutlich der Wärmestrom mehr nach oben gerichtet sein und damit die Leistung an der Deckenunterseite reduziert werden. Man würde dann aber nicht mehr von einer klassischen Decken- bzw. Strahlungsheizung sprechen. Diese Untersuchungen würden den Rahmen dieser Diplomarbeit überschreiten.

3. Instationäre Untersuchung

3.1 Beschreibung des Konstruktionsaufbau

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Auswirkungen von instationären Untersuchungen und fasst die einzelnen Ergebnisse zusammen. Anders als im stationären Fall, wurden nicht mehr mehrere Parameter gleichzeitig verglichen, sondern nur einzelne in verschiedenen Varianten getestet und betrachtet. Es wurde diese Art der Darstellung gewählt, da ansonsten keine Übersicht der Ergebnisse garantiert werden konnte.

3.1.1 Randbedingungen

Die äußeren Randbedingungen für die instationären Untersuchungen entsprachen den in Kapitel „2.1 Beschreibung des Konstruktionsaufbaus“ dargestellten Werten. Dadurch bleiben sämtliche Ergebnisse vergleichbar und geben weitere Aufschlüsse zum gesamten Themengebiet.

Die inneren Randbedingungen in diesem Kapitel sind hingegen veränderlich. Einerseits wurden Heiz- und Kühlmedium nicht mehr durch einen statischen, fixen Wert beschrieben, andererseits wurde auch mit 3 verschiedenen Möglichkeiten gespielt. Diese Randbedingungen werden zu Beginn der jeweiligen Unterkapitel erläutert.

3.2 Parameterstudie

3.2.1 Allgemeines

Um zeitabhängige Vorgänge ausreichend zu beschreiben, sind mehrere verschiedene Betrachtungen notwendig gewesen. Im Wesentlichen konzentrierte sich diese Arbeit auf 3 Darstellungsarten.

- Zyklus On/Off
 - o Dieser Zyklus beschreibt eine Heiz-/Kühlmöglichkeit bei der man das System 12 Stunden einschaltet und danach abschaltet.⁴³⁴⁴
- Permanent An
 - o Die Temperatur des Querschnitts stellt sich zu Beginn der Simulation nach Norminnentemperatur ein. Danach wird das System eingeschaltet.⁴⁵⁴⁶
- Permanent Aus

⁴³ Vgl. Friembichler et al. 2016

⁴⁴ Vgl. Krec 2015

⁴⁵ Vgl. f. ÖNORM EN 12831-1: 2014 11 15

⁴⁶ Vgl. ÖNORM EN ISO 13790: 2008 10 01

- o Die Anfangstemperaturen entsprechen dem Ergebnis der stationären Betrachtung, das System ist voll eingeschaltet. Nach einer Stunde wird es abgeschaltet.

Durch 3 Betrachtungen ließ sich das Verhalten einer betonkernaktivierten Decke sehr gut beschreiben. Einerseits erhielt man einen Überblick über das zyklische Verhalten, andererseits über die zeitabhängigen Aufwärm- sowie Abkühlvorgänge. Von Interesse wären zudem Untersuchungen von anderen Zeitfunktionen, mit anderen Heizmitteltemperaturen.

Da instationäre Simulationen sehr viel Rechenzeit in Anspruch nahmen, wurde nicht mehr die ganze Anzahl an Simulationen durchgeführt. Es wurden jedoch so viele Rechnungen, wie in Tabelle 37 dargestellt, durchgeführt, dass die simulierten Ergebnisse trotzdem eine detaillierte Aussage zum Themengebiet zulassen. Insgesamt wurden **108** verschiedene Dateien erstellt. Wenn man bedenkt, dass jede einzelne Datei 288 bzw. 576 Ergebnisse enthält, kommt die Vielzahl an einzelnen Teilergebnissen von **51840**.

Tab. 37: Übersichtsmatrix instationärer Untersuchungen

| | Ø 17 | Ø 20 | Achsstand 15 | Achsstand 20 | Überdeckung 3 | Überdeckung 4 | Überdeckung 11 | Überdeckung 19 | mit Putz | ohne Putz | 22er Decke | 25er Decke | 30er Decke | Leitbleiben | Normalbeton | L-FPC |
|----------------|------|------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------|
| Ø 17 | | | .A | .A | JA | .A | JA | JA | JA | JA | JA | JA | .A | .A | JA | JA |
| Ø 20 | | | .A | | JA | | | | JA | JA | JA | JA | .A | .A | JA | |
| Achsstand 15 | JA | JA | | | JA | .A | JA | JA | JA | JA | JA | JA | .A | .A | JA | JA |
| Achsstand 20 | JA | | | | | | | | JA | JA | JA | JA | | | JA | |
| Überdeckung 3 | JA | JA | .A | .A | | | | | JA | JA | JA | JA | .A | .A | JA | JA |
| Überdeckung 5 | JA | | .A | | | | | | JA | JA | JA | JA | | | JA | |
| Überdeckung 11 | JA | | .A | | | | | | JA | JA | JA | JA | | | JA | |
| Überdeckung 19 | JA | | .A | | | | | | JA | JA | JA | JA | .A | .A | JA | JA |
| mit Putz | JA | JA | .A | .A | JA | .A | JA | JA | | | JA | JA | .A | .A | JA | JA |
| ohne Putz | JA | | .A | | JA | | | | | | JA | JA | | | JA | JA |
| 22er Decke | JA | JA | .A | .A | JA | .A | JA | JA | JA | JA | | | | .A | JA | JA |
| 25er Decke | JA | | .A | | JA | | | JA | JA | JA | | | | | JA | |
| 30er Decke | JA | | .A | | JA | | | JA | JA | JA | | | | | JA | |
| Leitbleiben | JA | | .A | | JA | | | JA | JA | JA | | | | | | |
| Normalbeton | JA | JA | .A | .A | JA | .A | JA | JA | JA | JA | JA | JA | .A | | | |
| L-FPC | JA | | .A | | JA | | | | JA | JA | JA | JA | | | | |

3.2.2 Zyklischer Heiz-/Kühlvorgang

Die zeitabhängige Funktion, die für die Berechnungen in diesem Kapitel die Grundlage darstellte, soll einen Zyklus zeigen, der das System 12 Stunden lang eingeschaltet und danach 12 Stunden ausgeschaltet betrachtet. Für die Veränderung der Heizmediumtemperatur wurde eine Stunde benötigt.

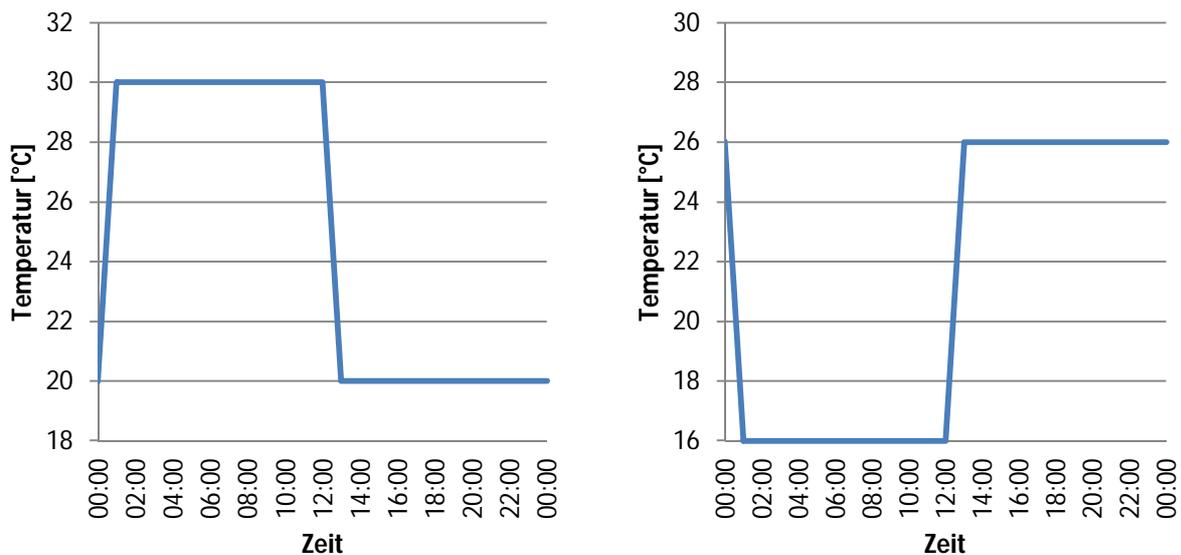


Abb. 23: Verlauf des Zyklus On/Off der Heiz- (links) und Kühltemperatur (rechts) des Heizmediums °C

Das Medium veränderte die Temperatur um 10 K in beiden Fällen. Wie bereits im stationären Fall wurde die maximale Heizmediumtemperatur auf 30 °C festgesetzt, die Kühltemperatur auf 16°C. Um die gewünschte Temperatur zu erreichen wurde eine Stunde benötigt. Vereinfacht wurde der Temperaturan- bzw. -abstieg als lineare Funktion dargestellt.⁴⁷⁴⁸

In diesem Kapitel wurde auf mehrere Eigenheiten eingegangen. Zum einen werden die verschiedenen maximalen Abgabeleistungen innerhalb der Parameter und des Zyklus untersucht. Zum anderen wurde auch auf die minimalen Werte eingegangen und verglichen wie sich die einzelnen Querschnitte während des Abkühlvorgangs verhalten.

⁴⁷ Vgl. Friembichler et al. 2016

⁴⁸ Vgl. Krec 2015

3.2.2.1 Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht

Tab. 38: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|------------------|----------|-------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Variabel | x | | | | | |
| Unveränderlich | | x | x | x | x | x |
| Referenzvariante | Mit Putz | 17 mm | 15 cm | 22 cm | Normalbeton | 3 cm unten |

In diesem Kapitel wurde ähnlich wie bei den stationären Untersuchungen der Unterschied zwischen einem verputzten Querschnitt zu der Variante ohne Putz untersucht. Wie bereits weiter oben erläutert wurde, wurde nicht mehr auf alle Varianten eingegangen, da durch die Auswertung eines repräsentativen Querschnitts, die anderen beschrieben werden konnten.

Die folgenden Kapitel beinhalten weniger Tabellen als das noch bei den stationären Untersuchungen der Fall war. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass sämtliche Untersuchungen auf mehrere Tage verteilt in 10 Minuten Schritten simuliert wurden. Würden die Ergebnisse aller Simulationen dargestellt werden, wäre zum einen keine Übersicht mehr gewährleistet und zum anderen sind keine zusätzlichen Erkenntnisse zu erwarten. Deshalb liegt der Schwerpunkt auf den Grafiken.

Für den Versuchsaufbau wurde ein Normalbetonquerschnitt der Deckenstärke 22 cm gewählt. Der Achsabstand bleibt konstant auf 15 cm, ein Durchmesser von 17 mm und eine Höhenlage von 3 cm oberhalb der Stahlbetonunterkante werden vorausgesetzt.

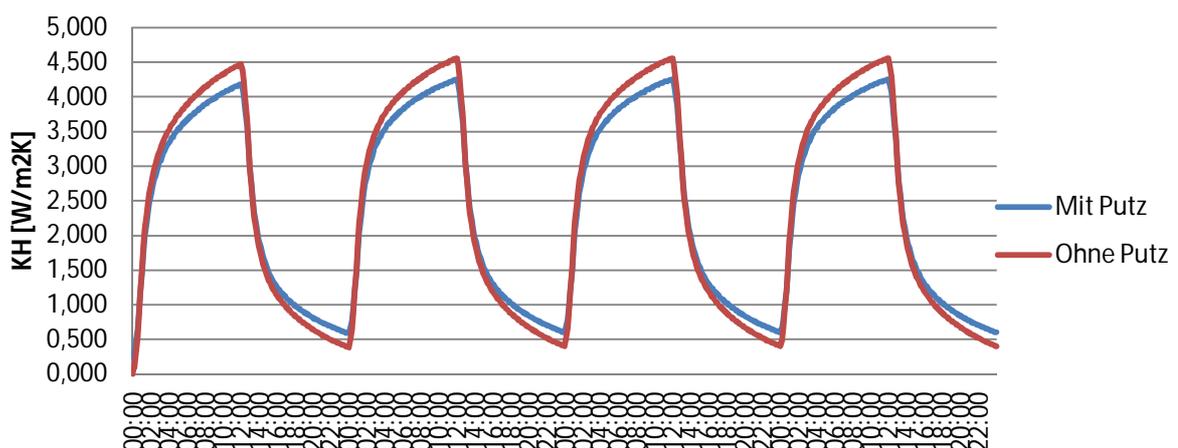


Abb. 24: Ergebnisdarstellung Putz – Zyklus On/Off

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse für die beschriebene Untersuchung dargestellt. Wie bereits weiter oben erwähnt, waren mehrere Zyklen notwendig um die Darstellung

repräsentativ zu gestalten, da sich die Kennliniensteigung für die Deckenheizung von keiner Leistung zum zyklischen Verhalten von „12h ein zu 12h aus“ einpendeln musste. Aus Abbildung 24 wurden mehrere Erkenntnisse deutlich.

- *Wie sich bereits im stationären Fall gezeigt hatte, verhielt sich die Variante ohne Putz deutlich günstiger in Hinsicht auf die Abgabeleistung, als bei der Variante ohne Putz. In Zahlen bedeutete das einen maximalen Wert für den unverputzten Querschnitt $KH_{\text{Unten}} = 4,557 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für die verputzte Variante $KH_{\text{Unten}} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit errechnete sich eine Differenz von $KH_{\text{Differenz}} = 0,305 \text{ W/m}^2\text{K}$ und ein Unterschied von **6,69 %**.*
- *Die getätigte Aussage musste bei genauerer Betrachtung revidiert werden. Wurden die minimalen Werte betrachtet, wurde deutlich, dass ein verputzter Querschnitt weniger an Leistungsabgabe verliert, damit ein günstigeres Verhalten zeigte. Nach Abschalten der Heizung, stellten sich im letzten Zyklus die Werte $KH_{\text{Unten}} = 0,604 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die Variante mit Putz und $KH_{\text{Unten}} = 0,406 \text{ W/m}^2\text{K}$ für jene ohne Putz ein. Die Differenz der beiden Werte blieb in derselben Größenordnung bei $KH_{\text{Differenz}} = 0,198 \text{ W/m}^2\text{K}$, der Unterschied in Prozent betrug **4,34 %**.*
- *Qualitativ lassen sich ähnliche Steigungsverhältnisse bei beiden Kurven ausmachen. Erst nach Erreichen eines gewissen Schwellwerts für die Kennliniensteigung änderten sich die Steigungen der beiden Kurven deutlich und veränderten damit ihr thermisches Verhalten.*
- *Für die Auslegung und Optimierung einer Deckenheizung, zeigte sich, dass sich die Planer über diesen Effekt bewusst sein sollten. Zum einen wenn sie die Leistungsfähigkeit im Maximalbetrieb betrachten, zum anderen aber wenn sie wie in diesem Beispiel einen zyklischen Heizvorgang betrachten. Zu entscheiden ist, ob die Auslegung für den Maximalbetrieb maßgebend ist, oder das Speicherverhalten des Querschnitts.*

Die Eigenschaften der untersuchten Versuchsaufbauten machten den Einfluss des Putzes deutlich. Betrachtet man die steigende Kurve, wurde deutlich, dass die Variante ohne Putz leistungsfähiger war als jene mit Putz. Bei dem untersuchten Versuchskörper betrug die Putzschicht 1 cm. Im Vergleich zur Fläche des Querschnitts war dieser Wert klein. Der wichtigste Faktor für den Unterschied hier war der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Putz}} = 0,98 \text{ W/mK}$. Der Wert war so dominant im Vergleich zu dem des Normalbetons $\lambda_{\text{Normalbeton}} = 2,1 \text{ W/mK}$, dass beim Aufheizvorgang einer verputzten Decke weniger Wärme abgegeben wurde. Beim Abkühlvorgang sorgte er dafür, dass die Wärme weniger schnell an die Umgebungstemperatur abgegeben wurde.

Das gleiche System wurde wie bereits erwähnt auch im Kühlbetrieb betrachtet. Wie bereits aus den stationären Ergebnissen zu erwarten war, bestätigte sich die Annahme, dass gleiche Effekte auftreten, die Werte aber höher ausfallen.

- Für den untersuchten Querschnitt ergaben sich die maximalen Werte zu $KH_{Unten} = 5,903 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die verputzte Variante und $KH_{Unten} = 6,664 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit eine Differenz in Prozent von **11,42 %**.
- Die minimalen Ergebnisse lieferten die Werte $KH_{Unten} = 0,499 \text{ W/m}^2\text{K}$ für eine Untersicht mit Putz und $KH_{Unten} = 0,552 \text{ W/m}^2\text{K}$ für den unteren Wert.

Dieses Ergebnis zeigte, dass die absolut Werte der Kennliniensteigung höher waren als im Heizbetrieb und entsprach somit der anfänglichen Erwartungshaltung. Die Werte für den unteren Bereich zeigten aber, dass sich die Decke schneller erwärmt.

3.2.2.2 Verschiedene Rohrdurchmesser

Tab. 39: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|------------------|----------|-------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Variabel | | x | | | | |
| Unveränderlich | | x | x | x | X | x |
| Referenzvariante | Mit Putz | 17 mm | 15 cm | 22 cm | Normalbeton | 3 cm unten |

Der nächste zu untersuchende Punkt war der Einfluss verschiedener Rohrdurchmesser auf das thermische Verhalten des Bauteils. Ähnlich wie im Kapitel zuvor wurde ein verputzter Normalbetonquerschnitt mit 22 cm hoher Stahlbetondecke verwendet. Der Achsabstand betrug 15 cm und die Höhenlage der Rohrregister liegt bei 3 cm. Lediglich der Durchmesser der Rohre blieb variabel.

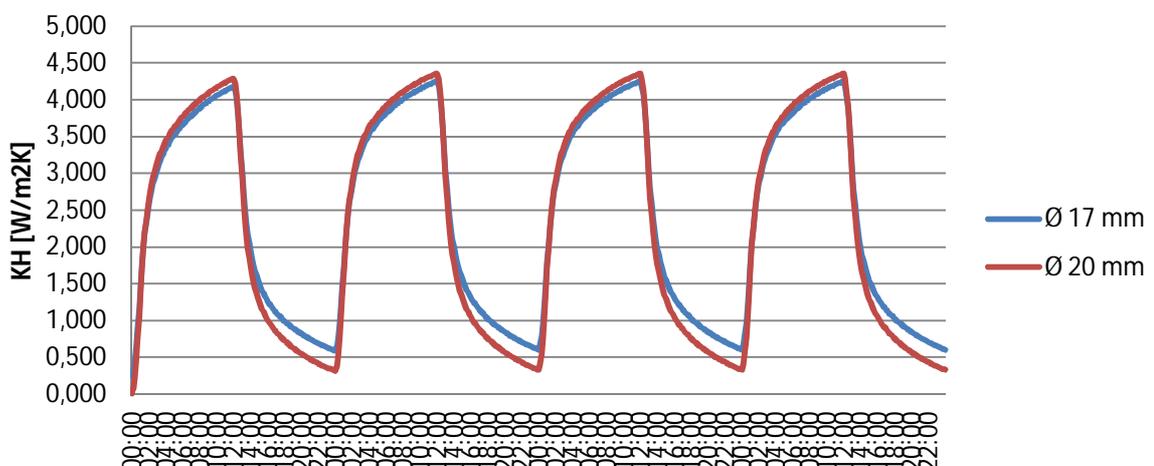


Abb. 25: Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Zyklus On/Off

Die hier gezeigte Grafik zeigte den Unterschied der Durchmesser 17 mm und 20 mm. Auffällig war, dass sich beim Erreichen des Maximums des Aufheizvorgangs ein kleiner Unterschied zwischen den beiden Varianten einstellte. Bei Betrachtung des Minimums am Ende des Abkühlvorgangs war der Unterschied viel deutlicher auszumachen.

- *Bei Erreichen des Maximums war der Einfluss der Rohrdurchmesser ähnlich dem stationären Fall kaum merkbar. Für einen Durchmesser von 20 mm errechnete sich ein Wert von $KH_{\text{Unten}} = 4,356 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei 17 mm betrug dieser Wert $KH_{\text{Unten}} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit erhielt man ein Delta von $KH_{\text{Differenz}} = 0,104 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent **2,39 %**.*
- *Für den Abkühlvorgang war der Unterschied deutlicher auszumachen. Bei 20 mm erhielt man $KH_{\text{Unten}} = 0,328 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei 17 mm lag dieser Wert bei $KH_{\text{Unten}} = 0,604 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Differenz betrug somit $KH_{\text{Differenz}} = 0,276 \text{ W/m}^2\text{K}$ und ergab damit in Prozent **6,34 %**.*
- *Daraus wurde deutlich, dass man durch das Einlegen größerer Rohrdurchmesser wenig zusätzliche Heizleistung erzielen konnte, interessanterweise aber beim Abkühlvorgang immerhin 6,34 % weniger Wärmeabgabeleistung vorhanden war und damit Speicherfähigkeit verloren wurde.*

Wie bei den stationären Untersuchungen wurde deutlich, dass sich nach gewisser Zeit ähnliche Temperaturen einstellten und diese wenig mit 2,39 % voneinander abwichen. Dieser Effekt lässt sich auf den Rohrdurchmesser und sein im Vergleich zum Betonquerschnitt geringen Volumina zurückführen. Genauer wurde das bereits im Kapitel 2.2.3 Verschiedene Rohrdurchmesser diskutiert. Neu bei dieser Betrachtung war der Effekt, dass während des Abkühlvorgangs bei größeren Rohrdurchmessern die Leistung im minimalen Bereich unter die Kurve des kleineren Durchmessers fiel. Er wurde erst durch die Betrachtungen der verschiedenen Zyklen deutlich. Zurückführen ließ sich dieser Effekt auf die Vergrößerung der Rohrdurchmesser. Beim Abkühlvorgang trat er viel deutlicher auf, da zusätzlich zu den äußeren Randbedingungen der innen Räume mit 20°C und den dazugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten, ein größerer Querschnitt mit dem kalten Medium durchströmt wurde. Während des Heizvorganges, standen beide Rohre samt Heizmedium den Randbedingungen gegenüber. Beim Abkühlen wurden sie verstärkt, daher kühlte ein Querschnitt mit größeren Rohrdurchmessern mehr aus, als ein Querschnitt ohne.

- *Für die Dimensionierung der Durchmesser der Heizrohre, darf dieser Effekt nicht vergessen werden. Ein Verlust der Wärmeabgabeleistung durch verringerte Speichereigenschaften des Betons verursachte sogar einen Abfall der Abgabeleistung während des Abkühlvorgangs um bis zu **6,34 %** in diesem Beispiel. Im Gegensatz zum Ergebnis der stationären Untersuchung für Heiz-/Kühlsysteme spielten verschiedene Durchmesser bei instationärer Betrachtung eine größere Rolle für das thermische Verhalten der Deckenheizung.*
- *Der Abkühlvorgang zeigte, dass mit größeren Durchmessern mehr Abgabeleistung verloren wurde. Dies ließ sich auf die zusätzliche Randbedingung des 20 °C warmen*

Heizmediums und der äußeren Randbedingung des Raums mit derselben Temperatur darunter zurückführen. Diese verstärkten sich in dieser Betrachtung.

Auch an dieser Stelle sei der Vergleich zum Kühlbetrieb erlaubt. Die Werte fielen wiederum höher aus, $KH_{\text{Unten}} = 6,191 \text{ W/m}^2\text{K}$ für ein Rohr mit Durchmesser 20 mm und $KH_{\text{Unten}} = 5,903 \text{ W/m}^2\text{K}$ für 17 mm. Damit ergab sich ein größeres Delta im Vergleich zum Heizbetrieb $KH_{\text{Delta}} = 0,288 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent **4,65 %**. Im Minimumbereich fielen die Werte aber viel enger zusammen, mit einem Unterschied von $KH_{\text{Delta}} = 0,053 \text{ W/m}^2\text{K}$. Das ließ sich dadurch erklären, dass die Maxima stärker voneinander differierten und beim Abkühlvorgang somit ein größeres Startdelta vorherrschte und dieses erst bei Erreichen des Minimums annähernd null war.

3.2.2.3 Achsabstand

Tab. 40: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|------------------|----------|-------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Variabel | | | x | | | |
| Unveränderlich | x | x | | x | x | x |
| Referenzvariante | Mit Putz | 17 mm | 15 cm | 22 cm | Normalbeton | 3 cm unten |

Dieses Kapitel untersuchte verschiedene Achsabstände in Bezug auf die Leistungsfähigkeit einer Deckenheizung. Es wurde wiederum ein 22 cm hoher Stahlbetonquerschnitt mit Standard Aufbau gewählt. Die Unterseite war verputzt, die Rohrregister liegen 3 cm oberhalb der Stahlbetonunterkante und die Durchmesser der Rohre waren 17 mm.

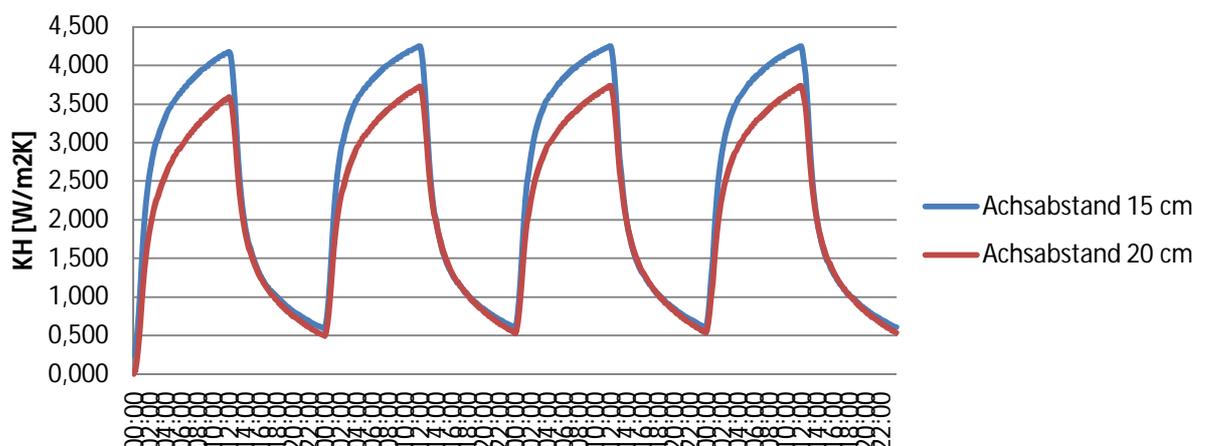


Abb. 26: Ergebnisdarstellung Achsabstand – Zyklus On/Off

Wie aus Abbildung 26 hervorgeht, sind die Ergebnisse für einen Achsabstand von 15 cm und 20 cm dargestellt. Man kann deutlich erkennen, dass bei einem geringeren Abstand der Rohrregister zueinander die Kennliniensteigung zunahm.

- *Der Maximalwert der Kennliniensteigung wurde bei 12h nach Einschalten der Heizung erreicht. Für 15 cm Achsabstand war dieser Wert $KH_{\text{Unten}} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$, bei einem Achsabstand von 20 cm errechnete sich ein Wert von $KH_{\text{Unten}} = 3,736 \text{ W/m}^2\text{K}$. Berechnete man nun die Differenz, erhielt man den Wert $KH_{\text{Differenz}} = 0,516 \text{ W/m}^2\text{K}$. In Prozent ergab das **12,14 %**. Damit bestätigte das Ergebnis aus der instationären Untersuchung das der Stationären.*
- *Betrachtete man den Abkühlvorgang genauer, wurde erkennbar, dass der minimale Wert für die Kennliniensteigung bei 15 cm $KH_{\text{Unten}} = 0,604 \text{ W/m}^2\text{K}$ und bei 20 cm $KH_{\text{Unten}} = 0,532 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit wurde deutlich, dass die Differenz niedriger ausfiel als beim Aufheizvorgang mit $KH_{\text{Differenz}} = 0,072 \text{ W/m}^2\text{K}$, in Prozent **1,69 %**.*

Die Verringerung der Rohrachsabstände brachte einen klaren Vorteil mit sich. In Abbildung 26 zeigte sich dies bereits aus einer rein qualitativen Betrachtung. Bei kleineren Achsabständen zeigte die Betrachtung des Maximalbereichs, dass sich ein Vorteil um 12,14 % einstellen konnte. Hingegen stellten sich beim Abkühlvorgang kaum andere Werte ein und wurden fast ident.

- *Die Entscheidung, wie weit die Achsabstände auseinanderliegen dürfen, ist aus thermischer Sicht einfach zu beantworten. Umso geringer die Abstände umso höher die Abgabeleistung, ohne Leistungseinbußen im Minimalbereich zu haben. Andere Entscheidungskriterien können aus statischer Hinsicht sein.⁴⁹⁵⁰ Außerdem können wirtschaftliche Überlegungen eine Rolle spielen, weniger Rohre im Querschnitt bedeuten logischerweise weniger verbautes Material. Damit können Kosten eingespart werden.*

Für den Kühlbetrieb ergaben die Simulationen, dass die Werte im maximalen Bereich größer waren als bei der Deckenheizung. $KH_{\text{Unten}} = 5,149 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei einem Achsabstand von 20 cm und $KH_{\text{Unten}} = 5,903 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei 15 cm. Die Werte im minimalen Bereich hatten eine ähnliche Größenordnung wie der Heizbetrieb mit $KH_{\text{Unten}} = 0,629 \text{ W/m}^2\text{K}$ für 20 cm und **0,493 $\text{W/m}^2\text{K}$** für 15 cm. Interessanterweise erwärmte sich die Decke bei einem 15 cm Achsabstand schneller als bei 20 cm und wies sogar weniger Abgabeleistung im minimalen Bereich auf. Erklären ließ sich der Effekt durch die engeren Achsabstände und dem Heizmedium mit 26 °C. Zusätzlich zu den äußeren Randbedingungen der umschließenden Räume ist ein kleinerer Querschnitt zu erwärmen.

⁴⁹ Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1: 2015 02 15

⁵⁰ Vgl. Furche und Bauermeister 2015

3.2.2.4 Verschiedene Deckenstärken

Tab. 41: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|------------------|----------|-------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Variabel | | | | x | | |
| Unveränderlich | x | x | x | | x | x |
| Referenzvariante | Mit Putz | 17 mm | 15 cm | 22 cm | Normalbeton | 3 cm unten |

Verschiedene Deckenstärken sind aus mehreren Gründen interessant. Während der Planungsphase eines Projekts stehen exakte Aussagen über Deckendicken meist noch nicht zur Verfügung.

„Bereits bei der Planung ist die Leitungsführung zu berücksichtigen, denn die Konzentration von Leitungen bzw. die Abmessung und deren gegenseitiger Abstand hat Einfluss auf die Tragwerksplanung.“⁵¹

Haben während der stationären Berechnungen Wärmespeichereigenschaften wie die spezifische Wärmekapazität noch keinen Einfluss auf die Ergebnisse genommen, so wirken diese sich bei den instationären Untersuchungen deutlich aus.

Die Simulationen wurden bei einem Achsabstand von 15 cm mit Rohren vom Durchmesser 17 mm durchgeführt. Bei einer verputzten Untersicht und einer Betondeckung von 3 cm wurde ein Normalbetonquerschnitt verwendet. Wie bereits aus den stationären Ergebnissen hervorging, war auch die Untersuchung der höchsten Deckungslage 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante von Interesse. Deswegen wurde später auch noch auf dieses Ergebnis eingegangen.

⁵¹ Friedrich 2014, 19

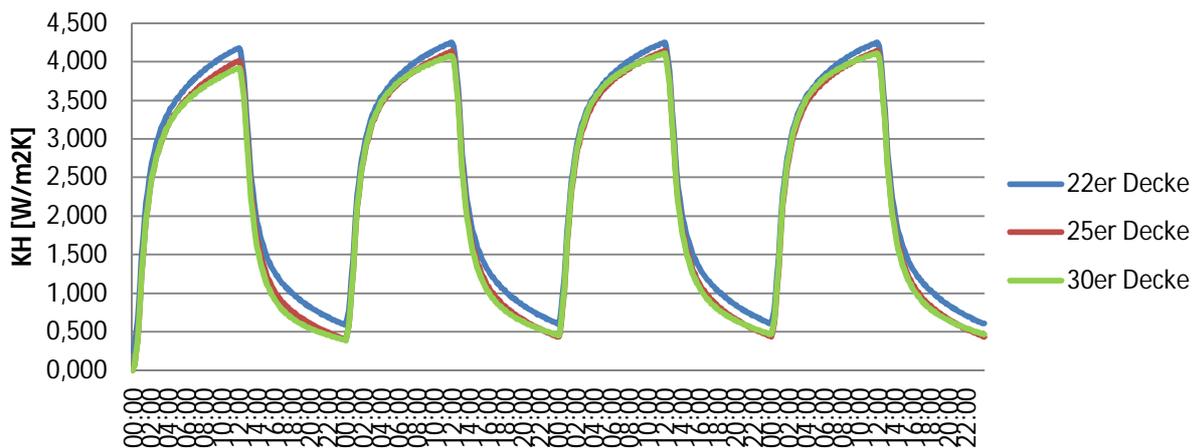


Abb. 27: Ergebnisdarstellung Deckenstärken – Zyklus On/Off

Aus dieser Grafik können die bekannten Effekte aus der stationären Untersuchung abgelesen werden. Nach einer Einschwingphase von 24h verliefen die Kurven annähernd parallel. In Zahlen ausgedrückt:

- Der 22 cm hohe Querschnitt weist die höchsten Werte im Maximalbereich für die Kennliniensteigung auf mit $KH_{\text{Unten}} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$. Im Minimalbereich ist der Wert nach 4 Zyklen bei $KH_{\text{Unten}} = 0,604 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Der 25 cm Querschnitt die zweithöchsten Werte im Maximalbereich mit $KH_{\text{Unten}} = 4,141 \text{ W/m}^2\text{K}$. Im Minimalbereich erhält man für die Simulation $KH_{\text{Unten}} = 0,434 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Die niedrigsten Werte sind bei einem 30 cm hohen Stahlbetonquerschnitt mit $KH_{\text{Unten}} = 4,110 \text{ W/m}^2\text{K}$. Im Minimalbereich ist der Wert $KH_{\text{Unten}} = 0,465 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tab. 42: Übersicht Deckenstärke

| | $KH_{\text{Unten,max}} [\text{W/m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten,min}} [\text{W/m}^2\text{K}]$ |
|--------------------------------------|--|--|
| 22er Decke | 4,252 | 0,604 |
| 25er Decke | 4,141 | <u>0,434</u> |
| 30er Decke | 4,110 | 0,465 |
| Differenz₂₂₋₂₅ [%] | 2,61% | 4,00% |
| Differenz₂₅₋₃₀ [%] | 0,75% | 0,75% |
| Differenz₂₂₋₃₀ [%] | 3,34% | 3,27% |

In Tabelle 42 wurden die Ergebnisse noch einmal übersichtlich dargestellt. Die getroffenen Aussagen im Kapitel 2.2.5 Verschiedene Deckenstärken trafen hier ebenfalls zu. Die maximalen Werte wichen wenig voneinander ab, damit war der Effekt ähnlich wie bei der stationären Betrachtung vernachlässigbar. Durch die zeitlich veränderliche Betrachtung und dem Heizzyklus, wurde ersichtlich, dass der Unterschied der verschiedenen Deckenstärken sogar bei den minimalen Werten weniger als 5 % betrug.

- Bei einer geringen Deckung wie in diesem Beispiel von 3 cm, war der Effekt vernachlässigbar. Zwar waren Unterschiede auszumachen, sie spielten aber auf das Gesamtverhalten des Systems keine große Rolle. Damit blieb den Planern die Arbeit erspart, weitere Überlegungen hinsichtlich der Deckenstärke zu machen, sofern sich die Heizregister nahe der Unterkante des Betonquerschnitts befinden.

An dieser Stelle soll aber auch auf die andere Möglichkeit eingegangen werden verschiedene Deckenstärken weiterhin variabel zu lassen, aber die Position der Heizregister 3 cm unterhalb der Betonoberkante zu ändern. Wie des Öfteren bereits in dieser Arbeit erklärt, wurde die Entscheidung aus baupraktischen Gründen für diese Position gefallen.

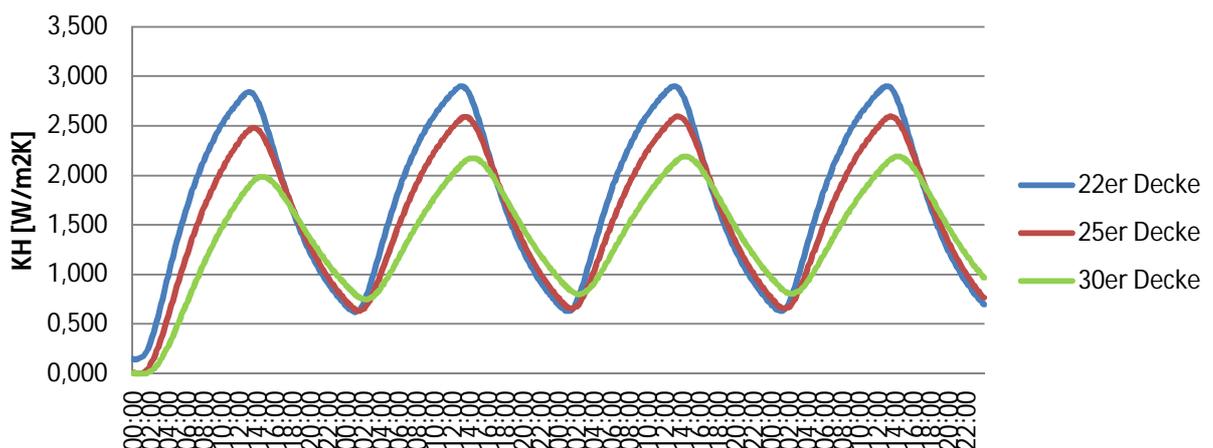


Abb. 28: Ergebnisdarstellung Deckenstärken 3 cm Deckung oben – Zyklus On/Off

Abbildung 28 zeigt nicht nur andere Werte sondern auch eine qualitativ unterschiedliche Kurve zu den bis jetzt vorgestellten. Nach dem die Kurve einmal einschwang, konnte man fast von einer periodischen Schwingung sprechen. Nach dem Erreichen eines gewissen Schwellenwerts stellte sich bei einem Fortsetzen des Heizbetriebs ein horizontaler Ast ein, wie später in Kapitel 3.2.3 deutlich wird und sich selbst erklärt. Der Effekt konnte sich nur bei der 22 cm starken Decke etwas deutlicher einstellen. Die anderen beiden Kurven fielen sprunghaft innerhalb einer kurzen Zeit ab.

- Für den 22 cm Querschnitt ergaben sich folgende Werte für die Kennliniensteigung $KH_{\text{Unten}} = 2,900 \text{ W/m}^2\text{K}$ für den Spitzenwert und $KH_{\text{Unten}} = 0,632 \text{ W/m}^2\text{K}$ für den kleinsten Wert.

- Wurde die Deckenstärke auf 25 cm erhöht, errechneten sich die Werte $KH_{\text{Unten}} = 2,594 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten}} = 0,657 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Die 30 cm Decke hatte den maximalen Wert von $KH_{\text{Unten}} = 2,191 \text{ W/m}^2\text{K}$ und den minimalen nach 4 Zyklen bei $KH_{\text{Unten}} = 0,807 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tab. 43: Übersicht Deckenstärken 3 cm oben

| | $KH_{\text{Unten,max}} [\text{W/m}^2\text{K}]$ | $KH_{\text{Unten,min}} [\text{W/m}^2\text{K}]$ |
|--------------------------------------|--|--|
| 22er Decke | 2,900 | <u>0,632</u> |
| 25er Decke | 2,594 | 0,657 |
| 30er Decke | 2,191 | 0,807 |
| Differenz₂₂₋₂₅ [%] | 10,55% | 0,86% |
| Differenz₂₅₋₃₀ [%] | 15,54% | 5,78% |
| Differenz₂₂₋₃₀ [%] | 24,45% | 6,03% |

Tabelle 43 machte den Unterschied deutlich, dass bei verschiedenen Deckenstärken und einer Positionierung der Rohrregister weit oben im Querschnitt Unterschiede auftraten. Im maximalen Bereich betrug der Unterschied annähernd 25 %, damit darf der Effekt nicht vernachlässigt werden, ansonsten begeht man gravierende Fehler bei der Dimensionierung des Deckenheizsystems. Außerdem ging aus Tabelle 43 hervor, dass die Werte für die Kennliniensteigung beim Abkühlvorgang im minimalen Bereich bei einem hohen Querschnitt und einer Position knapp unterhalb der Oberkante höher waren, als die eines niedrigeren Querschnitts. Der Wert lag bei rund 6 % und bildete die größte Differenz für die Untersuchung im minimalen Bereich. Zurückzuführen war dieser Unterschied auf die Speicherfähigkeit des Betons und der spezifischen Wärmekapazität $c_{p\text{Normalbeton}} = 1000 \text{ J/kgK}$. Durch das zusätzlich vorhandene Volumen im Vergleich von einem 22 cm Querschnitt zum 30 cm Querschnitt, erwärmte sich der Querschnitt weniger stark, kühlte dafür auch weniger aus.

Auch hier wurde der Kühlbetrieb separat betrachtet und simuliert. Qualitativ ließen sich aus den Grafiken keine neuen Erkenntnisse gewinnen, weshalb sie auch nicht abgebildet wurden. Die Werte im maximalen Bereich waren etwas höher als im Heizbetrieb. Hier galt ebenfalls, dass eine Variante mit 30 cm zwar die geringsten Werte im maximalen Bereich aufwies, hingegen im minimalen Bereich die besten Speichereigenschaften hat und sich am wenigsten erwärmte.

3.2.2.5 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC

Tab. 44: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|------------------|----------|-------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Variabel | | | | | x | |
| Unveränderlich | x | x | x | x | | x |
| Referenzvariante | Mit Putz | 17 mm | 15 cm | 22 cm | Normalbeton | 3 cm unten |

Eine weitere Untersuchung betraf verschiedene Materialien, die während dieser Arbeit untersucht wurden. Im instationären Bereich wurden hierfür ein Achsabstand von 15 cm bei einer verputzten Deckenuntersicht und einer Deckungslage von 3 cm fixiert. Der untersuchte Rohrquerschnitt beträgt 17 mm und der Deckenquerschnitt besaß einen 22 cm hohen Betonquerschnitt. Lediglich die Materialien variierten für diese Untersuchung.

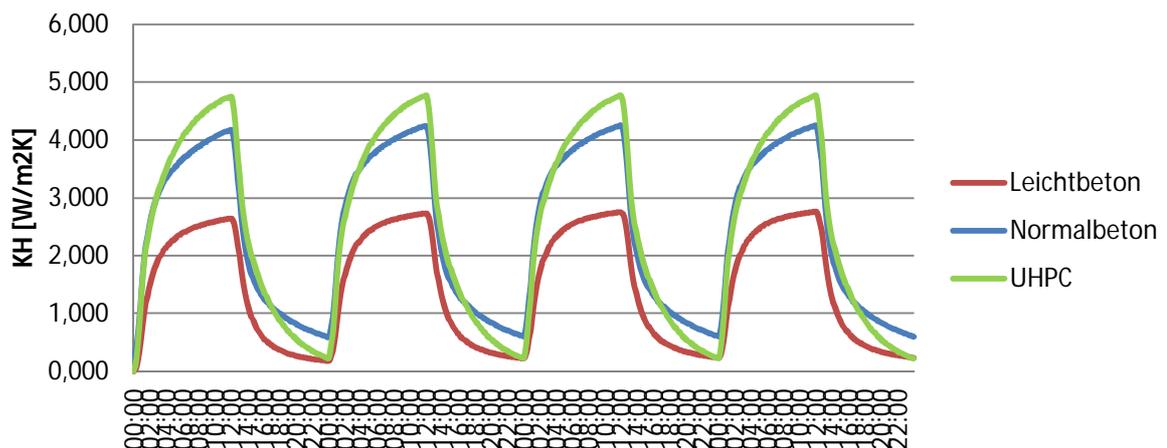


Abb. 29: Ergebnisdarstellung Materialien – Zyklus On/Off

Alle 3 Kurven in diesem Beispiel besaßen einen unterschiedlichen Verlauf. Nach ca. 4 Stunden stiegen die Kurven weniger stark und flachten ab. Hier begannen auch die Unterschiede deutlich zu werden. Der Leichtbeton verlief zu einem horizontalen Ast hin zum Maximum der möglichen Wärmeabgabeleistung. Würde man die Heizung konstant eingeschalten lassen, würde der Wert in ausreichender Genauigkeit dem aus der stationären Berechnung entsprechen. Später in der Arbeit wird genau auf diese Thematik eingegangen. Die Werte für die Wärmeabgabeleistung von verschiedenen Materialien unterschieden sich eindeutig voneinander.

- Den maximalen Wert für die Abgabeleistung lieferte ein UHPC Querschnitt mit $KH_{Unten} = 4,768 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nachdem die Heizung 4 Ein- und Abschaltzyklen hinter sich hatte, wurde der minimale Wert für die Kennliniensteigung ermittelt zu $KH_{Unten} = 0,225 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Die Variante mit Normalbeton lieferte die bereits bekannten Werte $KH_{Unten} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{Unten} = 0,604 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Eine Simulation des Leichtbetonquerschnitts lieferte die Ergebnisse $KH_{Unten} = 2,762 \text{ W/m}^2\text{K}$ für den maximalen Wert. Der minimale Wert lag bei $KH_{Unten} = 0,236 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Wie bereits erwähnt, ähnelten die hier gezeigten maximalen Werte qualitativ die der stationären Simulation. Der UHPC lieferte die höchsten Werte, der Leichtbeton die niedrigste, dazwischen befanden sich Werte für den Normalbeton. Damit wurden die Ergebnisse aus der stationären Berechnung bestätigt und bekräftigt. Interessant war aber das Verhalten beim Abkühlvorgang. Leichtbeton und UHPC bewegten sich in einem ähnlichen Wertebereich, das Ergebnis des Normalbetonquerschnitts wies aber deutlich höhere Zahlenwerte auf. Hier spielten die wärmetechnischen Eigenschaften der Materialien eine entscheidende Rolle. Da der UHPC einen geringeren Wert für die spezifische Wärmekapazität $c_{pUHPC} = 850 \text{ J/kgK}$ und einen deutlich höheren Wert für die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{UHPC} = 6 \text{ W/mK}$ als beispielsweise der Normalbeton, fiel die Abgabeleistung im minimalen Bereich sogar unter die des Normalbetons. Leichtbeton hatte zwar bessere Speichereigenschaften als die anderen beiden Materialien, aber durch den niedrigen Wert für die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Leichtbeton} = 0,4 \text{ W/mK}$ erwärmte sich der Querschnitt deutlich weniger stark.⁵² Das dabei entstandene Delta zwischen maximalen und minimalen Bereich war zwar am kleinsten mit $KH_{Differenz} = 2,526 \text{ W/m}^2\text{K}$, erreichte aber nie ähnlich hohe Werte für die Abgabeleistung, weshalb die Kennliniensteigung insgesamt niedrig war.

- Wie bereits erwähnt, sind verschiedene Materialien mehr von akademischem Interesse, da die Verwendung in Fertigteilbauweise nicht vorgesehen ist. Nichts desto weniger geben die Ergebnisse interessante Aufschlüsse darüber welchen Einfluss die thermischen Materialeigenschaften auf das Gesamtverhalten des Systems haben, wie zum Beispiel durch Zusatzmittel das Verhalten des Betons verändert wird. Bei der Verwendung von anderen Materialien außer Normalbeton muss bedacht werden, dass die spezifischen Eigenschaften eine große Auswirkung haben. Werden Materialien mit ähnlichen Werten für die thermischen Eigenschaften verwendet, kann man sich auf die Ergebnisse aus dieser Arbeit stützen. Im Bedarfsfall müssen hier weitere Untersuchungen gemacht werden, um andere Materialien exakt beschreiben zu können. Da dies aber den Rahmen dieser Diplomarbeit überschreiten würde, sind hier nur Beispiele plakativ behandelt worden.

⁵² Vgl. ÖNORM EN 12524: 2000 09 01

Die Werte des UHPC zeigten für den Kühlbetrieb nach 4 vergangenen Zyklen einen maximalen Wert von $KH_{\text{Unten}} = 6,933 \text{ W/m}^2\text{K}$ und im minimalen Bereich $0,283 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für den Normalbetonquerschnitt galten die bereits bekannten Werte von $KH_{\text{Unten}} = 5,903 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten}} = 0,493 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Leichtbeton ergab die kleinsten Werte mit $KH_{\text{Unten}} = 3,452 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten}} = 0,271 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit galt auch hier, dass den absolut höchsten Wert der UHPC Querschnitt aufwies, etwas darunter der Normalbeton und der geringste der Leichtbeton war. Im minimalen Bereich zeigte sich ähnlich zum Heizbetrieb, dass der Normalbeton die höchste Kennliniensteigung erreichte, darunter sich der UHPC und am geringsten der Leichtbeton einordneten.

3.2.2.6 Höhenlage

Tab. 45: Übersicht der untersuchten Variante

| | Putz | Ø | Achsabstand | Deckenstärke | Materialien | Höhenlage |
|------------------|----------|-------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Variabel | | | | | | x |
| Unveränderlich | x | x | x | x | x | |
| Referenzvariante | Mit Putz | 17 mm | 15 cm | 22 cm | Normalbeton | 3 cm unten |

Als letzten Punkt im Kapitel 3.2.2 Zyklischer Heiz-/Kühlvorgang wurde auf die Auswirkung von verschiedenen Höhenpositionen innerhalb des Stahlbetonquerschnitts eingegangen. Es wurde wiederum eine verputzte Untersicht mit einem Rohrdurchmesser von 17 mm, einem Achsabstand von 15 cm einer 22 cm hohen Normalbetonquerschnitts untersucht.

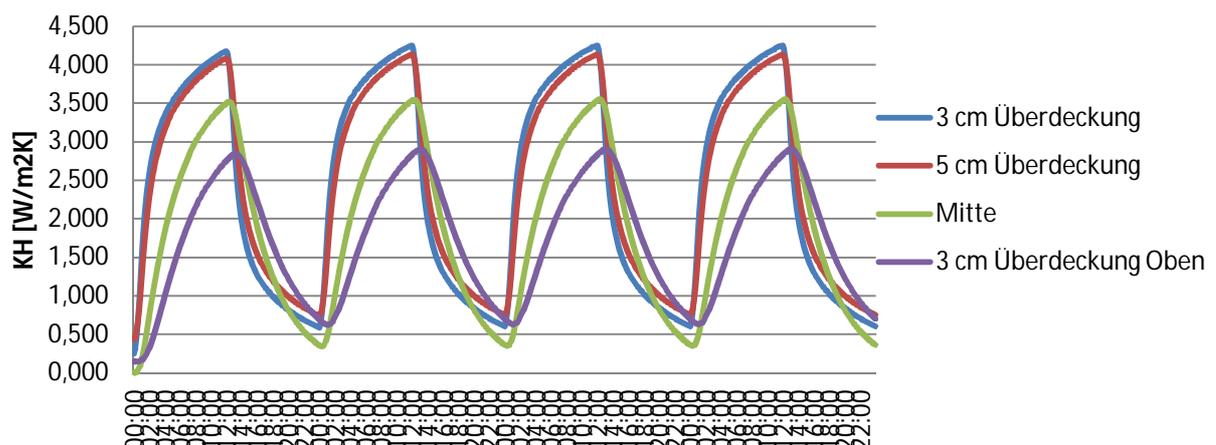


Abb. 30: Ergebnisdarstellung Höhenlage – Zyklus On/Off

Abbildung 30 zeigt wie sich die Abgabeleistung veränderte, wenn die Rohrregister in verschiedenen Höhenpositionen eingebaut wurden und man 12 Stunden heizte und danach

die Heizung abschaltete. Auf den ersten Blick wurde deutlich, dass die Position mit geringster Deckung die höchsten Werte im maximalen Bereich für die Kennliniensteigung aufwies. Mit steigender Überdeckung sank dieser Wert und die Position 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante hatte die niedrigsten Werte. Für den minimalen Bereich veränderte sich die Reihenfolge so, dass die Position in der Mitte am wenigsten Wärmeabgabeleistung erzielen konnte.

- Die Werte für eine Deckung von 3 cm sind wieder die bekannten von $KH_{\text{Unten}} = 4,252 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten}} = 0,604 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Bei 5 cm Betondeckung errechnen sich die Werte zu $KH_{\text{Unten}} = 4,135 \text{ W/m}^2\text{K}$ und der minimale Bereich nach 4 Zyklen ergibt $KH_{\text{Unten}} = 0,750 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Für die Position in der Mitte erhält man $KH_{\text{Unten}} = 3,549 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $KH_{\text{Unten}} = 0,347 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Die Position an der oberen Bewehrungslage ergibt die Werte $KH_{\text{Unten}} = 2,900 \text{ W/m}^2\text{K}$ und das Minimum nach 4 Perioden $KH_{\text{Unten}} = 0,632 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die hier vorgestellten Zahlenwerte und getätigten Aussagen zu Abbildung 30 erschienen auf den ersten Blick unregelmäßig und entsprachen nicht der bekannten Erwartungshaltung. Bei genauerem Betrachten wurde deutlich, dass diese Ergebnisse doch so zu erwarten waren. Für die zwei untersuchten Positionen mit geringer Deckung, verhielten sich beide Untersuchungen nahezu ident. Dies musste so sein, denn der Unterschied der Höhenlage war so gering, dass ähnliche Ergebnisse zu erwarten waren. Für die Position in der Mitte und 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante war das Verhalten nicht so eindeutig zu beschreiben. Das mittig simulierte Rohr zeigte im minimalen Bereich die geringsten Werte, hingegen die Werte der höchsten Position im Bereich der anderen beiden lagen. Dies ließ sich auf die Betonkernaktivierung zurückführen. Die gespeicherte Energie in Form von Wärme wurde langsamer an den darunterliegenden Raum abgegeben, wenn sich die wärmere Zone weiter oben im Querschnitt befand.

Tab. 46: Kennliniensteigung und dazugehörige Temperatur an der Stahlbetonoberkante

| | Temperatur STB- Unterkante [°C] | Temperatur STB- Oberkante [°C] | KH_{Unten} [W/m ² K] |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 3 cm Deckung | 21,03 | 22,35 | 0,604 |
| 5 cm Deckung | 21,28 | 22,47 | 0,750 |
| Mitte | <u>20,59</u> | 20,86 | 0,347 |
| 3 cm Deckung oben | 21,08 | 23,87 | 0,632 |
| Differenz 3-Mitte | 0,44 | 1,49 | 0,257 |
| Differenz 5-Mitte | 0,69 | 1,61 | 0,403 |
| Differenz 3 oben-Mitte | 0,49 | 3,01 | 0,285 |

Wurden, wie in Tabelle 46 dargestellt, die minimalen Werte für die Kennliniensteigung betrachtet und zum selbigen Zeitpunkt die Temperatur an der Stahlbetonunter- und Oberkante gemessen und ausgewertet, wurden die Aussagen von zuvor gestützt. Man sah, dass die Temperaturen im Querschnitt für 3 Positionen ähnlich waren und die mittlere Variante als einziger Wert deutlich abwich.

Auch hier sollte abschließend der Vergleich zum Kühlbetrieb gemacht werden. Da keine neuen qualitativen Erkenntnisse aus dem Kühlfall gewonnen werden konnten, konnte auf eine Detailanalyse verzichtet werden. Lediglich die maximalen Werte fielen höher aus als im Heizbetrieb.

3.2.3 Permanent An

Die nächste zu untersuchende instationäre Variante ist eine Betrachtung, was passiert, wenn das System nach einer Stunde eingeschalten wurde. Zu Beginn war ein Gleichgewichtszustand vorhanden. Die Temperatur im gesamten Querschnitt entsprach dem der äußeren Randbedingungen. Diese Simulationen gaben interessante Aufschlüsse über das Verhalten des Querschnitts beim Start der Heizung. Einerseits wurden Erkenntnisse über die maximalen Abgabeleistungen gewonnen, andererseits aber auch das zeitabhängige Verhalten der einzelnen Parameter besser beschrieben.

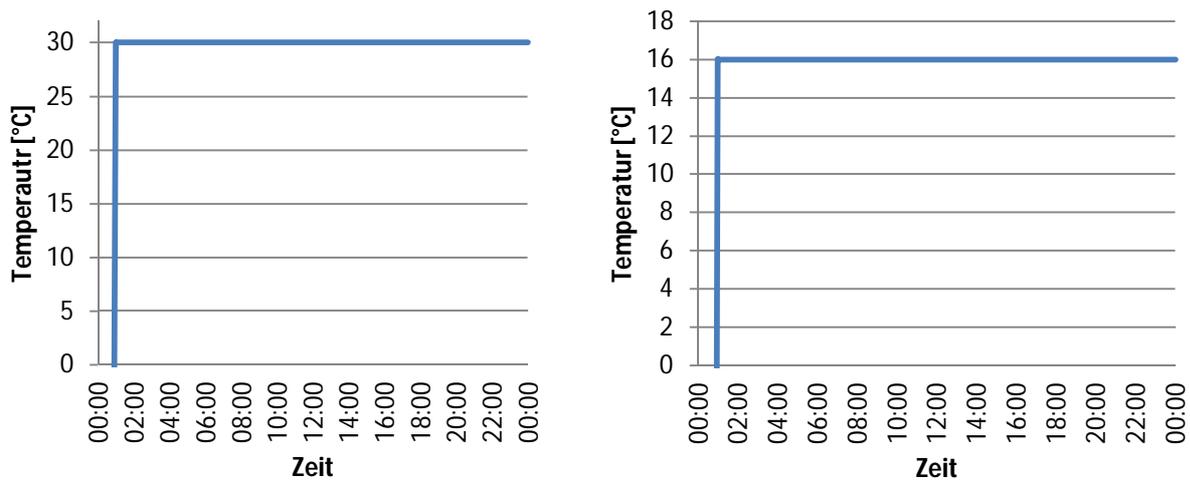


Abb. 31: Verlauf des Zyklus "Permanent An" der Heiz- (links) und Kühltemperatur (rechts) des Heizmediums °C

Eine weitere Besonderheit in diesem Kapitel stellte die Betrachtung der 50 % und 90 % Marke der Abgabeleistung dar. Ausgehend von einer Referenzvariante, einem 22 cm hohen Normalbetonquerschnitt mit verputzter Untersicht, einem Achsabstand von 15 cm und Rohren mit Durchmessern 17 mm bei einer Deckungslage von 3 cm unten, wurde untersucht, ob und wann die untersuchten Parameter diese Abgabeleistung erreichten. Für Planer sowie Konsumenten ist diese Betrachtung von zentraler Bedeutung, da somit die thermische Trägheit des Systems entschlüsselt wird.

Anders als im Kapitel 3.2.2 Zyklischer Heiz-/Kühlvorgang und im Kapitel 3.2.4 Permanent Aus, wurden in diesem Kapitel nur 2 Tage untersucht. Dafür mussten die Kurven von 2 und 4 Tagen untersucht werden. Es ging hervor, dass die Kurve bereits nach 24 h abflachte und keine Leistungsänderungen erkennbar waren, wie in untenstehender Abbildung gezeigt. Nach 48 h war keine wesentliche Veränderung der Leistungsabgabe zu erwarten. Diese Optimierung brachte viel Zeitersparnis beim Simulieren der Ergebnisse, ohne dabei an Genauigkeit zu verlieren.

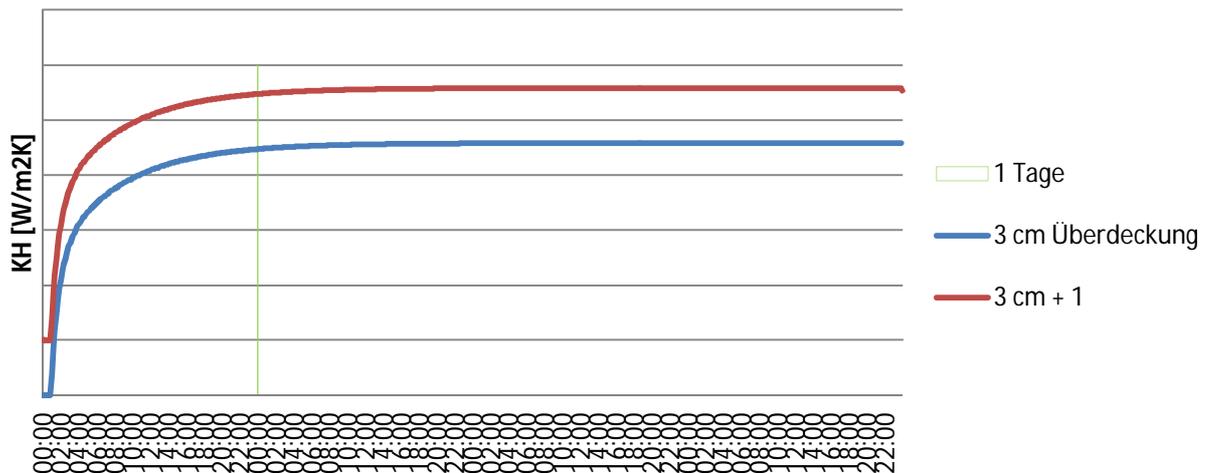


Abb. 32: Illustration 4 Tage zu 2 Tage

Die Rechenergebnisse wurden in Abbildungen 32 zusammengefasst, die Kurven hatten dieselben Zahlenwerte, sind nur um „1“ nach verschoben, um die Aussage zu verdeutlichen. Damit wurde offensichtlich, weshalb 2 Tage zur Betrachtung ausreichend waren. Bereits nach einem Tag verlief die Kurve annähernd horizontal und es sind keine großen Veränderungen ausmachbar. Die zu bearbeitende Dateigröße blieb klein und die Rechenzeit halbierte sich.

3.2.3.1 Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht Teil 2

Alle Parameter wurden wie im Kapitel 3.2.2 Zyklischer Heiz-/Kühlvorgang auf das System angewendet, daher wird im Folgendem kaum auf die Beschreibung eingegangen und kann im Bedarfsfall oben nachgelesen werden.

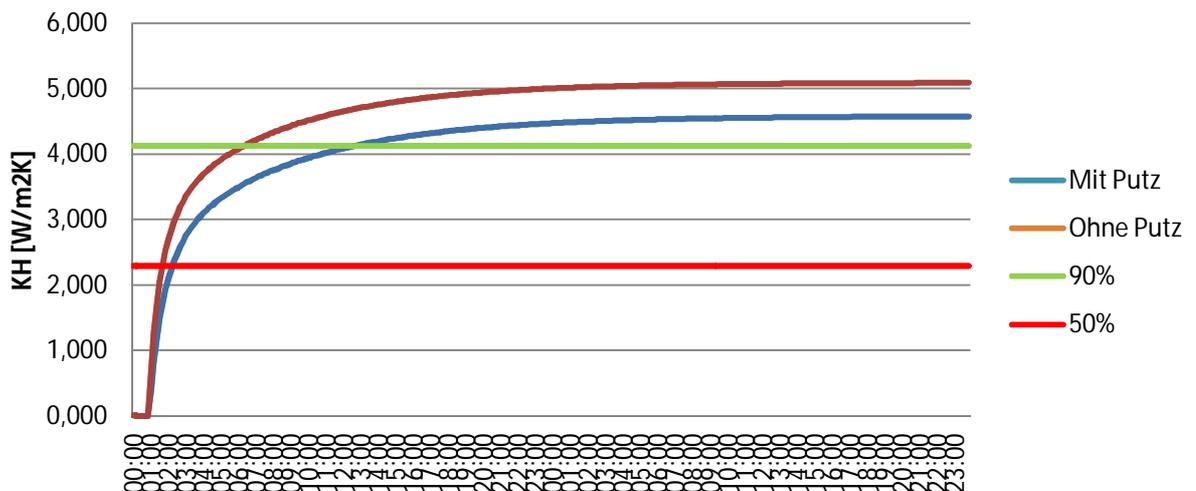


Abb. 33: Ergebnisdarstellung Putz – Permanent An

Der Vergleich einer verputzten und unverputzten Stahlbetonuntersicht, brachte verschiedene Erkenntnisse über das zeitabhängige Verhalten des Systems. Das bekannte Verhalten, dass die Variante „unverputzt“ höhere Abgabeleistungen aufwies, war auch in dieser Simulation gegeben. Zusätzlich ging aus Abbildung 33 hervor, dass die unverputzte Variante nach weniger Zeit die 90 % Marke erreicht. Bei 50 % war die verstrichene Zeit ähnlich.

Tab. 47: Break-Even Time – Putz Teil 2

| | 50% | 90% |
|--|-------|------------------------|
| Zeitpunkt mit Putz | 02:20 | 12:40 |
| Zeitpunkt ohne Putz | 01:40 | 06:20 |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] | 4,579 | $t \Rightarrow \infty$ |

Tabelle 47 zeigt, ab welchen Zeitpunkt die Grenze zu 50 % bzw. 90 % des stationären Ergebnisses erreicht wurde. Augenscheinlich war, dass die Variante ohne Putz ca. die Hälfte der Zeit brauchten als jene mit Putz, um die gesetzten Marken zu erreichen.

- *Eine Variante ohne Putz wirkte sich in dieser Simulation positiv auf das Verhalten des Querschnitts aus. Zum einen wurden höhere Werte erreicht, zum anderen wurden diese Werte schneller erreicht. Festzuhalten ist aber, dass hier lediglich das Verhalten nach Einschalten der Deckenheizung simuliert wurde und nicht auf Abkühlvorgänge eingegangen wurde. Später in dieser Arbeit wird genau auf diese Überlegung eingegangen und zusätzliches zeitabhängiges Verhalten simuliert.*

Der Kühlbetrieb musste separat entschlüsselt werden. Auffallend war, dass obwohl insgesamt höhere Werte für die Kennliniensteigung erzielt wurden, das zeitabhängige Verhalten des Querschnitts nahezu ident zum Heizbetrieb verlief. Für dieses Beispiel wurde die 90 % und 50 % Grenze einer stationären Kühlreferenzvariante mit denselben Parametern wie oben betrachtet.

3.2.3.2 Verschiedene Rohrdurchmesser Teil 2

Wiederum wurde der Fall betrachtet, dass die Heizung von „null“ Leistung eingeschalten wurde und beobachtet, wie viel Zeit notwendig war, um die gewünschten Heizleistungen zu erreichen. Lediglich der Rohrdurchmesser variierte in dieser Betrachtung.

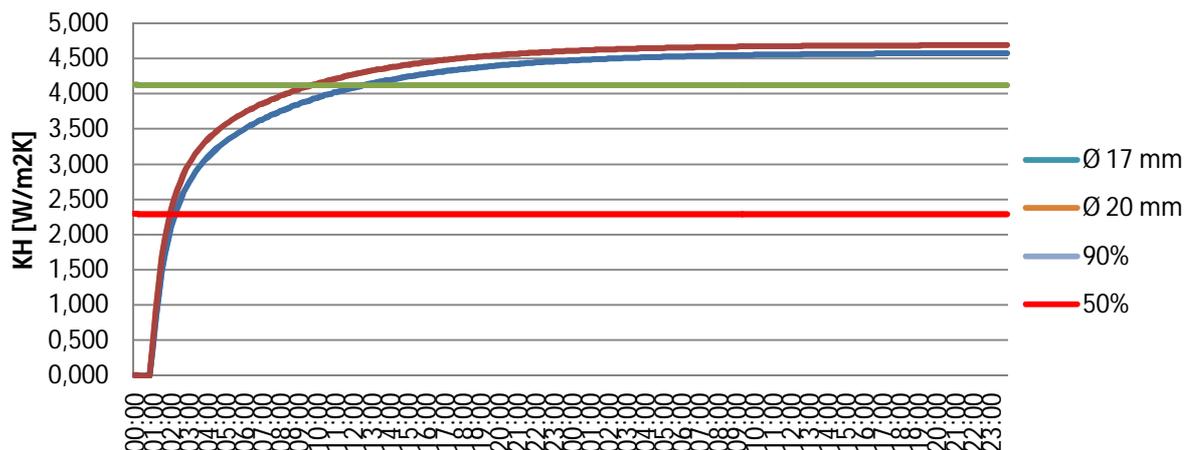


Abb. 34: Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Permanent An

Zu Beginn der Simulation hatten beide Kurven ähnliche Steigungen. Die 50 % Marke wurde fast zeitgleich erreicht. Von diesem Zeitpunkt divergierten die beiden Kurven stärker. Erst nach Erreichen des horizontalen Asts verliefen sie parallel. Die Variante mit einem Rohrdurchmesser von 20 mm wies höhere Werte für die Kennliniensteigung auf.

Tab. 48: Break-Even Time – Rohrdurchmesser Teil 2

| | 50% | 90% |
|---|-------|------------------------|
| Ø 17 | 02:20 | 12:40 |
| Ø 20 | 02:00 | 09:50 |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | $t \Rightarrow \infty$ |

Tabelle 48 verdeutlicht die zuvor erklärte Grafik. Die Werte für den größeren Durchmesser erreichten die 90 % Marke früher als die des kleineren. Für 50 % war de facto kein großer Unterschied auszumachen.

- Das Ergebnis bestätigte und bekräftigte Aussagen die während dieser Arbeit zum Vergleich des Putzes getätigt wurden. Ein größerer Durchmesser hatte einen Einfluss auf die Wärmeabgabeleistung, dies war bereits aus der stationären Analyse sowie dem Zyklus On/Off hervorgegangen. Ein Effekt war zwar auszumachen, der Einfluss auf das Gesamtverhalten war relativ gering. Ähnlich zur Abgabeleistung war die zeitabhängige Betrachtung. Für Erreichen der 90 % Marke bot die hier untersuchte Variante mit 20 mm zwar Vorteile. Der Unterschied betrug aber weniger als 3 Stunden. Für die Auslegung der Heizung kann gesagt, dass man durch die Positionierung der Heizregister weit unten im Querschnitt und gleichzeitiger Erhöhung des Rohrdurchmessers das System weniger träge machte.

- Weitere Untersuchungen von Höhenlage und Durchmesser können Gewissheit darüber bringen, wie einzelne Effekte in Kombination zusammenwirken. Im Rahmen einer Diplomarbeit würde dies aber zu weit führen.

Die Betrachtung des Kühlbetriebs für den Parameter Durchmesser zeigte wiederum ein ähnliches Verhalten wie im Heizbetrieb. Nichts desto weniger fiel auf, dass bei einem bis dato weniger einflussreichen Parameter der zeitabhängige Unterschied divergierte. 90 % der Wärmeabgabeleistung wurden im Mittel 50 Minuten schneller erreicht als im Heizbetrieb. Daraus folgte, dass die Kurven einer Deckenkühlung längere Zeit steiler anstiegen, um die Kennliniensteigung aus der stationären Berechnung zu erreichen, ehe sie am Ende zu einem horizontalen Ast verliefen.

3.2.3.3 Achsabstand – Teil 2

Der nächste zu untersuchende Punkt in diesem Kapitel war der Achsabstand. Dieser hatte sich bereits bei anderen Simulationen in dieser Arbeit, aber auch in anderen vergleichbaren Arbeiten als gewichtiger Punkt herausgestellt, weshalb auf keinen Fall auf ihn verzichtet werden durfte.⁵³⁵⁴

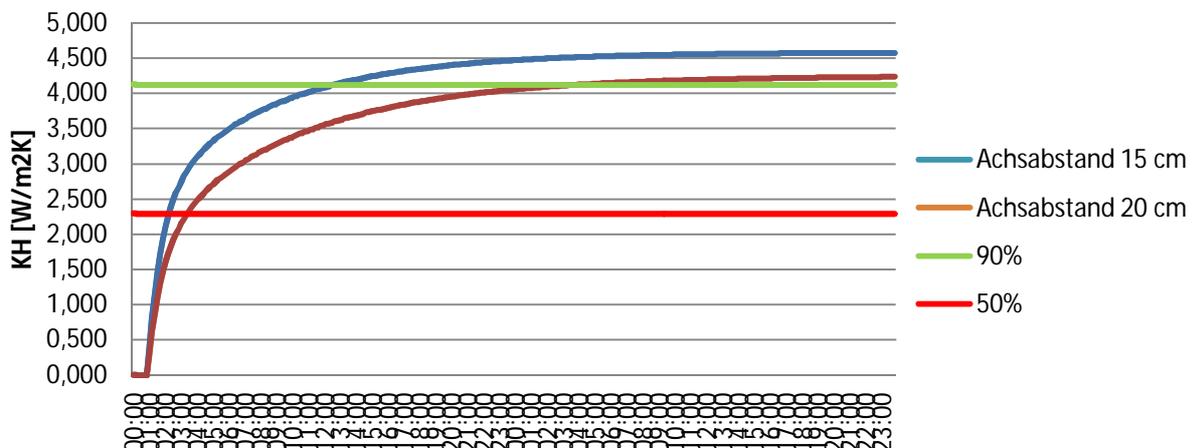


Abb. 35: Ergebnisdarstellung Achsabstand – Permanent An

Auch diese Simulation zeigte, dass der Achsabstand einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtverhalten einer Deckenheizung hat. Beide Kurven divergierten kurz nach Anschalten der Heizung. Bereits bei Erreichen der Hälfte der Leistung waren augenscheinlich Unterschiede auszumachen. 90 % klafften sehr stark auseinander.

⁵³ Vgl. Krec 2015

⁵⁴ Vgl. Friembichler et al. 2016

Tab. 49: Break-Even Time – Achsabstand Teil 2

| | 50% | 90% |
|---|-------|------------------------|
| Achsabstand 15 cm | 02:20 | 12:40 |
| Achsabstand 20 cm | 03:40 | 03:50 (Tag 2) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | $t \Rightarrow \infty$ |

Tabelle 49 gibt in Zahlen wieder, was vorher beschrieben wurde. Ein Effekt war so deutlich wie bei bisher keinem anderen untersuchten Parameter ersichtlich. 50 % Heizleistung wurden unterschiedlich schnell erreicht, die Variante mit 20 cm Achsabstand benötigte hierfür 80 Minuten länger. Richtig beachtlich wurde der Effekt bei Betrachtung der höher gesetzten Grenze. 90 % wurden erst nach 15 Stunden und 10 Minuten erreicht. In Kombination mit der Betrachtung der Gesamtabgabeleistung aus der stationären Berechnung wurde deutlich, welcher großen Einfluss dieser Parameter hat.

Wie bereits aus anderen Untersuchungen für diesen Parameter hervorging, war der Einfluss des Achsabstands vergleichsweise groß. Dies traf auch im Zusammenhang mit dem Kühlbetrieb zu. Zum einen zeigten die Ergebnisse für einen Achsabstand von 15 cm und 20 cm einen deutlichen Unterschied, was bei dieser Simulation neu war und genauer betrachtet wurde, ist das zeitabhängige Verhalten der Decke.

Tab. 50: Break-Even Time – Achsabstand Teil 2 Kühlung

| | 50% | 90% |
|---|-------|------------------------|
| Achsabstand 15 cm | 02:10 | 12:00 |
| Achsabstand 20 cm | 03:10 | 19:10 (Tag 2) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 6,402 | $t \Rightarrow \infty$ |

Die Werte für die 50 % Marke waren ähnlich zu den Ergebnissen aus dem Heizbetrieb. Ein sehr großer Unterschied zeigte sich für die Betrachtung des Achsabstands von 20 cm und der 90 % Grenze. Diese wurde im Fall der Kühlung am zweiten Tag nach 19 Stunden und 10 Minuten erreicht. Das Heizsystem benötigte für das Erreichen der 90 % Marke 15 Stunden und 20 Minuten weniger. Das offenbarte wiederum den bekannten Trend, dass durch höhere Werte für die Abgabeleistung Effekte noch deutlicher zum Vorschein kommen.

3.2.3.4 Wirtschaftlicher Aspekt des Achsabstands - Exkurs

Diese Diplomarbeit ist eng mit den Interessen der Wirtschaft verknüpft. Daher wird an dieser Stelle ein Vergleich gezeigt, um mögliche Einsparpotentiale aufzuzeigen. Das „Blue Living“ Projekt in Grödig sollte mit einer flächig verlegten Deckenheizung ausgestattet werden. Dadurch wurde ein großes Einsparpotential hinsichtlich der Energieeffizienz erwartet. Im vorher besprochenen Kapitel wurde deutlich, dass der Achsabstand der Rohrregister ein wesentlicher Faktor bei der Dimensionierung und Auslegung der Heizung spielt. Die Laufmeteranzahl der Heizregister, sowie andere Angaben zu diesem Beispiel wurden einem CAD Programm entnommen.

Ziel ist es, ähnlich zu CAD Programmen, die nach Festlegen einiger Parameter imstande sind, selbständig die Bewehrungseisen zu verteilen, ein ähnliches automatisiertes Verfahren für die Heizregister einzuführen. Nach Eingabe der Geometrie, Spannrichtung und Randabstände sollte eine solche Verlegung für die einzelnen Elemente kein Problem darstellen. Ein noch zu diskutierender Punkt sind die Anschlüsse der einzelnen Platten. Hier muss auf die gesamte Geometrie der Decke eingegangen werden und klug ausgewählte Anschlusspunkte gefunden werden. Eine Möglichkeit dies in den Griff zu bekommen, ist die Einführung von weiteren Parametern. Eine Platte behält stur die Geometrie der Rohrregister und wird lediglich mit der Information versehen an welcher Kante und in welchem Eck die Leitungsführung die Platte verlassen soll. Das angrenzende Element muss die Leitungsführung dann auf die erste anpassen. Mit einem geschickten Programmiercode und etwas Entwicklungszeit sollte ein solches Tool implementierbar sein.

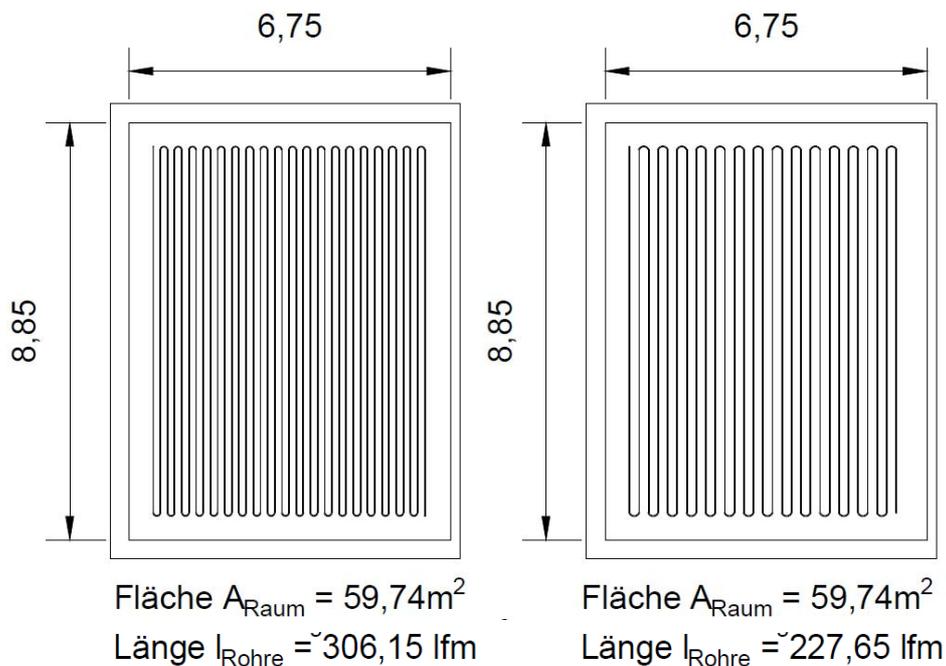


Abb. 36: Darstellung der geometrischen Differenzen

Der in Abbildung 36 dargestellte Musterraum diente zur Illustration für das Gebäude. Dabei handelte es sich um einen 3 geschossigen Wohnbau und einen nicht beheizten Keller. Erdgeschoss und Obergeschoss hatten dabei dieselbe Anordnung von Räumen. Die Raumgeometrie entsprach die des in Abbildung 36 dargestellten. Pro Ebene befanden sich 4 solcher Räume. Das Dachgeschoss hatte eine abgeänderte Geometrie. Damit das Beispiel möglichst einfach gehalten wurde, wurde auch hier vom selben Grundriss ausgegangen.

- Bei der Recherche der Kosten für die Heizrohre wurden mehrere verschiedene Werte für ein Rohr 17x2 mm gefunden. Unter anderem wurden auch direkt Preise von Anbietern eingeholt. Da diese teils stark variierten, wurde der gefundene Minimalwert und Maximalwert betrachtet. Setzte man für ein Heizrohr einen Preis von 1,95 - 2,35 € pro Meter an, errechneten sich folgende Kosten:⁵⁵
 - o Für 3 Geschosse und 4 Räume pro Ebene erhielt man für einen Achsabstand von 15 cm einen minimalen Preis von 7163,91 €, bei einem Laufmeterpreis von 2,35 € errechneten sich die Materialkosten zu 8833,43 €
 - o Der Vergleich von einem 20 cm verlegten Rohrregister Achsabstand brachte für den Preis von 1,95 € die Gesamtsumme der Materialkosten auf 5327,01 € und bei 2,35 €/lfm beliefen sich die Kosten auf 6419,73 €
 - o Wenn man die teure Variante verglich, lag ein Einsparpotential der Materialkosten von 2413,70 € vor. Die günstige Variante war bei 1836,90 €
 - o Die hier dargestellten Kosten bezogen sich nur auf die Materialkosten, nicht auf die Arbeitszeit. Diese Darstellung ist möglich, wenn man bedenkt, dass das Einlegen von durchschnittlich 10 Rohren mehr pro Decke, einen eher kleinen zeitlichen Mehraufwand in Fertigteilbauweise bedeutet. Außerdem waren keine zusätzlichen Kosten durch Ventile, etwaige Distanzstreifen und Abstandhalter oder sonstigen anfallenden Kosten berücksichtigt worden, lediglich die Preise der Rohre.
 - o Die Kosten der Materialien beliefen sich somit auf einen Quadratmeterpreis bei einem Achsabstand von 15 cm auf 13,65 € bei der günstigen Variante und 16,45 € bei der teuren.
 - o Bei einem Achsabstand von 20 cm errechneten sich die Quadratmeterpreise auf 11,70 € und 14,10 €. Damit ergab sich eine Kostenreduktion im Mittel um 2,15 € pro Quadratmeter thermisch aktivierter Deckenfläche.

Es wurden die möglichen Materialkosten für ein Projekt dargestellt. Im Mittel lag bei dem vorgestellten Beispiel ein Einsparpotential von 26,48 % der Materialkosten vor. Bei richtiger Auslegung und Dimensionierung von Heizungen sind wirtschaftlich positive Auswirkungen zu erzielen.

⁵⁵ Vgl. Rehau GmbH 2017

Ein weiterer interessanter zu untersuchender Punkt ist, wie sich der Achsabstand auf die Heizkosten auswirken könnte. Bei richtiger Dimensionierung der Anlage sind hier ebenfalls Einsparpotentiale vorhanden. Diese Thematik kann jedoch nicht in dieser Arbeit untersucht werden, da dies den Umfang der Arbeit überschreiten würde.

3.2.3.5 Verschiedene Deckenstärken – Teil 2

Als nächster Parameter innerhalb dieses Kapitels wurden verschiedene Deckenstärken untersucht. Dabei wurden die Parameter wie auch schon in den anderen Kapiteln im Vergleich zum Zyklus On/Off nicht verändert.

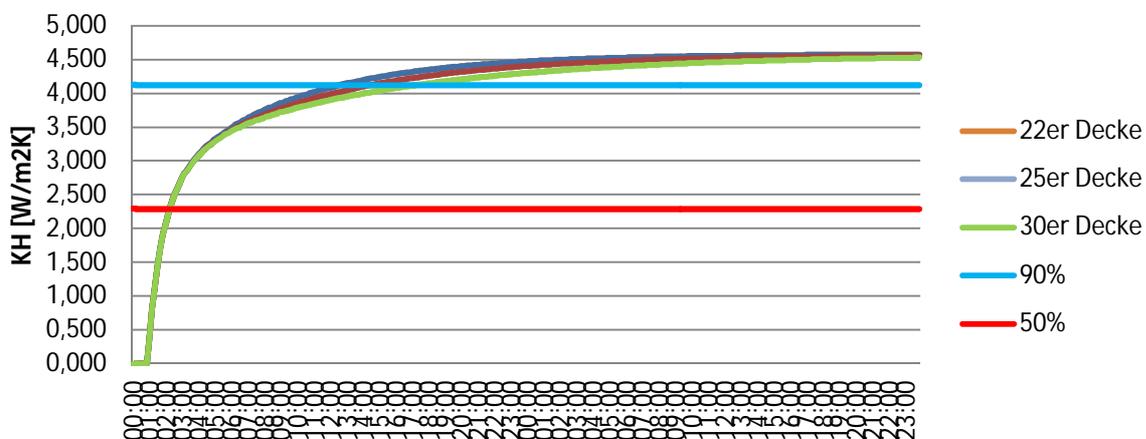


Abb. 37: Ergebnisdarstellung Deckenstärke – Permanent An

Innerhalb der ersten Stunden nach Anschalten der Heizung, verliefen alle 3 Kurven annähernd ident. Erst nach ca. 6 Stunden änderten sich die Kurven kurzzeitig, um am Ende bei Erreichen des horizontalen Asts und damit der maximalen Leistungsabgabe, wieder fast idente Werte aufzuweisen.

Tab. 51: Break-Even Time – Deckenstärke Teil 2

| | 50% | 90% |
|---|-------|------------------------|
| 22er Decke | 02:20 | 12:40 |
| 25er Decke | 02:20 | 14:30 |
| 30er Decke | 02:20 | 17:20 |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | $t \Rightarrow \infty$ |

In Tabelle 51 werden die zeitlichen Unterschiede deutlich. Wie bereits erwähnt, verliefen die Kurven bis zum Erreichen der 50 % Marke ident. Egal welche Deckenstärke betrachtet wurde, die Abgabeleistung erreichten alle 3 Systeme nach 2 Stunden und 20 Minuten. Die

Betrachtung der 90 % Marke zeigte aber deutliche Differenzen. Während bei einer 22 cm hohen Stahlbetondecke die Leistung nach etwas mehr als einem halben Tag nach einschalten der Heizung erreicht wurde, war das Erreichen der 90 % Marke bei Betrachtung eines 30 cm Normalbetonquerschnitts erst 5 Stunden später vollbracht. Die Auswirkungen der Materialeigenschaften des Betons wurden hier wieder deutlich, bei gleichen Randbedingungen wurde mehr Energie in Form von Wärme in den Querschnitt befördert, das System war daher träger. Würde man die Heizung wie bei den stationären Berechnungen dauerhaft eingeschaltet lassen, stellen sich annähernd gleiche Werte für die Abgabeleistung ein.

- *Wie bereits bei den anderen Betrachtungen der Deckenstärken dieser Höhenposition knapp ober der Stahlbetonunterkante, waren keine großen Unterschiede auszumachen. Die Untersuchung des Parameters, zeigte trotzdem Unterschiede auf. Eine Erhöhung der Deckenstärke machte das System träge, die Abgabeleistung war während kurzer Zeit niedriger. Auch wenn damit keine Leistungseinbußen zu erwarten sind, sollten sich Fachplaner dieses Effekts bewusst sein.*

Wie bereits bei der Betrachtung des Zyklus On/Off sollte auch hier der Unterschied verdeutlicht werden, wenn die Rohrregister 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante lagen. Für die Betrachtung von verschiedenen Deckenstärken war diese Untersuchung von besonderem Interesse, weil augenscheinlich keine großen Unterschiede bei der Positionierung weit unten im Querschnitt auftraten. Aufgrund der geometrischen Lage der Rohrregister, waren bei dieser Variante Differenzen zu erwarten.

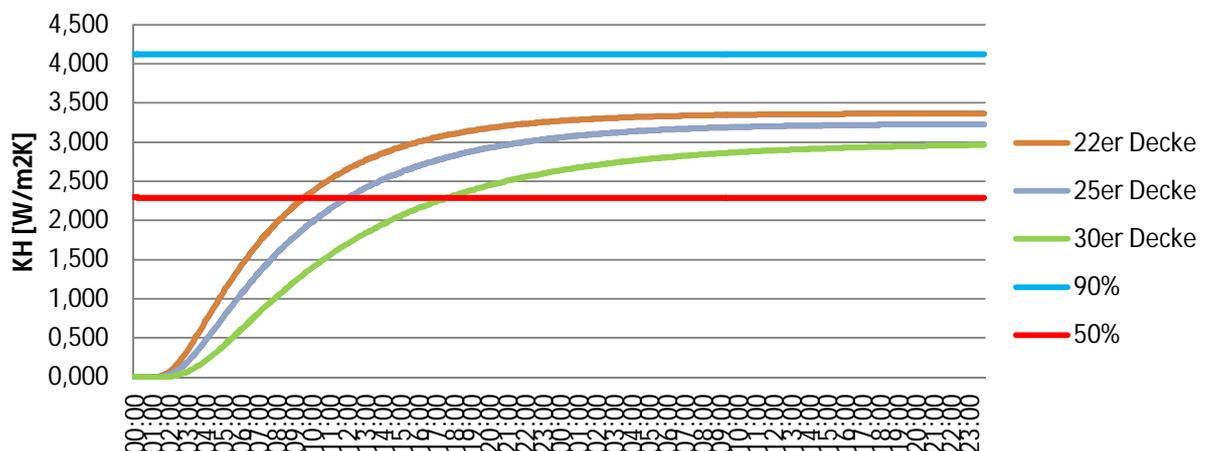


Abb. 38: Ergebnisdarstellung Deckenstärken 3 cm Deckung oben – Permanent An

Zunächst fiel sofort auf, dass 90 % der Abgabeleistung von keinen der 3 untersuchten Deckenstärkenvarianten erzielt wurde. Die 50 % Marke wurde zwar erreicht, jedoch deutlich später als bei weniger Deckung. Die einzelnen Kurven zeigen 3 verschiedene Steigungen.

Tab. 52: Break-Even Time – Deckenstärke 3 cm Deckung oben Teil 2

| | 50% | 90% |
|--|-------|------------------------|
| 22er Decke | 09:40 | - |
| 25er Decke | 12:10 | - |
| 30er Decke | 17:40 | - |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] | 4,579 | $t \Rightarrow \infty$ |

Tabelle 52 unterstreicht die zuvor getätigten Aussagen mit Zahlenwerten. Während die 90 % Marke von keiner untersuchten Deckenstärke erreicht wurde, waren bereits bei 50 % Leistung große Zeitverschiebungen zu erkennen. Die 22 cm Deckenvariante benötigte 8 Stunden weniger als eine 30 cm Decke für diese Marke. Was bereits zuvor bei geringer Deckung erkennbar wurde, trat hier noch deutlicher auf.

- *Das Verhalten des Gesamtsystems bei größeren Deckendicken war träger als bei niedrigeren. Für Kunden und Endnutzer entstehen hierbei längere Wartezeiten bis sich gewünschte Temperaturen im Raum einstellen.*
- *Die Untersuchung von weiteren Deckenstärken würde das Ergebnis zwar verfeinern, neue Erkenntnisse über das thermische Verhalten werden aber nicht gewonnen, sofern die Parameter nicht deutlich abgeändert werden. Detailuntersuchungen könnten für gewisse Projekte von Interesse sein, wenn mehr Details zum Heizsystem notwendig sind. Da eine Systemeingabe und Untersuchung wie diese viel Zeit beansprucht, wird in der Praxis darauf verzichtet werden und sich auf Ergebnisse aus Arbeiten wie dieser gestützt.*

Wird hier ein Kühlsystem genauer betrachtet, sind folgende Beobachtungen zu machen. Für eine Positionierung weit unten im Querschnitt wurden die geforderten Grenzwerte der 90 % und 50 % Marke schneller erreicht als im Vergleich zur Heizung. Dies galt für alle Deckenstärken und wurde bei 30 cm am deutlichsten. Bei einer Höhenlage ganz oben im Querschnitt hingegen zeigte sich, dass die Querschnitte länger brauchten, um die geforderten Kühltemperaturen zu erreichen. Die 90 % Grenze wurde bei dieser Position von keinem der drei untersuchten Deckenquerschnitte erreicht. Daraus ließ sich schließen, dass der Einfluss der Höhenlage bei den hier untersuchten Varianten deutlicher zur Geltung kommt. Es wurde die Leistungsfähigkeit erhöht und die thermische Trägheit bei einer geringen Deckung verringert. Durch die höheren Werte des Kühlsystems kam dieser Effekt noch deutlicher zur Geltung. Im Gegensatz dazu zeigte sich, dass durch die Positionierung weit oben im Querschnitt sich genau dieser Effekt umkehren kann. Die Kühlung wies nach wie vor höhere Abgabewerte auf als die Heizung, benötigte aber, aufgrund der Höhenlage, länger um den gesamten Querschnitt zu kühlen.

3.2.3.6 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC – Teil 2

Materialien sind wie bereits öfters während dieser Arbeit erwähnt für die Fertigteilbauweise von untergeordnetem Interesse. Nichts desto weniger wurde diesem Parameter Aufmerksamkeit gewidmet.

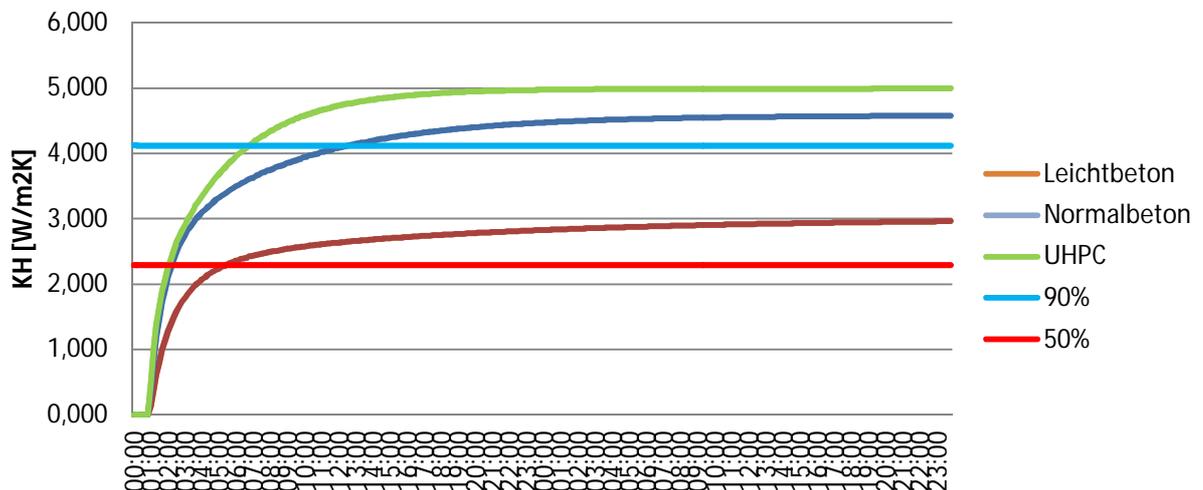


Abb. 39: Ergebnisdarstellung Materialien – Permanent An

Wie in den anderen betrachteten Untersuchungen hatte wiederum der UHPC die höchsten Werte für die Kennliniensteigung, gefolgt von Normalbeton und Leichtbeton. Interessanterweise hatten alle 3 Kurven im Zeitraum kurz nach Einschalten der Heizung ähnliche Steigungen. Nach circa 2 Stunden veränderte sich das Verhalten des Leichtbetons. Nach 4 Stunden veränderte auch die Normalbeton Kurve ihre Steigung. Nach Erreichen des horizontalen Asts verliefen die Kurven wieder parallel und hatten annähernd dieselben Differenzen aufzuweisen wie bei der Untersuchung im stationären Fall.

Tab. 53: Break-Even Time – Materialien Teil 2

| | 50% | 90% |
|---|-------|------------------------|
| Leichtbeton | 05:40 | - |
| Normalbeton | 02:20 | 12:40 |
| UHPC | 02:10 | 06:50 |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m^2K] | 4,579 | $t \Rightarrow \infty$ |

| | Stationär | Instationär | Unterschied in Prozent |
|-------------------------------------|-----------|-------------|------------------------|
| Differenz Leichtbeton - Normalbeton | 1,570 | 1,614 | 0,87% |
| Differenz Leichtbeton - UHPC | 2,009 | 2,029 | 0,40% |
| Differenz Normalbeton - UHPC | 0,439 | 0,416 | 0,47% |

Hier dargestellt sind die Unterschiede bezüglich der Zeit und der Unterschied zum stationären Vergleich. Die Prozentwerte bezogen sich hier auf den relativen Unterschied der Ergebnisse aus der stationären und instationären Berechnung, das Maximum wurde aus den stationären Berechnungen verwendet. Die Variante Leichtbeton erreichte die 90 % Hürde nicht, auch bei 50 % benötigte diese Variante deutlich länger als Normalbeton und UHPC. Die beiden anderen Varianten waren bis zu 50 % fast ident, danach flachte die Kurve des Normalbetons schneller ab, weshalb auch die 90 % Marke um 5 Stunden und 50 Minuten langsamer erreicht wurde als beim UHPC. Diese Effekte hingen stark mit den spezifischen Materialeigenschaften zusammen, welche bereits in Kapitel 2.2.6 Materialien - Leichtbeton Normalbeton und UHPC beschrieben wurden.

- *Die Verwendung von verschiedenen Materialien hatte sehr große Einwirkung auf das Gesamtsystem und sein Verhalten. Obgleich die Anwendung dieser Varianten selten ausgeführt wird, war es trotzdem von Interesse, wie sich die Materialien bei Veränderung der spezifischen Eigenschaften veränderten. Sollten beispielsweise Planer und Ingenieure die Materialeigenschaften durch Zusatzmittel und Zusatzstoffe modifizieren, müssen die hier dargestellten Effekte bedacht werden und es kann sich auf diese Arbeit gestützt werden.⁵⁶⁵⁷*

Werden die Materialien mit einer Kühlung simuliert, ergaben sich keine großen Änderungen. Die qualitativen Aussagen aus dem Heizbetrieb trafen hier genauso zu. Die Werte für die Kühlung waren wiederum etwas höher als die beim Heizbetrieb. Das zeitabhängige Verhalten des Systems bei Normalbeton und UHPC zeigte keine großen Unterschiede, eine

⁵⁶ Vgl. ÖNORM B 4710-1: 2007 10 01

⁵⁷ Vgl. ÖNORM EN 206: 2017 05 01

maximale Differenz betrug 1 Stunde. Die Materialeigenschaften, und hier im Speziellen die Wärmeleitfähigkeit, von Leichtbeton wirkten sich mehr auf das Ergebnis aus. Die Kühlung benötigte 3 Stunden und 10 Minuten länger um die 50 % Grenze zu erreichen als die Heizung. Damit kann man sagen, dass die vergleichsweise hohen Werte für die Wärmeleitfähigkeit des Normalbetons und UHPC für das Aufwärm- bzw. Abkühlverhalten keinen großen Einfluss hatten, hingegen niedrige Werte die thermische Trägheit beeinflussten.

3.2.3.7 Höhenlage – Teil 2

Den Abschluss dieses Teils der Untersuchungen bildet wie schon zuvor die Betrachtung der Höhenlage. Aus den stationären und den bereits dargestellten instationären Ergebnissen waren bereits Erwartungshaltungen geschaffen, dass Varianten mit hoher Deckung mehr Zeit benötigten, um sich vollständig zu erwärmen. Dies soll im Folgenden illustriert und diskutiert werden.

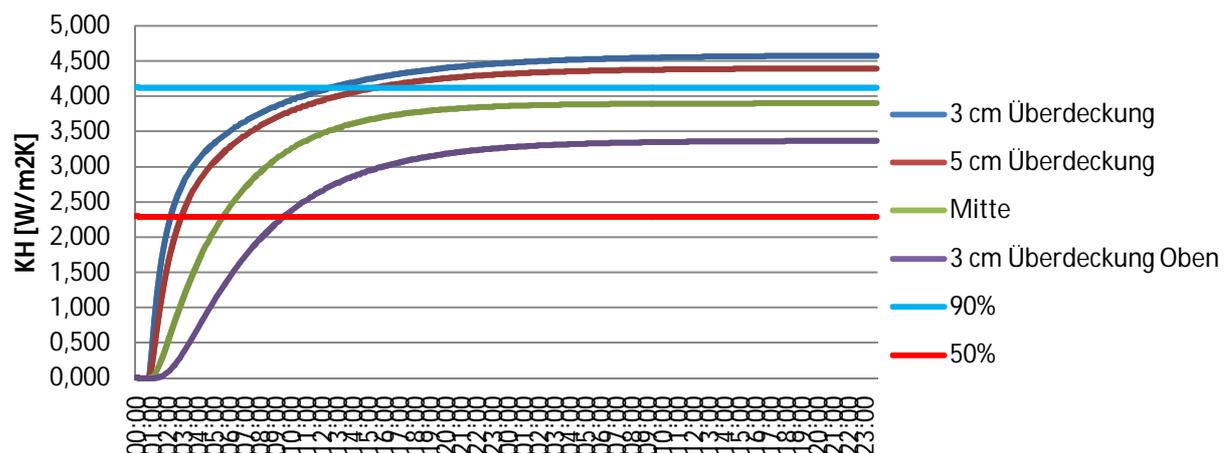


Abb. 40: Ergebnisdarstellung Höhenlage – Permanent An

In Abbildung 40 werden alle Ergebnisse der Höhenlage dargestellt. Auf den ersten Blick waren die Unterschiede hinsichtlich der Wärmeabgabeleistung auszumachen. Ebenfalls augenscheinlich war, dass Varianten mit hoher Deckung länger brauchten um die dargestellten Grenzwerte zu überschreiten. So erreichten weder die Position in der Mitte des Querschnitts noch die Position 3 cm Überdeckung oben die 90 % Marke.

Tab. 54: Break-Even Time – Höhenlage Teil 2

| | 50% | 90% |
|---|-------|------------------------|
| 3 cm Deckung | 02:20 | 12:40 |
| 5 cm Deckung | 03:00 | 15:30 |
| Mitte | 05:40 | - |
| 3 cm Deckung oben | 09:40 | - |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | $t \Rightarrow \infty$ |

Auch hier wird wieder mit Zahlen unterstrichen was zuvor grafisch dargestellt wurde. Während sich das Verhalten bei geringer Deckung von 3 cm und 5 cm ähnelte, zeigten die anderen Varianten deutliche Unterschiede. Betrachtet man die beiden Extrempositionen, wurde die 50 % Grenze erst um 7 Stunden und 20 Minuten später erreicht.

- *Für die Betrachtung der Höhenlage und dem instationären Fall, dass die Heizung von keiner Leistung auf Vollbetrieb gestartet wurde, muss gesagt werden, dass Varianten mit geringer Deckung zum einen schneller gewünschte Abgabeleistungen brachten, andererseits aber auch allgemein höhere Abgabeleistungen mit aufwiesen. Aus den bisher betrachteten Untersuchungen, war kein Einwand gegen eine Positionierung weit unten im Querschnitt zu vermerken. Für die Auslegung einer Heizung muss man sich bewusst sein, dass bei der Positionierung weit unten im Querschnitt ein höherer Wert für die Kennliniensteigung vorhanden ist.*

Die bisher betrachteten Höhenlagen, zeigten allesamt, dass die Positionierung weit unten im Querschnitt positive Effekte mit sich bringen und in der zyklischen Betrachtung zumindest keinen Nachteil. Um das Verhalten des Betons vollends beschreiben zu können, ist aber auch die Betrachtung des Speichervermögens ein zentraler Punkt. Zwar wurden während der zyklischen Untersuchung bereits einige Erkenntnisse gewonnen, eine detaillierte Beschreibung der Auskühlvorgänge ist aber erforderlich. Diese wird im folgenden Kapitel genauer behandelt.

Vergleicht man die Höhenposition mit einer Deckenkühlung erhält man keine zusätzlichen Erkenntnisse. Die Veränderung der Randbedingung hatte annähernd keinen Einfluss auf das Verhalten des Querschnitts. Es waren zwar die Werte für die Kennliniensteigung wieder höher, das zeitabhängige Verhalten war annähernd ident. Daher wurde nicht näher auf diesen Fall eingegangen.

3.2.4 Permanent Aus

Abschließend werden hier noch einmal die verschiedenen Parameter überprüft. Der Unterschied ist aber, dass die Heizung nach 100 % Leistung plötzlich ausgeschaltet wird. Ziel dieses Kapitels ist, die Abkühlvorgänge der untersuchten Querschnitte zu beschreiben und herauszufinden, welche Varianten günstig für das Gesamtverhalten sind.

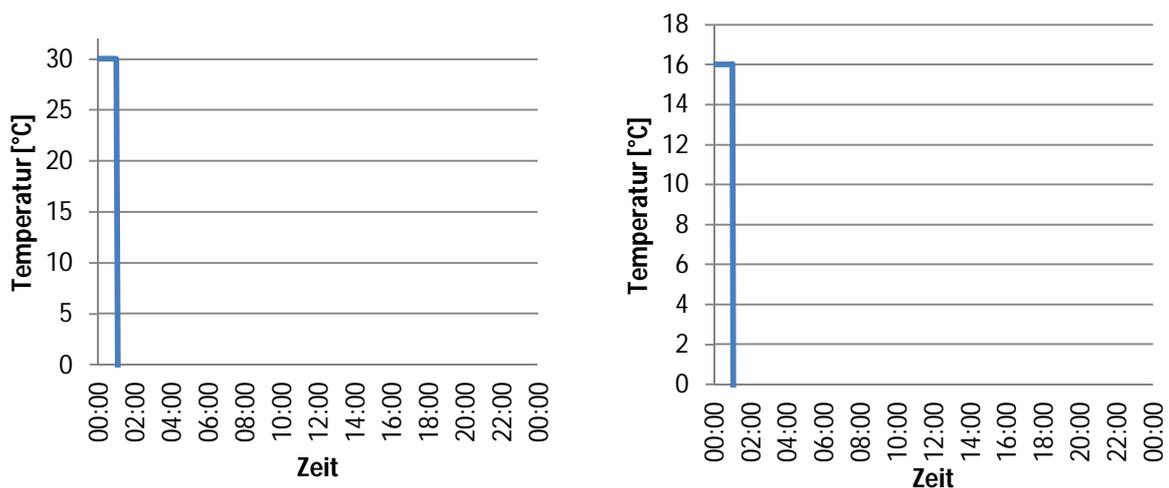


Abb. 41: Verlauf des Zyklus "Permanent Aus" der Heiz- (links) und Kühltemperatur (rechts) des Heizmediums °C

Plakativ sollen in Abbildung 41 die beiden Verläufe der instationären Funktion dargestellt werden. Durch eine Besonderheit des Programms HT-Flux sind die im folgendem vorgestellten Kapitel Ergebnisse einzigartig. Im Vergleich zu bestehenden Arbeiten ist ein adiabater Zustand im inneren Rohr des Rohres für das Verhalten nach Abschalten der Heizung simuliert worden. Das Programm berücksichtigt das Heizmedium so, als wäre es nicht mehr vorhanden. Damit lässt sich die Speicherfähigkeit des Betons noch genauer beschreiben. Es muss gesagt werden, dass diese Untersuchung nicht vollends die Realität darstellt, da in den Rohrregistern das Medium immer vorhanden ist, damit aber ständig eine Randbedingung im inneren des Querschnitts gegeben ist.

Ähnlich zum Kapitel 3.2.3 Permanent An wurden wieder Grenzwerte eines Referenzquerschnitts gewählt. Der Referenzquerschnitt entspricht dem oben angeführten. Zusätzlich zum Unterschreiten der 90 % und 50 % Grenze der Kennliniensteigung wird die 10 % Marke eingeführt, um zu prüfen, wie viel Zeit benötigt wurde um diesen Wert zu erreichen.

Zusätzlich zu den bekannten Materialeigenschaften war die spezifische Wärmekapazität von großer Bedeutung in diesem Kapitel. Sie war verantwortlich für die zu erwartenden Effekte eines betonkernaktivierten Deckensystems.

3.2.4.1 Verputzte/unverputzte Stahlbetonuntersicht – Teil 3

Zu Beginn wurde der Einfluss einer Putzschicht auf die Wärmeabgabeleistung und die im instationären Fall zeitabhängigen Unterschiede aufgezeigt. Die Parameter wurden wie in Kapitel „3.2.2.1 Verputzten/unverputzte Stahlbetonuntersicht“ beschrieben und können dort nachgelesen werden.

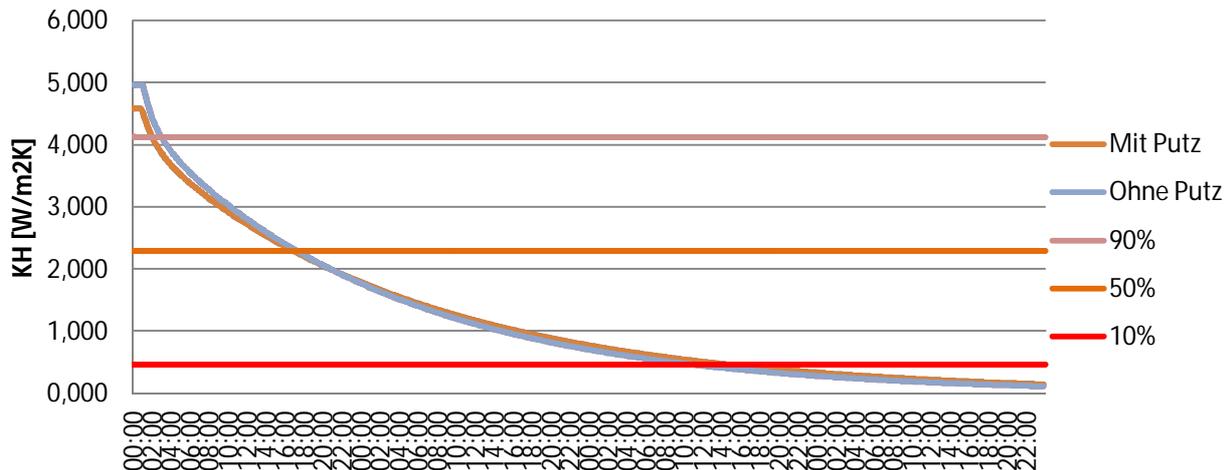


Abb. 42: Ergebnisdarstellung Putz – Permanent Aus

Die Kurven der verputzten und unverputzten Variante, hatten zu Beginn die Differenz, die bereits aus der stationären Berechnung bekannt ist. Nach Abschalten der Heizung fielen beide Kurven. Die Kurve der unverputzten Variante sank dabei schneller.

Tab. 55: Break-Even Time – Putz Teil 3

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| Zeitpunkt mit Putz | 01:10 | 16:00 | 14:50 (Tag 3) |
| Zeitpunkt ohne Putz | 02:00 | 16:20 | 10:20 (Tag 3) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | | $t \Rightarrow \infty$ |

Die Zahlenwerte aus Tabelle 55 verdeutlichen dieses Ergebnis. 90 % der festgesetzten Grenze des Standardfalls, wurden schneller von der Variante mit Putz erreicht. Bei 50 % verging annähernd dieselbe Zeit für beide untersuchten Möglichkeiten und bei Betrachtung der 10 % Grenze benötigte die Variante mit Putz 4 Stunden und 30 Minuten länger.

- *Beim Betrachten des Abkühlvorgangs wurde der Einfluss des Putzes deutlich. Zwar wurden bei einer verputzten Deckenuntersicht nicht dieselben Wärmeabgabewerte erreicht, wie bei einer unverputzten, bei der zeitlichen Betrachtung in diesem Beispiel, half der Putz, die vorhandene Wärme im Querschnitt länger zu speichern. Selbst ein geringer Einfluss wie 1 cm Putzschicht machte dies deutlich.*
- *Dieser Effekt hatte in dieser Untersuchung einen Einfluss auf das Gesamtsystem. Durch geschickte Anwendung im Bedarfsfall konnten hier positive Effekte verstärkt und angewendet werden. Wird beispielsweise weniger Abgabeleistung benötigt, kann durch Aufbringen einer Putzschicht, bei anfänglich gleichem Energiebedarf für das Heizmedium, die Wärme im Querschnitt länger gespeichert werden. Andererseits können durch Sichtbetonflächen höhere Werte für die Heizleistung erzielt werden, wenn die Speicherwirkung nicht im Vordergrund steht und dabei andere Ressourcen eingespart werden.*

Zurückzuführen war dieses Ergebnis auf die Materialeigenschaften des Putzes und hier im Besonderen auf die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Putz}} = 0,98 \text{ W/mK}$. Einerseits war sie für die anfängliche Differenz der Kennliniensteigung verantwortlich, andererseits blieb die Energie länger im Querschnitt gespeichert, sie wirkte als Dämmschicht.

Die Deckenkühlung im Vergleich zeigte höhere Start-Werte für die Kennliniensteigung, was bereits aus den stationären Vergleichen bekannt ist. Wiederum bestätigten sich Trends und getätigte Aussagen von oben. Das zeitabhängige Verhalten zeigte aber Unterschiede zwischen Heiz und Kühlbetrieb. Obwohl die 90 % Grenze von Heizung und Kühlung bezogen auf ihre Referenzvariante ähnlich schnell unterschritten wurden, zeigte sich bereits bei der 50 % Marke, dass bei einer Kühlung schneller weniger Leistung vorhanden ist. Im Mittel betrug das für beide untersuchten Varianten 5 Stunden und 15 Minuten. Für die Betrachtung der 10 % Grenze stellte die Bildung des arithmetischen Mittels keine adäquate Lösung dar, da die verputzte und unverputzte Variante stark voneinander abwichen. Der maximale Unterschied zwischen den beiden Varianten betrug bei der Kühlung 3 Stunden und 50 Minuten.

3.2.4.2 Verschiedene Rohrdurchmesser – Teil 3

Verschiedene Durchmesser im Querschnitt, hatten in den bisherigen Betrachtungen geringe Effekte nach sich gezogen. Die Erwartungshaltung, ob größere Effekte für die Untersuchung im Fall „Permanent Aus“ auszumachen sind, war klein. Die Parameter des Versuchs sind oben nachzulesen.

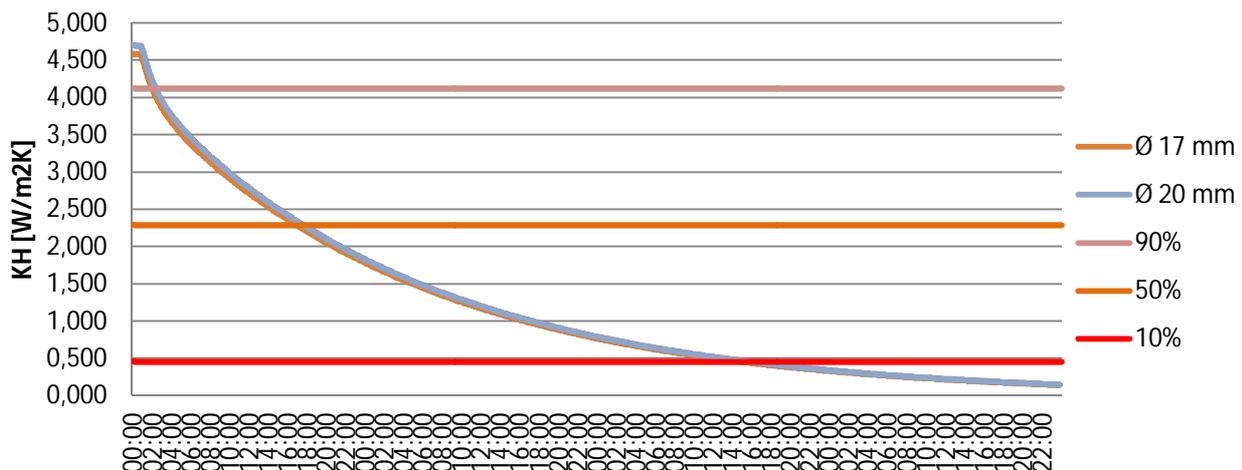


Abb. 43: Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Permanent Aus

Die anfängliche Erwartungshaltung wurde hier bestätigt. Der Einfluss des Durchmessers war in dieser Grafik fast nicht auszumachen. Obwohl die Variante mit Durchmesser 20 mm zu Beginn einen höheren Wert aufwies, ist der Abkühlvorgang annähernd identisch beschreibbar. Bereits wenige Minuten nach Abschalten der Heizung verlor der anfängliche leicht positive Effekt seine Wirkung und die Kurven glichen einander.

Tab. 56: Break-Even Time – Rohrdurchmesser Teil 3

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| Ø 17 | 01:10 | 16:00 | 14:50 (Tag 3) |
| Ø 20 | 01:30 | 16:40 | 14:40 (Tag 3) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | | $t \Rightarrow \infty$ |

Hier dargestellt sind die gemessenen Zeiten, wann die beiden Varianten so abkühlen, dass sie 90 %, 50 % und 10 % der Standardleistung erreicht haben. Deutlich wurde, dass annähernd kein Unterschied auszumachen ist.

- Mit einem maximalen zeitlichen Unterschied von 40 Minuten, beweist dieses Ergebnis, was bereits aus den anderen Berechnungen zu diesem Parameter hervorgegangen ist. Ein Unterschied der einzelnen Rohrdurchmesser war kaum auszumachen, weshalb der Effekt gering bleibt.
- Insgesamt kann gesagt werden, dass eine Erhöhung der Rohrdurchmesser, eventuell Mehrkosten nach sich zieht, aber keine Verbesserung oder Verschlechterung des thermischen Verhaltens mit sich bringt. Dieser Effekt kann aus dieser Betrachtung vernachlässigt werden.
- Die Effekte lassen sich wie in Kapitel „2.2.3 Verschiedene Rohrdurchmesser“ beschreiben. Die Querschnittfläche der Rohrregister ist im

Vergleich zum umgebenden Betonquerschnitt so klein, dass eine Erhöhung um 3 mm wenig am Verhalten ändert.

Es zeigte sich, dass sich die Kühlung schneller erwärmte, als die Heizung abkühlte. 90 % der Werte wurden annähernd gleich schnell unterschritten, aber bereits bei 50 % zeigte sich, dass die Kurve der Kühlung schneller fiel. Ansonsten gelten qualitative Aussagen von zuvor auch für den Kühlbetrieb.

3.2.4.3 Achsabstand – Teil 3

Der nächste zu untersuchende Parameter, waren die Achsabstände. Die Randbedingungen sind wie weiter oben für die anderen instationären Untersuchungen gleich gehalten.

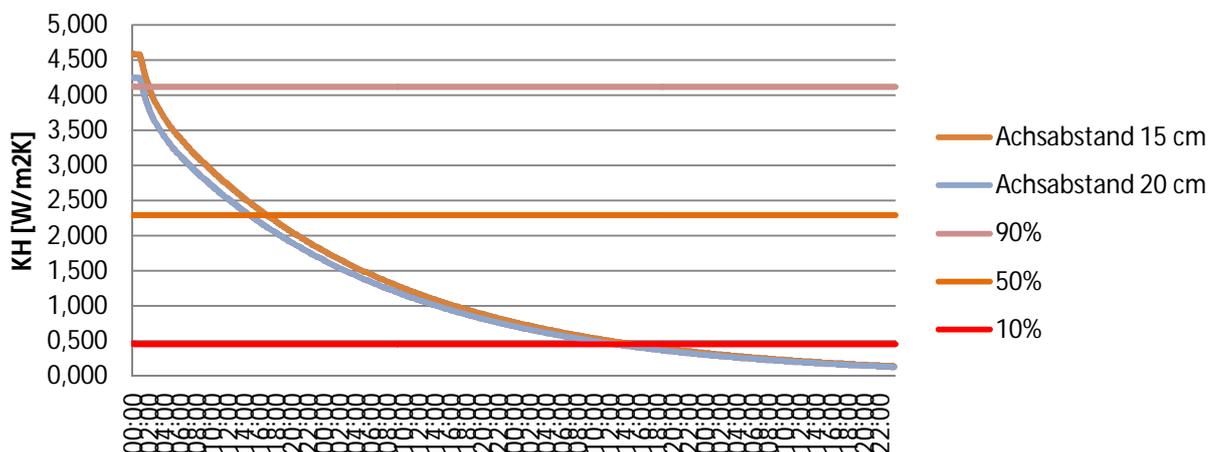


Abb. 44: Ergebnisdarstellung Achsabstand – Permanent Aus

In Abbildung 44 ist recht deutlich zu erkennen, dass ein Achsabstand von 15 cm zu Beginn erhöhte Abgabewerte hat. Die Kurve für den 15 cm Achsabstand fiel auch weniger stark, als die des Achsabstands 20 cm. Zum Ende des betrachteten Zeitraums konvergierten die beiden Kurven und würden nach längerer Zeit gegen „Null“ laufen.

Tab. 57: Break-Even Time – Achsabstand Teil 3

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| Achsabstand 15 cm | 01:10 | 16:00 | 14:50 (Tag 3) |
| Achsabstand 20 cm | 00:20 | 13:50 | 12:40 (Tag 3) |
| Stationäres Ergebnis KH_{unten} [W/m ² K] | 4,579 | | $t \Rightarrow \infty$ |

Was in der Grafik bereits beschrieben wurde, wird hier mit Zahlenwerten unterstrichen. Man erkannte klar, dass bis zur 50 % Grenze die Kurve mit 20 cm Achsabstand schneller abfiel, 2 Stunden 10 Minuten kühlte diese Variante schneller ab. Bei Betrachtung der 10 % Grenze veränderte sich die Zeit kaum mehr und die Kurven konvergierten. Nach gewisser Zeit, wenn keine Abgabeleistung mehr vorhanden ist und sich ein Temperatur Gleichgewicht einstellte, waren die Kurven ident.

- *Der Achsabstand hatte für eine Deckenheizung eine zentrale Bedeutung. In dieser Betrachtung wurde deutlich, dass durch den kleineren Achsabstand ein höherer Startwert, für die Kennliniensteigung erreicht wurde. Beim Abkühlen bis zur 10 % Grenze wirkte sich dieser positiv aus, denn die Heizung kühlte um mehr als 2 Stunden langsamer ab.*
- *Bei der Festlegung der Achsabstände im Querschnitt muss man sich dessen bewusst sein, dass die Veränderung dieses Parameters in allen Betrachtungen thermische Auswirkungen nach sich zieht. In diesem Fall wirkt sich ein verringerter Achsabstand positiv auf das Abkühlverhalten aus.*
- *Die Erklärung für dieses Ergebnis lieferte die Betrachtung der absoluten Werte für die Wärmeabgabeleistung. Durch die engere Positionierung innerhalb des Querschnitts, wurde ein Teilquerschnitt mehr erwärmt und hatte deswegen eine höhere Kennliniensteigung. Wenn nun dieser spezielle Fall betrachtet wird, dass man die Heizung nach Vollbetrieb abstellt, war ein Start-Vorteil deutlich. Bei ansonsten vollständig identem Materialverhalten benötigte der wärmere Querschnitt länger, um abzukühlen.*

Es bewahrheitete sich der Trend, der in diesem Kapitel für die instationäre Untersuchung „Permanent aus“ bereits bekannt war. Ein Deckenkühlsystem wärmte sich schneller auf, als ein Heizsystem abkühlt. Exemplarisch soll dies mit Zahlen belegt werden:

Tab. 58: Break-Even Time – Achsabstand Teil 3 Kühlung

| | 90% | 50% | 10% |
|--|-------|-------|------------------------|
| Achsabstand 15 cm | 01:40 | 11:10 | 20:30 (Day 2) |
| Achsabstand 20 cm | 01:00 | 09:10 | 18:20 (Day 2) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] | 6,402 | | $t \Rightarrow \infty$ |

3.2.4.4 Verschiedene Deckenstärken – Teil 3

In diesem Kapitel soll sich der Untersuchung von verschiedenen Deckenstärken und ihrem Abkühlverhalten gewidmet werden. Zunächst wurden alle drei Deckenstärken bei einer

Positionierung 3 cm oberhalb der Stahlbetonunterkante betrachtet. Damit sollen mögliche Unterschiede festgestellt werden.

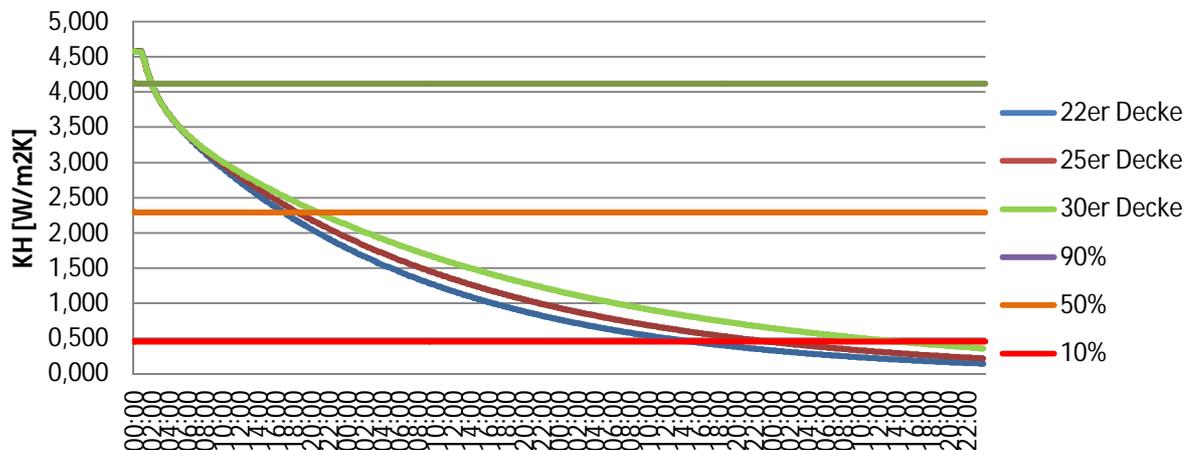


Abb. 45: Ergebnisdarstellung Deckenstärke – Permanent Aus

Dargestellt in Abbildung 45 sind drei Kurven für die Ergebnisse der drei untersuchten Deckenstärken, sowie drei horizontale Linien, die die Grenzen für 90 %, 50 % und 10 % vom Standardfall darstellen. Wie auch schon in den stationären Ergebnissen, waren auch hier die Startwerte für die Kennliniensteigung nahezu ident und mit freiem Auge nicht zu unterscheiden. Vor Erreichen der 50 % Marke änderte sich der Verlauf der Kurven und die 3 verschiedenen Varianten wurden deutlich. Die 30 cm hohe Stahlbetondecke wies das günstigste Verhalten hinsichtlich des Abkühlvorgangs auf, in der Mitte befanden sich die 25 cm Kurve und darunter die 22 cm Kurve.

Tab. 59: Break-Even Time – Deckenstärken Teil 3

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| 22er Decke | 01:10 | 16:00 | 14:50 (Tag 3) |
| 25er Decke | 01:10 | 17:30 | 23:30 (Tag 3) |
| 30er Decke | 01:00 | 19:50 | 14:10 (Tag 4) |
| Stationäres Ergebnis KH_{unten} [W/m ² K] | 4,579 | | $t \Rightarrow \infty$ |

In Tabelle 59 ist das oben beschriebene Verhalten dargestellt. Bei 90 % trat ein kleiner Unterschied von 10 Minuten auf. Bei 50 % war zwischen der niedrigsten Decke mit 22 cm und der höchsten mit 30 cm bereits ein Unterschied von 3 Stunden und 50 Minuten auszumachen. 10 % wurden vom größten Querschnitt 23 Stunden und 20 Minuten später unterschritten als vom kleinsten untersuchten in diesem Beispiel.

- *Die hier untersuchten Deckenstärken wiesen in der Betrachtung „Permanent Aus“ im Gegensatz zu den anderen Untersuchungen mit dieser Betonüberdeckung große Unterschiede auf. Zwar waren die Eingangswerte für die Kennliniensteigung annähernd ident, das Abkühlverhalten zeigte aber deutliche Unterschiede. Bereits bei Unterschreiten der 50 % Marke waren fast 4 Stunden Zeitverschiebung zwischen größter und kleinster Deckenstärke vorhanden. Bei Betrachtung der 10 % Marke gewann die Variante fast einen ganzen Tag mehr.*

Hier war der Effekt der Betonkernaktivierung sehr eindrucksvoll abzulesen. Nachdem der Beton bei gleicher Deckung eine maximal mögliche Temperatur erreicht hatte, stellte sich egal in welchem betrachteten Querschnitt dieselbe Temperatur ein. Nach Abschalten der Heizung war aber in einer höheren Decke mehr Energie in Form von Wärme gespeichert. Durch das mehr an Volumen und das träge Materialverhalten kühlte ein hoher Querschnitt deutlich langsamer ab.

- *Die Dimensionierung von Deckenstärken in Bezug auf diese Untersuchung kann man daher vernachlässigen, wenn nur der Absolutwert der Kennliniensteigung ausschlaggebend ist. Für eine Gesamtbetrachtung des Querschnitts wird deutlich, dass durch die Speichereigenschaften einer betonkernaktivierten Decke Vorteile hinsichtlich des Abkühlvorgangs erhalten werden. Im Allgemeinen ist für Planer hier der Grundsatz möglich „mehr ist mehr“. Damit gemeint ist, dass wenn sich aufgrund von statischen Erfordernissen höhere Deckenstärken ergeben, die Eigenschaften des Systems verbessern. Mit geschickten Überlegungen ist hier ein großes Energieeinsparpotential möglich.*

Für weitere Untersuchungen wäre es von großem Interesse, inwiefern Energie und Kosten gesenkt werden können. Eine Studie mit welchen Energieversorgungssystemen welche Leistungen möglich sind und wie lange für den gewünschten Effekt der größeren Deckenstärken geheizt werden muss, ist ein spannender noch zu untersuchender Punkt. Da das aber in ganz andere Themengebiete übergreifen und einen viel zu großen Aufwand für diese Diplomarbeit darstellen würde, wird an dieser Stelle darauf verzichtet.

Um die Auswirkung von verschiedenen Deckenstärken wirklich vollends zu beschreiben und zu verstehen, wurde die Variante, dass die Rohrregister 3 cm unterhalb der Stahlbetonoberkante eingelegt sind, ebenfalls untersucht.

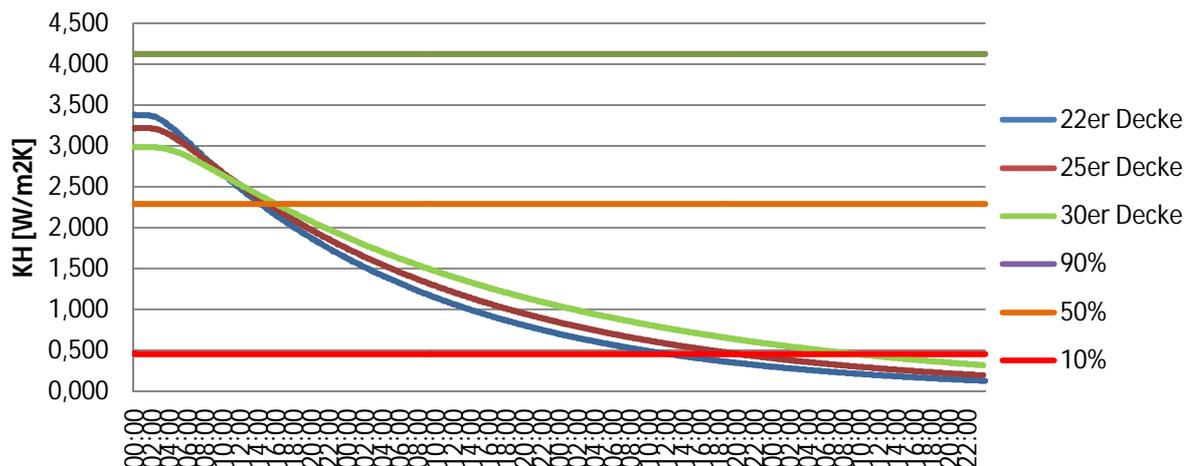


Abb. 46: Ergebnisdarstellung Deckenstärke 3 cm Deckung oben – Permanent Aus

Bereits bekannt aus den stationären Ergebnissen, hatten die drei Deckenstärken bei dieser Höhenposition verschiedene Ausgangswerte für die Wärmeabgabeleistung. Alle drei Werte erreichten den Grenzwert für 90 % aus dem Standardfall nicht. Eine Decke mit 22 cm hatte den höchsten, die mit 30 cm den geringsten Wert. Bei Betrachtung des zeitabhängigen Abkühlverhaltens des Querschnitts, wurde bereits bei der 50 % Marke der Effekt von vorhin deutlich.

Tab. 60: Break-Even Time – Deckenstärken 3 cm Deckung oben Teil 3

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| 22er Decke 3 cm Deckung _{oben} | - | 13:20 | 11:10 (Tag 3) |
| 25er Decke 3cm Deckung _{oben} | - | 14:10 | 19:00 (Tag 3) |
| 30er Decke 3cm Deckung _{oben} | - | 15:10 | 08:20 (Tag 4) |
| Stationäres Ergebnis KH_{unten} [W/m ² K] | 4,579 | | $t \Rightarrow \infty$ |

Bereits bei 50 % benötigte die 30 cm starke Decke 1 Stunde und 50 Minuten länger, um auf dieses Niveau abzukühlen als eine 22 cm Stahlbetondecke. Bei 10 % trat der Effekt der Betonkernaktivierung noch deutlicher auf. Ein Zeitunterschied von 21 Stunden und 10 Minuten war hier bereits vorhanden.

Die Kühlung zeigte die bekannten höheren Werte für die Abgabeleistung. Außerdem wurde die zeitabhängige Simulation für die 50 % und 10 % Grenze deutlich früher erreicht als bei der Heizung. Der maximal gemessene Unterschied betrug 25 Stunden und 30 Minuten. Ansonsten wurden keine weiteren Erkenntnisse aus der Kühlsimulation gewonnen.

3.2.4.5 Materialien - Leichtbeton, Normalbeton und UHPC – Teil 3

Ein weiterer spannender zu untersuchender Punkt waren die Auswirkungen der verschiedenen Materialien. Alleine aufgrund der Materialeigenschaften waren hier große Unterschiede zu erwarten. Die anderen Parameter wurden wie in den vorhergegangenen beschriebenen Kapiteln angewendet.

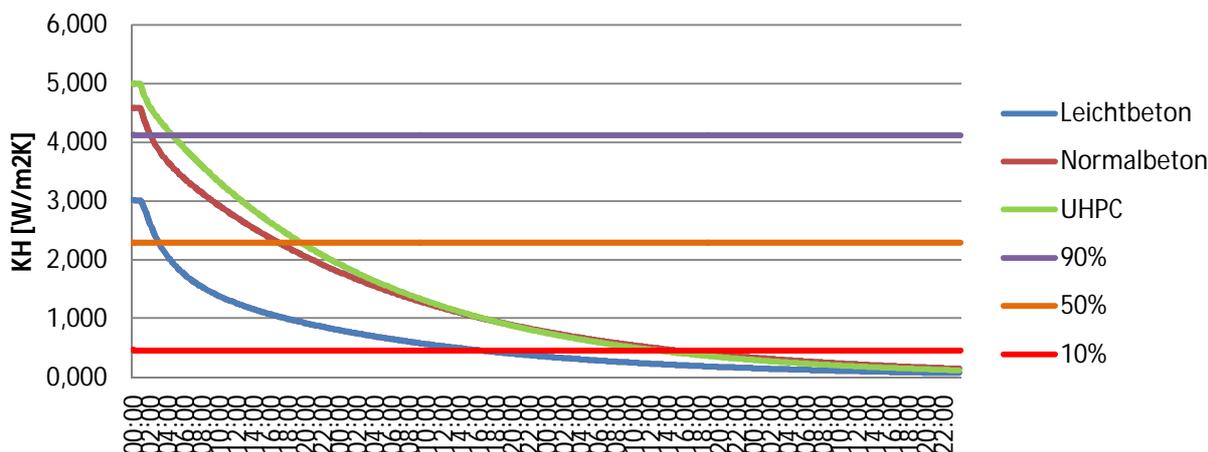


Abb. 47: Ergebnisdarstellung Materialien – Permanent Aus

Die Werte für die Kennliniensteigung wichen teils stark voneinander ab. Beispielsweise erreichte die Variante Leichtbeton gar nicht die 90 % Marke, UHPC wies sogar Werte auf, die deutlich darüber lagen. Das Abkühlverhalten der Materialien war ebenfalls spannend. Aufgrund von den Materialeigenschaften des UHPC verlor dieser schneller an Wärme als ein Normalbetonquerschnitt und unterschritt sogar schneller die 10 %. Dies würde den Rückschluss zulassen, dass bei geringeren Wärmeleitfähigkeitswerten wie bei Leichtbeton die Decke langsamer abkühlen wird. Diese Überlegung stimmt unter gewissen Voraussetzungen, nämlich wenn alle drei Materialien die gleichen Startwerte für die Kennliniensteigung besitzen würden. In diesem Fall war die Differenz zu Beginn der Untersuchung bereits so groß, dass die Wärmedämmeigenschaften des Leichtbetons erst nach vier Tagen ähnliche Werte zeigten.

Tab. 61: Break-Even Time – Materialien Teil 3

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| Leichtbeton | - | 02:10 | 15:10 (Tag 2) |
| Normalbeton | 01:10 | 16:00 | 14:50 (Tag 3) |
| UHPC | 03:40 | 18:30 | 11:40 (Tag 3) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | | $t \Rightarrow \infty$ |

Aus Tabelle 41 können die Zahlenwerte für die zuvor beschriebene Grafik entnommen werden. Es wurde noch einmal deutlich, welche Effekte die verschiedenen Materialien auf die zeitabhängige Untersuchung haben.

- *Zu Beginn überwogen die positiven Eigenschaften wie ein hoher Wert für die Wärmeleitfähigkeit des UHPC. Kein anderes Material hatte in diesem Beispiel so hohe Werte für die Kennliniensteigung. Bei Betrachtung der Abkühlvorgänge wurde deutlich, dass sich die Effekte der Materialeigenschaften bei Abschalten der Heizung umkehren und sogar negativ auswirkten.*

Die Auswirkungen aus diesem Beispiel ließen sich wie bereits bei anderen Untersuchungen dieses Parameters auf die Materialeigenschaften zurückführen. Einerseits ermöglichen höhere Wärmeleitfähigkeitswerte größere Leistungen der Deckenheizungen, andererseits waren eine niedrige spezifische Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeitswert auch für ein schnelles Abkühlen der Decke verantwortlich.

- *Für die Auslegung von verschiedenen Materialien kann gesagt werden, dass durch die Veränderung von Materialeigenschaften zwar absolut Werte verbessert werden können, bei Abkühlvorgängen genau das Gegenteil auftreten kann. Fachplaner müssen sich bei Verwendung von Zusatzmitteln bewusst sein, dass eine Veränderung der Eigenschaften auftreten kann.*

Für die Betrachtung der Materialien der Kühlvariante galt ebenso, dass die Werte für die Kennliniensteigung deutlich höher ausfielen als bei der Heizvariante. Damit benötigte man weniger Deckenfläche um gewünschte Kühlleistungen zu erreichen. Die zeitabhängige Betrachtung und das Speichervermögen der Materialien kennzeichneten sich so, dass die Grenzen von 50 % und 10 % schneller unterschritten wurden als beim Heizbetrieb.

3.2.4.6 Höhenlage – Teil 3

Der letzte zu untersuchende Punkt zu diesem Themengebiet, waren die verschiedenen Höhenpositionen im Querschnitt. Sie stellten das Ende der Parameterstudie dar und schlossen dieses Kapitel ab. Ähnlich zu den anderen Untersuchungen wurden alle 4 Höhenpositionen miteinander verglichen und untersucht.

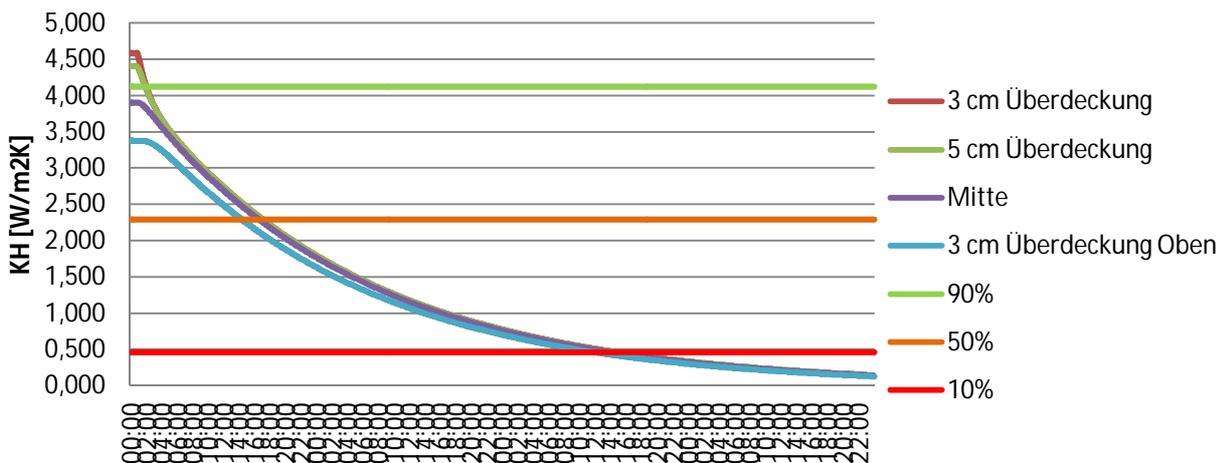


Abb. 48: Ergebnisdarstellung Höhenlage – Permanent Aus

Das Ergebnis für die Höhenlage zeigte, dass klare Unterschiede zwischen den Positionen hinsichtlich der Kennliniensteigung auszumachen sind. Nach verstreichen einiger Zeit änderten sich die Steigungen der Kurven für die unterschiedlichen Positionen, sodass sie ähnlich verliefen. Damit wurde die anfängliche Erwartungshaltung, dass die Position weiter oben im Querschnitt länger Wärme speichert, in diesem Beispiel nicht voll bestätigt.

Tab. 62: Break-Even Time – Höhenlage Teil 3

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| 3 cm Deckung | 01:10 | 16:00 | 14:50 (Tag 3) |
| 5 cm Deckung | 01:00 | 16:10 | 14:00 (Tag 3) |
| Mitte | - | 15:40 | 13:30 (Tag 3) |
| 3 cm Deckung oben | - | 13:20 | 11:10 (Tag 3) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 4,579 | | $t \Rightarrow \infty$ |

In Tabelle 62 sind die Zahlenwerte zur Auswertung der Höhenlage ersichtlich. Die Position Mitte und 3 cm Deckung oben erreichten die 90 % Marke, wie bereits in den stationären Ergebnissen gezeigt wurde, nicht. Für die beiden Positionen weiter unten galt, dass sie nach Abschalten der Heizung ca. 1 Stunde benötigten, um die 90 % Grenze zu unterschreiten. Für 50 % gilt, dass diese als erstes von der Position 3 cm unterhalb der Querschnittoberkante, als letztes von der Position 3 cm oberhalb der Unterkante erreicht wurde. Es trat ein zeitlicher Unterschied von 2 Stunden 40 Minuten auf. Die anderen beiden Werte befinden

sich, wie in obenstehender Tabelle angeführt, dazwischen. Bei der Betrachtung der 10 % Marke näherten sich sämtliche Ergebnisse weiter an.

- *Es gilt, dass die Positionen durch die stationären Ergebnisse mit niedriger Deckung weit unten im Querschnitt, höhere Werte für die Kennliniensteigung aufwiesen. Die Kurven dieser beiden untersuchten fallen schneller ab, als die mit hoher Deckung. Auffällig ist, dass sich alle Kurven nach gewisser Zeit annähern und allmählich einen einzigen Kurvenverlauf bilden*

Dieses Ergebnis verwundert gewissermaßen. In bestehenden Arbeiten wird stets davon gesprochen, dass die Positionierung bei ansonsten identen Parametern Vorteile hinsichtlich der Speicherfähigkeit bei Abkühlvorgängen mit sich bringt. Betrachtet man diese Ergebnisse genauer kann eine solche Aussage nur bedingt unterstützt werden.⁵⁸⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Krec 2015

⁵⁹ Vgl. Friembichler et al. 2016

Tab. 63: Temperaturgegenüberstellung im Querschnitt – Permanent Aus

| Betondeckung 3 cm unten | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 02:00 | 05:00 | 10:00 | Tag 1 | Tag 2 | Tag 3 | Tag 4 |
| Temperatur Deckenuntersicht mit Putz | 26,34 | 25,41 | 24,49 | 22,74 | 21,18 | 20,51 | 20,22 |
| Temperatur STB Unterkante | 27,02 | 25,99 | 24,97 | 23,04 | 21,31 | 20,57 | 20,24 |
| Temperatur STB Oberkante | 28,13 | 27,60 | 26,42 | 23,93 | 21,70 | 20,73 | 20,32 |
| Temperatur Fußboden | 20,59 | 20,59 | 20,57 | 20,43 | 20,21 | 20,09 | <u>20,04</u> |

[°C]

| Betondeckung 3 cm oben | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 02:00 | 05:00 | 10:00 | Tag 1 | Tag 2 | Tag 3 | Tag 4 |
| Temperatur Deckenuntersicht mit Putz | 25,19 | 24,85 | 24,10 | 22,50 | 21,08 | 20,46 | 20,20 |
| Temperatur STB Unterkante | 25,75 | 25,37 | 24,54 | 22,77 | 21,19 | 20,51 | 20,22 |
| Temperatur STB Oberkante | 28,24 | 27,03 | 25,86 | 23,58 | 21,55 | 20,67 | 20,29 |
| Temperatur Fußboden | 20,64 | 20,63 | 20,58 | 20,41 | 20,19 | 20,09 | <u>20,04</u> |

[°C]

In Tabelle 63 werden die Ergebnisse für die Temperaturen im Querschnitt dargestellt. Auffällig war, dass bereits 5 Stunden nach Abschalten der Heizung bei der Variante mit geringerer Deckung eine höhere Temperatur an der Stahlbetonoberkante gemessen wurde. Damit bestätigten die Temperaturen und verdeutlichten was bereits durch die Kennliniensteigungen hervorging.

- Bei gleichen Startwerten für die Kennliniensteigung wiesen Querschnitte mit Rohrregistern weit oben im Querschnitt, flachere Kurven auf und somit verloren sie weniger schnell an Temperatur. Dies galt aber nur, wenn an der Unterseite ähnliche Temperaturen und Abgabewerte vorhanden waren. An der Stahlbetonoberkante wiesen die gemessenen Temperaturen längere Zeit höhere Werte auf.

- *Eine Betrachtung wie sie in dieser Arbeit passiert ist, zeigte, dass sich der positive Effekt durch die höheren Abgabeleistungen und höheren Temperaturen an der Unterseite mit dem Effekt des langsameren Auskühlens annähernd egalisierten. Auch hier musste vorausgesetzt werden, dass dieselbe Heizmitteltemperatur im Rohr verwendet wurde, somit nicht dieselben Werte für die Kennliniensteigung bei Abschalten der Heizung vorhanden waren.*

Dieser Effekt hing stark mit den in dieser Arbeit definierten Randbedingungen zusammen. Da nach Abschalten der Heizung ein adiabater Zustand im Rohrrinneren simuliert wurde, waren andere Ergebnisse zu erwarten. Deswegen war auch der deutliche Unterschied zu bestehenden Arbeiten gegeben.

An dieser Stelle soll noch ein kurzer Vergleich zum Kühlbetrieb für den Parameter Höhenlage erlaubt sein. Wie bereits bekannt und in jedem Kapitel auch gezeigt, waren die Werte für die Kennliniensteigung im Kühlbetrieb höher als beim Heizbetrieb.

Tab. 64: Break-Even Time – Höhenlage Teil 3 Kühlung

| | 90% | 50% | 10% |
|---|-------|-------|------------------------|
| 3 cm Deckung | 01:40 | 11:10 | 20:30 (Tag 2) |
| 5 cm Deckung | 01:30 | 11:30 | 20:40 (Tag 2) |
| Mitte | - | 11:10 | 20:20 (Tag 2) |
| 3 cm Deckung oben | - | 09:10 | 18:30 (Tag 2) |
| Stationäres Ergebnis KH_{Unten} [W/m ² K] | 6,402 | | $t \Rightarrow \infty$ |

Aus den Werten in Tabelle 64 wird ersichtlich, dass auch bei der Höhenlage die Zeit zum Unterschreiten der 50 % und 10 % Grenze schneller passiert als bei einer Deckenheizung mit den gegebenen Parametern.

Im Allgemeinen zeigten die Simulationen in diesem Kapitel für den Kühlbetrieb, dass die Speichereigenschaften bei niedrigen Temperaturen weniger ausgeprägt sind als beim Heizbetrieb. Zurückzuführen war dies auf die höheren Start-Werte für die Kennliniensteigung. Zwar wurde auch im Kühlbetrieb eine Referenzvariante aus den stationären Berechnungen der Kühlung verwendet, jedoch ist die 50 % und 10 % Grenze der Kühlung deutlich höher als die Werte für die Heizung. Die 90 % Grenze wurde von beiden Varianten ähnlich schnell unterschritten, weil der anfängliche Start-Vorteil des Kühlsystems in dieser Zeit egalisiert werden musste.

4. Integration der Ergebnisse als Fertigteilbauweise

4.1 Allgemeines

Im letzten Kapitel sollen die Ergebnisse für die Fertigteilbauweise interpretiert werden. Dabei wird darauf eingegangen welche Unterschiede die Parameter für eine Fertigteilbauweise und für eine Ortbetonlösung bedeuten.

4.2 Interpretation der Parameter

Zu Beginn sollen die einzelnen Parameter kurz zusammengefasst werden und mögliche Unterschiede zwischen Fertigteilbauweise und Ortbeton herausgearbeitet werden. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass jeder untersuchte Parameter auf beide Möglichkeiten angewendet werden kann. In manchen Fällen gibt es aber Optionen, die für eine Ortbetonlösung günstiger sind und andere für die Fertigteilbauweise.

Es soll auf alle Simulationen eingegangen werden, und ein gesamter Überblick über die verschiedenen Berechnungsmethoden gegeben werden. Dadurch werden die vier Berechnungsmethoden auf wenige Aussagen zusammengefasst. Die Aussagen in den folgenden Kapiteln sind sowohl für den Heizbetrieb als auch den Kühlbetrieb gültig.

4.2.1 Interpretation einer verputzten Stahlbetonuntersicht

Der Parameter Putz zeigte einige Besonderheiten. Zum einen kann gesagt werden, dass eine unverputzte Stahlbetonuntersicht höhere Werte für die Kennliniensteigung aufwies als eine Variante mit Putz. Dies zeigte sich in allen Berechnungen. Zum anderen wurde das zeitabhängige Verhalten durch das Aufbringen einer Putzschicht beeinflusst. Bei einer verputzten Variante wurde mehr Zeit benötigt um den Querschnitt zu erwärmen, gleichzeitig benötigte er länger um wieder abzukühlen. Für den Parameter Putz ergab sich kein Unterschied zwischen Ortbeton und Fertigteilbauweise. Die Entscheidung ob und welcher Putz verwendet wird, wird weder von einer Baufirma noch einem Fertigteilwerk beeinflusst. Damit betrifft dieser Parameter beide Varianten gleichermaßen und muss für beide Möglichkeiten beachtet werden.

Zurückzuführen waren diese Auswirkungen auf die Materialeigenschaften des Putzes. Bei dem vorgegebenen Deckenaufbau eines Bauphysikers hatte die Putzschicht eine Dicke von 1 cm. Zwar entspricht 1 cm bei einem 22 cm hohen Stahlbetonquerschnitt 4,55 % der relativen Querschnittfläche, aber durch die dazugehörige Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Putz}} = 0,98$ W/mK wurde dieser Effekt deutlich.

Abschließend lässt sich zu diesem Thema sagen, dass der Effekt einer Putzschicht eine Auswirkung auf das Gesamtverhalten des Systems hat. Planer müssen sich über die zuvor

beschriebenen Aussagen bewusst sein und diese richtig anwenden können. Dabei spielt es keine Rolle ob eine Ortbeton- oder Fertigteillösung angestrebt wird.

- *Die stationären Auswertungen des Heizsystems zeigten, dass sich durch Anbringen einer Putzschicht ein gemittelter prozentualer Unterschied über alle Auswertungen von 7,05 % der Kennliniensteigung ergab. Damit wirkte sich das Weglassen eines Putzes in der stationären Betrachtung positiv aus und der Effekt durfte nicht vernachlässigt werden.*
- *Für die Betrachtung der instationären Versuchsreihe waren jeweils drei verschieden zeitabhängige Heizmitteltemperaturfunktionen zu betrachten:*
 - o *Für den Zyklischen Heizbetrieb galt, dass eine Variante mit Putz im maximalen Bereich um 6,69 % weniger Abgabeleistung hatte als eine Variante ohne Putz. Für den minimalen Bereich drehte sich dieser Effekt um und eine verputzte Decke besaß um 4,34 % bessere Speichereigenschaften.*
 - o *Der Fall „Permanent An“ zeigte für den Parameter Putz, dass eine unverputzte Decke die festgesetzten Grenzwerte von 50 % (40 Minuten) und 90 % (6 Stunden 20 Minuten) schneller erreichte als eine verputzte. Damit wurde deutlich, dass das System weniger träge war.*
 - o *Die letzten Untersuchungen bezogen sich auf den Fall „Permanent Aus“. Der Fokus richtete sich hier auf die Untersuchung der Speichereigenschaft. Die Ergebnisse für den Putz zeigten, dass nach Abschalten der Heizung zwar ein Start-Vorteil für eine unverputzte Variante bestand, da die Putzschicht aber wärmedämmende Eigenschaften besaß, kühlte sie langsamer ab. Bei der Betrachtung der 10 % Grenze zeigte sich ein maximaler Unterschied von 4 Stunden und 30 Minuten.*

4.2.2 Interpretation verschiedener Rohrdurchmesser

Verschiedene Durchmesser hatten auf das Gesamtverhalten eine untergeordnete Bedeutung. Zwar waren kleine Unterschiede zwischen den untersuchten Parametern auszumachen, diese waren aber gering. Ähnlich verhielt es sich bei der Betrachtung der zeitabhängigen Simulationen. Es war ein Unterschied vorhanden, dieser war aber gering und brachte keine großen Veränderungen. Für die Fertigteilbauweise ist dieser Parameter trotzdem von großem Interesse. Fertigteillemente werden in der Regel in einer Stärke von 5,5 bis 6,5 cm hergestellt. Wird eine Deckungslage innerhalb des Fertigteillements gewählt, muss darauf geachtet werden, dass die Rohre nicht zu groß sind, um ausreichend Platz zu Verfügung zu haben. Bei einer Deckung von 2 cm und einer unteren Bewehrungslage mit Eisen vom Durchmesser 10 mm plus Gitterträgern und etwaig notwendigen Schubträgern, bleiben bei einer Elementdicke von 5,5 cm lediglich 2,5 cm vom Querschnitt übrig. Diese Rechnung verdeutlicht, dass beliebige Rohrdurchmesser bei einer Fertigteillösung innerhalb des Elements nicht möglich sind.

Die Tragfähigkeit der Elementdecke für den Einbauzustand sollte außerdem untersucht werden. Es ist zu prüfen ob die Durchbrüche der Rohre klein genug sind, damit sie keinen Einfluss auf das Tragverhalten im Bauzustand haben.⁶⁰⁶¹

Im Gegensatz dazu spielen diese Überlegungen für Ortbetonlösungen keine Rolle. Da der Querschnitt in einem Schritt fertig betoniert wird, sind keine Platzbedenken vorhanden und wenn die Rohre einen üblichen Achsabstand zueinander haben, können statische Bedenken ausgeräumt werden.

Verschiedene Rohrdurchmesser hatten keinen großen Einfluss, weil das Verhältnis der Volumina von Rohr zu Betonquerschnitt sehr klein ist. Wie im Kapitel „2.2.3.3 Rohrdurchmesser, Höhenlage und Materialien“ bereits erklärt und mit Zahlen belegt wurde ändert eine Vergrößerung des Rohrdurchmessers wenig am Gesamtverhalten.

- *Die stationären Berechnungen unterstrichen die hier getätigten Aussagen zum Thema Heizen und belegten das mit Zahlen. Ein Mittel über alle Ergebnisse brachte lediglich eine Änderung von 2,53 %. Daher musste der Effekt nicht weiter betrachtet werden.*
 - o *In der zyklischen Betrachtung ergab sich ein ähnliches Bild wie bereits zuvor in den stationären Berechnungen. Der Unterschied im Maximalbereich war weiterhin gering mit 2,39 %. Für den Minimalbereich galt, dass sich der Effekt der Rohrdurchmesser umkehrte und zusätzlich zu den äußeren Randbedingungen verstärkt wurde. Daher ließ sich auch der größere Unterschied von 6,34 % erklären.*
 - o *Bei den Durchmessern im Fall durchgehend eingeschalten, wurde wiederum deutlich, dass der Unterschied kaum merkbar war. Für die Variante mit 17 mm wurden die Grenzwerte bei 50 % um 20 Minuten später erreicht und bei 90 % immerhin um 2 Stunden und 50 Minuten. Damit bewies auch die Betrachtung „Permanent An“ die untergeordnete Bedeutung für das thermische Verhalten einer betonkernaktivierten Decke.*
 - o *„Permanent Aus“ bestätigte einmal mehr, dass der Effekt verschiedener Rohrdurchmesser zu vernachlässigen ist. Ein maximaler Zeitunterschied von 40 Minuten war die größte Differenz.*

4.2.3 Interpretation des Achsabstands

Der Achsabstand hatte in allen Berechnungen einen großen Einfluss auf das System. Zum einen waren die Wärmeabgabeleistungen mit geringerem Achsabstand erheblich größer. Zum anderen war ein großer zeitabhängiger Unterschied auszumachen. Aus den instationären Untersuchungen ging hervor, dass die hier untersuchte Variante mit

⁶⁰ Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1: 2015 02 15

⁶¹ Vgl. Bergmeister et al. 2016

geringerem Achsabstand sich positiv auf das Gesamtverhalten auswirkte. Das System war weniger träge, und bediente sich trotzdem den Vorteilen einer betonkernaktivierten Decke.

Der Parameter wirkt sich aufgrund der Veränderung des Achsabstands und der damit verbundenen Änderung der Geometrie auf die Fertigteilbauweise aus. Die Rohrregister müssen in den einzelnen Fertigteilplatten so verlegt werden, dass sie einfach miteinander verbunden werden können.

Dieses geometrische Problem könnte man wohl Software gestützt lösen. Nachdem eine Decke fertig eingegeben ist und die einzelnen Platten den Räumen zugewiesen werden, könnte durch Implementieren eines geeigneten Algorithmus die Rohre automatisiert verlegt werden.

Warum dieser Effekt auftritt lässt sich am besten mittels einer Grafik erklären.

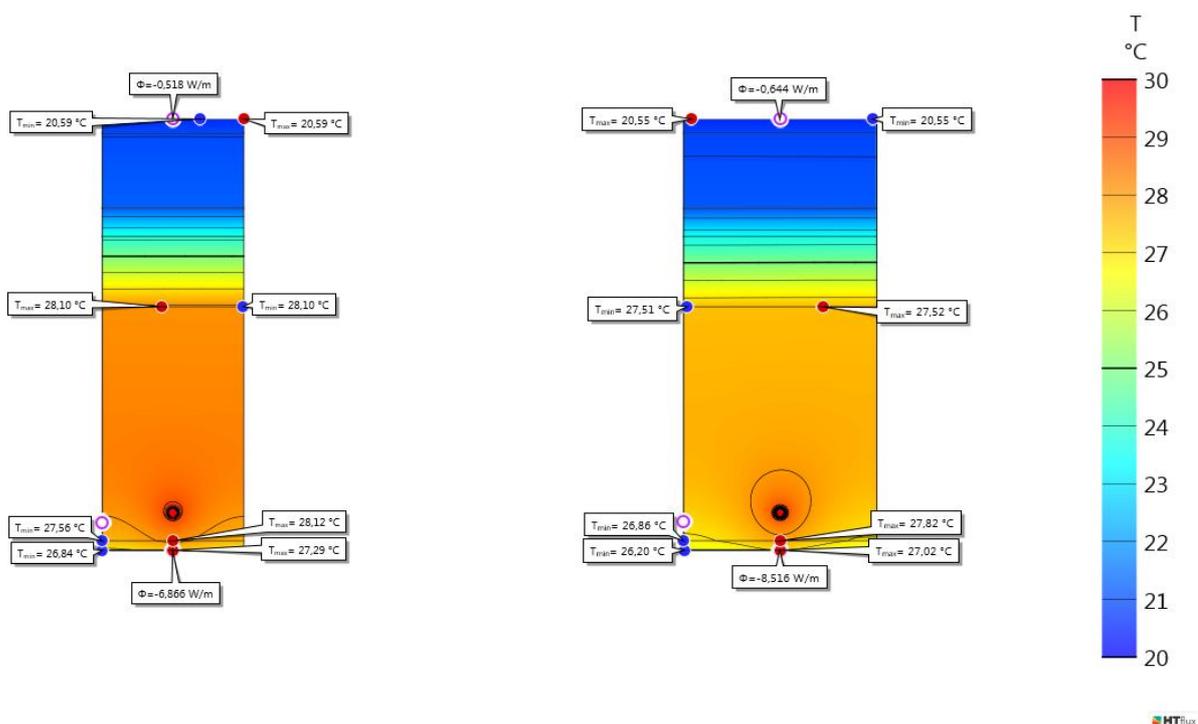


Abb. 49: Übersicht der Achsabstände und Visualisierung der Isothermen

In Abbildung 49 erkennt man zusätzlich zur Temperaturverteilung Isothermen, die Grenzwerte symbolisieren. Im rechten Bild bei einem Achsabstand von 15 cm ist deutlich erkennbar, dass die Isotherme nahe dem Heizrohr runder verläuft. Hingegen zeigt das rechte Bild, dass die Isotherme flacher verläuft. Es spiegelt den Einfluss der benachbarten Rohrregister wieder.

Wie bereits im „3.2.3.4 Wirtschaftlicher Aspekt des Achsabstands – Exkurs“ erklärt, können durch die richtige Auslegung eines Deckenheiz- und -kühlsystems viel Material und Kosten eingespart werden. Für Planer stellt dieser Parameter eine zentrale Bedeutung dar, denn durch ihn können durch Adaptierungen große Veränderungen hinsichtlich der Abgabeleistung und thermischen Trägheit erreicht werden.

- *Der hier betrachtete Achsabstand brachte eine Änderung der Kennliniensteigung beim Heizbetrieb von 6,90 % im Mittel. Damit wurde deutlich, was bereits aus anderen Arbeiten hervorging, dass dieser Effekt eine zentrale Rolle bei der Auslegung dieses Systems einnimmt. Bei einer Vergrößerung des Achsabstands um bereits 5 cm war ein nicht vernachlässigbarer Unterschied vorhanden.*
- *Auch an dieser Stelle soll noch einmal auf die instationäre Fälle eingegangen werden:*
 - o *Die zyklische Betrachtung der Achsabstände lieferte Ergebnisse, die die Bedeutung dieses Parameters unterstrichen. Im maximalen Bereich wurden Ergebnisse Unterschiede zwischen den beiden Abständen von insgesamt 12,14 % errechnet. Nach Abschalten der Heizung kühlten beide Varianten in dieser Betrachtung ähnlich schnell ab und hatten am Ende des Zyklus einen recht kleinen Unterschied von 1,69 %.*
 - o *Der zweite Teil der instationären Betrachtungen unterstrich die zuvor getätigten Aussagen. Der Einfluss des Achsabstands wurde auch hier deutlich, so ist das System mit geringerem Achsabstand viel weniger träge als das mit größerem. 50 % der Leistung der vorgestellten Referenzvariante wurden um 1 Stunde und 20 Minuten schneller erreicht. Bei 90 % trat dieser Effekt noch deutlicher auf, ein Unterschied von 15 Stunden und 10 Minuten wurde errechnet.*
 - o *Das Kapitel „Permanent Aus“ zeigte keinen so deutlichen Effekt für diesen Parameter wie die anderen Untersuchungen in dieser Arbeit. Der maximale Unterschied war beim Unterschreiten der 10 % Grenze gegeben mit einem Zeitunterschied von 2 Stunden und 10 Minuten. Dies verdeutlichte noch einmal, dass die Verringerung des Achsabstandes eine Verbesserung des thermischen Verhaltens nach sich zieht.*

4.2.4 Interpretation der Deckenstärken

Das Ergebnis der Untersuchung verschiedener Deckenstärken offenbarte am deutlichsten die positive Speicherwirkung einer betonkernaktivierten Decke. Bei einer identen Deckungslage der Rohrregister innerhalb des Querschnitts zeigte sich, dass die Werte für die Kennliniensteigung wenig voneinander abwichen, damit die Höhenposition bis zu gewissem Grad beliebig gewählt werden können. Erst durch die zeitabhängigen Simulationen waren Unterschiede deutlich geworden. Es wurde längere Zeit benötigt, um den gesamten Querschnitt auf die gewünschte Temperatur zu bringen, dafür blieb nach Abschalten des Systems länger die Energie gespeichert. Der untersuchte Parameter bedeutet für Ortbeton und Fertigteilbauweise exakt dasselbe. Bei identer Höhenlage ist es

egal, ob die Rohre bereits im Werk eingelegt werden, oder auf der Baustelle eingelegt werden. Der monolithische Endquerschnitt wird dieselben Eigenschaften haben.

Da bei den stationären Ergebnissen annähernd keine Unterschiede auftraten, nur die, die der Geometrie geschuldet sind, können lediglich Effekte der instationären Simulation erklärt werden. Diese waren zurückzuführen auf die spezifische Wärmekapazität des Betons $c_p = 1000 \text{ J/kgK}$. Es wurde eindrucksvoll deutlich, dass mehr Masse des Betons das System träger macht. Für den Start der Heizung ist dieser Effekt nachteilig, bei Normalbetrieb dieses Systems brachte er einiges an Vorteilen mit sich.

Für idente Deckungslagen im Querschnitt ändert sich für Planer hinsichtlich der Leistung der Heizung nichts, wie durch die Simulationen in dieser Arbeit bewiesen wurde. Konsumenten und Planer müssen aber die thermische Trägheit beachten und dürfen nicht erwarten, dass das System einer 22 cm hohen Stahlbetondecke ähnlich schnell auf Temperaturänderungen anspringt wie eine 30 cm Decke.

- *Für die stationären Ergebnisse aus dem Heizfall galt, dass das Mitteln über die gesamten Ergebnisse, wie dies in den Kapiteln zuvor gemacht wurde, nicht zielführend war, da sich die Ergebnisse etwa aufgrund ihrer geometrischen Eigenheit bei gleichzeitiger Betrachtung der Höhenlage stark unterschieden. Dies galt ebenso für die stationäre Berechnung. Um diesen Unterschied zu belegen, soll auf die Ergebnisse aus Tabelle 25 verwiesen werden. Für eine geringe Deckungslage der Positionen 3 cm und 5 cm von unten waren im Mittel lediglich 0,06 % Unterschied auszumachen. Hingegen bei den Positionen in der Mitte und 3 cm von oben waren 5,05 % auszumachen. Diese Ergebnisse verdeutlichten, dass bei einer geringen Deckungslage und unterschiedlichen Deckenstärken kaum Abweichungen zu erwarten sind, bei großen der Effekt immer deutlicher wird.*
- o *Die Betrachtung des zyklischen Betriebs zeigte, dass die Position der Höhenlage im Zusammenhang mit der Deckenstärke interessant war. Bei einer Betrachtung 3 cm von unten wurde deutlich, dass die Deckenstärke bei dieser Position und dieser Betrachtung keinen Einfluss auf das Gesamtverhalten des Systems hatte. Dies galt gleichermaßen für das Maximum als auch ein Minimum, im Mittel betrug der Unterschied 2,45 %. Damit galt auch hier gleichermaßen, dass dieser Effekt für einen Heizzyklus Betrieb keine Auswirkungen hatte. Für die Position 3 cm von oben galt diese Aussage nicht. Wie in Tabelle 43 gezeigt, betrug der maximale Unterschied zwischen den untersuchten Varianten 24,45 % zwischen einer Deckenstärke von 22 cm und 30 cm. Beim Abkühlvorgang wurde der positive Effekt der Betonkernaktivierung deutlich. Die 30 cm hohe Decke besaß gegenüber der 22 cm Decke im minimalen Bereich eine höher Kennliniensteigung von 6,03 %.*

- o *Die Deckenstärken verhielten sich in dieser instationären Betrachtung wie bereits beschrieben. Bei einer geringen Deckungslage waren annähernd keine Unterschiede zwischen den einzelnen Ergebnissen und dem Erreichen der Grenzwerte auszumachen. 50 % wurden von allen 3 Decken gleichzeitig erreicht. Die 90 % Grenze zeigte aber doch einen Unterschied, die geringste Deckenstärke benötigt um 4 Stunden und 40 Minuten weniger zum Überschreiten dieser Marke als die 30 cm Decke. Die zweite Betrachtung der Deckenstärken mit der Position 3 cm von oben zeigte hingegen deutliche Unterschiede. Bereits die 50 % Marke benötigte bei der geringsten Deckenstärke 9 Stunden und 40 Minuten, die 30 cm Decke sogar 17 Stunden und 40 Minuten. 90 % der Referenzvariante wurden nie erreicht.*
- o *In der Betrachtung „Permanent Aus“ der Deckenstärken wurden die Speichereigenschaften einer betonkernaktivierten Decke am eindrucksvollsten ersichtlich. Für die Höhenlage der Rohrregister 3 cm oberhalb der Stahlbetonunterkante waren beim Unterschreiten der 10 % Grenze noch keine Unterschiede zwischen den drei untersuchten Varianten auszumachen. 50 % wurden vom kleinsten Deckenquerschnitt bereits um 3 Stunden und 50 Minuten früher unterschritten als vom größten Querschnitt. Die Betrachtung von 10 % zeigte einen Unterschied der beiden Varianten von 23 Stunden und 20 Minuten. Dies ist insofern beachtlich als dass bei allen anderen Betrachtungen keine Unterschiede bei geringen Deckungslagen auszumachen waren. Noch deutlicher wurde dieser Effekt bei hoher Deckungslage. Auch wenn zu Beginn ein Startvorteil für die niedrigste Decke vorlag, zeigte sich nach drei bzw. 4 Tagen ein Unterschied zwischen den Varianten von 21 Stunden und 10 Minuten.*

4.2.5 Interpretation der Materialien

Materialien stellten eine Besonderheit in dieser Arbeit dar. Im Hochbau und hier im speziellen im mehrgeschossigen Wohnbau sind Deckenlösungen mit Leichtbeton oder UHPC zum Teil nicht möglich und teilweise unwirtschaftlich und nicht notwendig. Die Untersuchung dieses Parameters soll aber aufzeigen, wie sich Veränderungen der Materialeigenschaften auf das Verhalten auswirken. Für die Fertigteilbauweise ist diese Lösung undenkbar. Die Vorteile sind durch viele gleiche Arbeitsabläufe und dem Einsparpotential der Schalarbeiten vor Ort Industrialisierung im Bauwesen zu implementieren und einen hohen Vorfertigungsgrad zu garantieren. Aber auch für Baufirmen und Ortbetonlösungen stellen verschiedene Materialien eine absolute Besonderheit dar. Es stellt die akademischen Interessen in den Vordergrund.

Das Ergebnis zeigte, dass sich eine Verkleinerung der Wärmeleitfähigkeit deutlicher auf die Werte der Kennliniensteigung auswirkte als umgekehrt. Bei den instationären Berechnungen waren die Effekte nicht mehr so einfach zu interpretieren, da alle 3 Eigenschaften, die spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte Einfluss auf das Verhalten hatten. Es fiel aber trotzdem auf, dass die Wärmeleitfähigkeit der bestimmende Faktor für die Berechnungen war. Die Abgabewerte von UHPC und Normalbeton waren viel höher als bei

Leichtbeton. Bei den zeitabhängigen Untersuchungen stellte sich heraus, dass Leichtbeton nie einen ähnlichen Wertebereich wie die anderen beiden untersuchten Varianten erreichte.

Für planende Ingenieure sei so viel gesagt. Die Veränderung der Materialeigenschaften von Beton durch Zusatzmittel und Zusatzstoffen können eine Auswirkung auf das Verhalten haben. Die hier untersuchten Materialien geben Richtlinien vor, wie sich Materialien verhalten, wenn ähnliche Adaptionen durchgeführt werden. Da dieses Thema aber sehr projektspezifisch ist, kann im Zuge einer Diplomarbeit nicht auf alle Möglichkeiten eingegangen werden, da der zeitliche Rahmen sonst gesprengt werden würde.⁶²⁶³

- Aus den stationären Ergebnissen des Heizbetriebs ließen sich bereits deutliche Unterschiede hinsichtlich der Wärmeabgabeleistung ausmachen. Zwischen Leichtbeton und Normalbeton erhielt man einen gemittelten prozentualen Unterschied aller Ergebnisse von 43,31 %. Für den Vergleich von Normalbeton zu UHPC sind es 12,88 %. Mittelte man die Ergebnisse von Leichtbeton und UHPC, ergab sich ein Unterschied von 50,02 %. Diese Ergebnisse verdeutlichten, dass durch die verschiedenen materialspezifischen thermischen Eigenschaften hohe Abweichungen zueinander zu erwarten sind.
 - o Die instationäre Betrachtung des Heizzyklus lieferte für die verschiedenen Materialien deutliche Abweichungen wie sie aufgrund der thermischen Materialeigenschaften zu erwarten waren. Leichtbeton hatte im Maximalbereich mit einem prozentualen Unterschied von 42,07 % zu UHPC und 35,04 % zu Normalbeton die größten Unterschiede der untersuchten Varianten. Vergleich man den Normalbeton zu UHPC, ergab sich ein Unterschied von 10,82 %.
 - o Die Materialien zeigten auch im Fall „Permanent An“ deutliche Unterschiede. Die 50 % der Referenzvariante wurden von UHPC und Normalbeton zwar annähernd gleichzeitig erreicht – 10 Minuten Differenz – im Vergleich zu Leichtbeton war bereits eine große Zeitdifferenz auszumachen, sie benötigte 3 Stunden und 30 Minuten länger als UHPC. Während Leichtbeton die 90 % der Referenz nie erreichte, benötigte der UHPC um 5 Stunden und 50 Minuten weniger als Normalbeton.
 - o Die materialspezifischen Eigenschaften zeigten sich auch im Fall „Permanent Aus“ deutlich. Zu Beginn hatte der Leichtbeton die 90 % Grenze nicht überschritten, UHPC unterschritt diese um 2 Stunden und 30 Minuten später als Normalbeton. 50 % wurden von allen Varianten erreicht, es zeigte sich, dass der Leichtbeton um 16 Stunden früher diese Grenze unterschritt als UHPC. Die 10 % Marke zeigte, dass sich die Kurven schnitten, wie in Abbildung 49 dargestellt, der Leichtbeton zwar nicht den anfänglichen höheren Wert der Kennliniensteigung der anderen beiden Varianten kompensieren konnte, aber die besseren Wärmedämmeigenschaften des Normalbetons überwogen und er um 3 Stunden und 10 Minuten langsamer abkühlte als der UHPC.

⁶² Vgl. ÖNORM B 4710-1: 2007 10 01

⁶³ Vgl. ÖNORM EN 206: 2017 05 01

4.2.6 Interpretation der Höhenlage

Den abschließenden Punkt dieser Arbeit stellte die Untersuchung der Höhenlage dar. Es wurden 4 verschiedene Positionen untersucht, um den Parameter möglichst genau zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigten, dass eine geringe Deckungslage die höchsten Werte für die Abgabeleistung eines Heiz-/Kühlsystems liefern. Sie wurde weniger, wenn die Rohrregister weiter nach oben in den Querschnitt verschoben wurden. Aus den zeitabhängigen Berechnungen ging hervor, dass die Speicherwirkung der Höhenposition weit oben im Querschnitt günstiger war als umgekehrt. Dies zeigte sich am deutlichsten bei der zyklischen Berechnung, wo der Querschnitt nie vollends Richtung Ergebnis aus der stationären Berechnung konvergierte.

Erklären ließen sich diese Beobachtungen dadurch, dass Bereiche in der Nähe des Rohres stärker beeinflusst wurden. Es traten beispielsweise bei einer Heizung höhere Temperaturen weit oben im Querschnitt auf, wenn das Rohr eine hohe Deckungslage hatte. Für die stationäre Betrachtung galt, dass keine so hohen Abgabeleistungen an der gewünschten Unterseite erzielt werden konnten. Aufgrund der betonkernaktivierten Speicherfähigkeit wurde Wärme länger im oberen Bereich des Querschnitts gespeichert und langsamer an die Unterseite abgegeben.

Die Überlegungen der Höhenlage sind von zentraler Bedeutung. Wenn die Heizregister an anderen Positionen angebracht werden, können lediglich Abstandhalter bereits im Werk eingebaut werden, es gibt kaum Unterschiede zu Ortbetonlösungen. Für die Fertigteilbauweise zeigt sich, dass Lösungen weit unten im Querschnitt nicht nur denkbar sind, sondern auch günstig sein können. Es muss aber bedacht werden, dass die Speicherwirkung des Betons bei geringer Deckungslage nicht so groß ist, wie weiter oben im Querschnitt. Dennoch sind auch hier die positiven Effekte deutlich erkennbar.

- Alle Positionen miteinander zu vergleichen wäre nicht zweckführend, da die einzelnen Positionen zueinander viel zu sehr voneinander abwichen. Daher wurden alle Positionen mit der geringsten Deckungslage verglichen. Im stationären Fall zeigte sich ein mittlerer Unterschied bei 3 cm zu 5 cm von 4,77 %. Der Vergleich 3 cm zur mittleren Position konnte man eine prozentuale Differenz von 19,11 %, zur höchsten Deckungslage 31,83 % errechnen.

- o Die zyklische Betrachtung lieferte den größten Unterschied der Ergebnisse für die Höhenposition im Maximalbereich für die Betrachtung 3 cm von unten zu 3 cm von oben mit einem Unterschied der Kennliniensteigung um 31,80 %. Im minimalen Bereich drehten sich die und die Speichereigenschaften des Betonquerschnitts wurden aktiviert. Am meisten kühlte in dieser Betrachtung die Variante mit der Position in der Mitte aus. Dies war einerseits darauf zurückzuführen, dass der Querschnitt durch die Positionierung der Rohre nie ähnlich hohe Werte für die Kennliniensteigung erreichen konnte, wie vergleichsweise Positionen mit niedriger Deckung und andererseits auf die weniger aktivierte Speicherfähigkeit gegenüber der Position 3 cm von oben.
- o Für den Fall „Permanent An“ waren wieder deutlich Unterschiede auszumachen. Zum einen zeigte sich bereits bei der festgesetzten 50 % Marke, dass die Positionen weit unten im Querschnitt viel weniger träge waren als die Positionen mit hoher Überdeckung. Im Vergleich der niedrigsten Deckung mit höchster ergab sich ein Unterschied von 7 Stunden und 20 Minuten. Die 90 % Grenze wurden von der Position Mitte und 3 cm von oben nicht erreicht. Lediglich die beiden Positionen mit geringer Deckungslage unten erreichten diese Marke um 2 Stunden und 50 Minuten zeitversetzt.
- o Entgegen der anfänglichen Erwartungshaltung bewies die letzte instationäre Betrachtung „Permanent Aus“, dass die Speichereigenschaften auch für Varianten mit geringer Deckung gegeben sind. Beide untersuchten Höhenpositionen mit geringer Deckung verliefen annähernd im Gleichschritt, wiesen einen maximalen Zeitunterschied von 50 Minuten bei der Betrachtung der 10 % Grenze auf. Durch den anfänglichen Start-Vorteil waren aber auch die Unterschiede zwischen den anderen Höhenpositionen gering. Die höchste Deckungslage mit der geringsten verglichen zeigte einen Unterschied von 3 Stunden und 40 Minuten. Würden alle Varianten mit einem gleichen Ausgangswert der Kennliniensteigung starten, würde die höchste Deckungslage die Energie langsamer abgeben.

4.3 Diskussion zur Implementation als Fertigteilbauweise

In diesem Kapitel wird nur auf einige Punkte eingegangen, da viele Problemstellungen erst nach Einführung der betonkernaktivierten Decke in den Regelbetrieb auftreten werden. Es wird versucht mögliche Probleme aufzuzeigen.

4.3.1 Planungsgrundlagen

Die Entscheidung für oder gegen eine betonkernaktivierte Decke muss früh in der Phase des Projekts passieren. Die Leistung der Heizung muss auf die Geometrie des Projekts sowie die Aufbauten der Außenbauteile abgestimmt werden. Fällt die Entscheidung für eine Deckenheiz- und -kühlsystem muss vor allem auf die Machbarkeit als Fertigteilbauweise

eingegangen werden. Einzelne Elementplatten müssen entweder als gesamtes System angesehen werden, oder als Teilelemente bei dem jedes einzelne Element selbstständig als Heizung/Kühlung funktioniert.

Dies verlangt eine Adaptierung der Software. Wenn Rohrregister verlegt werden sollen, muss die verwendete Software aufgrund der geometrischen Betrachtung eines Raumes und Eingabe einiger Randbedingungen im Stande sein, die Rohre selbstständig zu verlegen. Dies sollte durch die Anwendung eines geschickten Algorithmus möglich sein.

4.3.2 Positionierung im Querschnitt

Wie bereits in anderen Kapiteln erklärt wurde, weshalb dieses Thema so wichtig ist, muss nun auch an dieser Stelle auf die Eigenheiten eingegangen werden. Grundsätzlich sind drei Möglichkeiten für die Fertigteilbauweise möglich:

- Es werden Abstandhalter ähnlich der für die obere Bewehrungslage eingebaut. Damit wären beliebige Höhenpositionen im Querschnitt möglich, abgesehen von der Elementplatte. Für die Fertigteilbauweise ändert sich in der Planung wenig, lediglich die Verwendung zusätzlicher Abstandhalter müssten in den Betrieb integriert werden. Den Anschluss der Elemente und ihre Prüfung werden von externen Firmen übernommen.
 - o Vorteile: Es ist eine einfache Variante bei der für den laufenden Betrieb keine großen Kosten anfallen würden und keine Veränderungen im Herstellungsablauf sind. Abgesehen von der Elementplatte sind beliebige Höhenpositionen, Achsabstände, Rohrdurchmesser etc. möglich. Es ist kein zusätzliches Know-How innerhalb der Firma erforderlich. Durch die höhere Position wird besser gewährleistet, dass spätere Nutzer der thermisch aktivierten Decke durch Bohren in die Decke keine Rohrregister beschädigen.
 - o Nachteile: Ein Fertigteilhersteller hat wenig mit der eigentlichen Betonkernaktivierung zu tun. Die Rohrregister können nicht in die Elementplatte eingelegt werden. Es entsteht kein neues Produkt.
- Eine zweite Möglichkeit wäre es, die Rohrregister direkt auf die Elementplatten im Werk aufzulegen. Damit wären neue Arbeitsschritte hinsichtlich der Planung, Einkauf und Arbeitsprozesses nötig. Die Rohrregister können einfach an die Gitterträger angebunden werden.
 - o Vorteile: Das hier entstehende System liegt auf der Platte, damit sind keine Abstandhalter oder sonstige Adaptierungen notwendig. Der Einbau ist relativ einfach zumal die Rohre einfach aufgelegt werden. Die Dichtheitsprüfungen und Zusammenschlüsse können erst vor Ort durchgeführt werden, damit ist kein zusätzliches Know-How in der Firma erforderlich. Ein neues Produkt entsteht.

- o Nachteile: Die Rohre sind während des Transports und auf der Baustelle ungeschützt und können leicht verletzt werden. Für Planung, Einkauf und Schalarbeiter sind neue Herausforderungen geboten. Es müssen neue Abläufe geplant werden. Nur eine Höhenposition ist möglich.
- Eine weitere Option wäre die Heizregister bereits direkt in die Platte einzulegen und bereits im Werk einzubinden. Auch hier wird die Implementation neuer Arbeitsschritte vorausgesetzt.
 - o Vorteile: Diese Variante schützt die Rohre, da sie bereits im Werk vom Beton umgeben sind. Ein neues Produkt entsteht.
 - o Nachteile: Nur eine Position ist möglich, dabei ist die Gefahr groß, dass durch Bewohner ein Loch in die Decke gebohrt wird und die Heizregister erwischt und beschädigt werden. Neue Arbeitsabläufe müssen integriert werden.

4.3.3 Druckdichtheitsprüfungen und zusätzliches Know-How

Werden die Rohrregister bereits im Werk verlegt, kann gleich ein funktionierendes Endprodukt verkauft werden. Dazu wird zusätzliches Wissen benötigt. Zum einen muss gewährleistet werden, dass die Rohre den Druckdichtheitsprüfungen entsprechen, zum anderen dass die Anschlüsse dicht miteinander angeschlossen werden können. Damit muss vor Ort lediglich der Anschluss an ein Heiz-/Kühlsystem passieren.

Dies erfordert zusätzliches Wissen, das in dieser Form nicht vorhanden ist. Durch externe Betreuer kann diese Prüfung entweder direkt im Werk durchgeführt oder vor Ort erledigt werden. Eine andere Option wäre einen Spezialisten auszubilden, der diese Arbeiten erledigen kann.

4.4 Ausblick

Die Betonkernaktivierung ist bereits in einigen anderen Werken untersucht worden. Nichts desto weniger ist es ein sehr aktuelles Thema in Bezug auf umwelt- und ressourcenschonendes Denken. Durch die Möglichkeit des Heizens und Kühlens in einem System ist es auch für die immer wärmer werdenden Sommer und den damit verbundenen sommerlichen Wärmeschutz ein interessantes Thema.

In dieser Arbeit wurden verschiedene Parameter untersucht, die die Leistungsfähigkeit und die thermische Trägheit von verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet. Dabei wird stets versucht das gesamte Verhalten zu betrachten und nicht nur auf einzelne Effekte einzugehen. Die Ergebnisse, die aus den Simulationen gewonnen wurden, können ohne Probleme auf eine Fertigteilbauweise und Ortbetonlösungen angewendet werden. Es wird gezeigt, dass die Veränderung einzelner Parameter große Auswirkung haben, andere untersuchte Parameter die Ergebnisse dieser Arbeit weniger beeinflussen. Dabei wurde bei

der Ausführung der Ergebnisse auf große Rechengenauigkeit geachtet und versucht die Realität bestmöglich abzubilden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine thermisch aktivierte Decke großes Potential hinsichtlich der Abgabeleistung besitzt.

Die Integration in ein Fertigteilwerk stellt einen innovativen Ansatz dar, der das Thema bereichert. Durch die Zusammenarbeit mit einer Firma und den Inputs durch verschiedene Fachplaner und Überlegungen hinsichtlich der Machbarkeit, sind fast ausschließlich Parameter untersucht worden, die auch umgesetzt werden können (Anmerkung: außer verschiedene Materialien).

Da man im Zuge einer Diplomarbeit nicht alles von einem Thema abbilden und untersuchen kann, sind einige Punkte weiterhin offen und müssen bei Bedarf untersucht werden. Beispielsweise die genaue Analyse der Nusselt-Zahl für das Heiz- Kühlmedium im Rohr. Hier sind vor allem Kenntnisse über Strömungsvorgänge sowie Fachwissen über das thermische Verhalten von bewegten Fluiden notwendig. Eine genaue Abbildung hiervon würde die Ergebnisse noch verfeinern. Ebenso wäre es von Interesse verschiedene Fußbodenaufbauten und hier im Speziellen, was passiert, wenn ein größerer Wärmestrom nach oben zugelassen wird, zu untersuchen. Für die bessere Vergleichbarkeit und die Anwendung in einem Projekt wurde aber auf dies verzichtet. Zwar wurde mehrmals auf die untergeordnete Bedeutung des Rohrdurchmessers hingewiesen, nichts desto weniger sind zusätzliche Untersuchungen zu diesem Thema interessant. Im Hinblick auf Dauerhaftigkeit und Strapazierfähigkeit der verwendeten Materialien könnten weitere Untersuchungen gemacht werden. Damit könnten Verletzungen der Rohrregister vermieden werden. Wie bereits des Öfteren erwähnt, ist hier nur ein Bruchteil der verschiedenen möglichen Materialien und Deckenstärken behandelt worden. Einen 30 cm hohen UHPC Querschnitt zu verwenden, erscheint aus baupraktischen Überlegungen sinnlos. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Deckenstärken aber nicht variiert worden. Projektspezifische, herstellerabhängige Materialien können nicht mit den hier dargestellten Ergebnissen übereinstimmen, sie dienen als qualitative Aussagen, an denen man sich orientieren kann. Hier ist forschungsbedarf vorhanden. Nicht behandelt in dieser Arbeit sind mögliche Betriebs- und Energiekosten des Systems. Dies hängt stark vom Energieversorgungskonzept, den Wärmedämmeigenschaften des Objekts, den benutzerspezifischen Anforderungen hinsichtlich Behaglichkeit und der Geometrie des Gebäudes ab. Eine allgemeingültige Aussage ist nicht zur Gänze möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass viele Punkte nicht nur in dieser Arbeit, sondern auch in anderen bereits behandelt wurden. Nichts desto weniger sind immer noch Themengebiete mit Forschungsbedarf vorhanden, obgleich nicht alle bauspezifisch sind, sondern in andere Fachgebiete übergreifen. Die gewonnenen Ergebnisse helfen bei der Einführung eines neuen Systems in ihr Werk und bei der Entwicklung eines neuen Produkts. Sie zeigen, dass ein betonkernaktiviertes Fertigteillement funktioniert und in vielen Fällen günstig auswirken kann.

5 Zusammenfassung

Zum Parameter Putz kann gesagt werden, dass er deutliche Unterschiede der Werte für die Kennliniensteigung offenbarte. In sämtlichen Betrachtungen zeigte sich, dass niedrigere Werte für eine verputzte Deckenuntersicht erzielt wurden, als bei einer unverputzten. Im Mittel ergab es für den stationären Fall einen prozentualen Unterschied von 7,09 %. Aus den instationären Simulationen gingen ähnliche Erkenntnisse hervor. Für die zyklische Betrachtung wurden bei einer unverputzten Deckenuntersicht im Maximalbereich um 6,69 % geringere Abgabeleistungen erzielt, als bei einer verputzten. Beim Aufheizvorgang wurde ersichtlich, dass sich durch das Aufbringen einer Putzschicht das System träger verhielt. Beim Abkühlvorgang zeigten sich aber auch positive Eigenschaften einer Putzschicht. Es wurde die Wärme bei einer verputzten Deckenuntersicht langsamer an den untenliegenden Raum abgegeben. Zurückzuführen waren die Ergebnisse auf die materialspezifischen thermischen Eigenschaften des Putzes. Durch das Aufbringen einer 1 cm dicken Putzschicht mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Putz}} = 0,98 \text{ W/mK}$ wurde die Wärme gehindert an die Deckenuntersicht zu gelangen.

Verschiedene Rohrdurchmesser brachten kleine Unterschiede für die Leistungsfähigkeit einer Deckenheizung /-kühlung. Dabei war es egal, mit welchem Parameter verglichen wurde, das Ergebnis veränderte sich kaum. Im Mittel wurde ein Unterschied von 2,53 % für die stationäre Betrachtung errechnet. Die instationären Simulationen offenbarten ebenfalls keine großen Differenzen zwischen den Rohrdurchmessern. Der zyklische Verlauf sowie Auf- bzw. Abkühlvorgänge zeigten kaum Unterschiede bei Veränderung dieses Parameters. Die geringen Differenzen wurden durch die vergleichsweise minimale Erhöhung der Volumina der Rohrdurchmesser im Vergleich zum Betonquerschnitt erklärt. Für thermische Betrachtungen konnte keine Relevanz dieses Parameters festgestellt werden, bedenkt man aber Einbau, statische Überlegungen etc. wird die Bedeutung des Parameters deutlich.

Die Auswertung der Berechnungen vom Achsabstand verdeutlichte, dass dieser große Relevanz hinsichtlich der Wärmeabgabeleistung einer Deckenheizung besitzt. Bereits bei einer Änderung des Achsabstands von 15 cm auf 20 cm wurde eine Veränderung der Kennliniensteigung im Mittel von 6,90 % erzielt. Die Ergebnisse der instationären Simulationen offenbarten diesen Unterschied noch deutlicher. Bei der zyklischen Betrachtung wurde im Maximalbereich sogar ein Unterschied von 12,14 % errechnet. Die Aufheizvorgänge zeigten, dass durch die Vergrößerung des Achsabstandes das System deutlich träger wurde. Durch eine Verringerung des Achsabstandes beeinflussten sich die Wärmequellen innerhalb der Rohre stärker.

Die stationäre Betrachtung verschiedener Deckenstärken zeigte annähernd keinen Unterschied für geringe Deckungslagen, hingegen bei hohen Deckungslagen große Differenzen. Es wurde vor allem auf den Vergleich zur Höhenlage eingegangen, da anhand von diesem am besten illustriert werden konnte, dass die Veränderung der Deckenstärke an manchen Höhenpositionen keine Änderungen der Kennliniensteigung mit sich brachte und an anderen große Unterschiede deutlich wurden. Bei geringer Deckungslage wurden im

Mittel Unterschiede von 0,06 % der 3 untersuchten Deckenstärken errechnet. Für hohe Deckungslagen ergab sich eine mittlere Differenz von 5,05 %. Noch deutlicher traten die Unterschiede und positiven Effekte bei den instationären Simulationen auf. Der Abkühlvorgang offenbarte eindrucksvoll, dass aufgrund der zusätzlichen Masse bei größeren Deckendicken die Wärmespeichereigenschaften des Betons besser zur Geltung kommen. Obgleich schlankere Decken höhere Startwerte der Kennliniensteigung aufwiesen, kühlten diese dennoch deutlich schneller ab.

Die genaue Betrachtung von verschiedenen Betonsorten machte die materialspezifischen thermischen Eigenschaften deutlich. Dabei wirkte sich die Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Normalbeton deutlicher auf das Ergebnis aus, als die Erhöhung. Im Mittel wurde eine Differenz von Normalbeton zu Leichtbeton von 43,31 % errechnet, zwischen Normalbeton und UHPC betrug dieser Unterschied immerhin noch 12,88 %. Ähnlich verhielten sich die instationären Simulationen. Bei den Aufheizvorgängen wurde der höchste Grenzwert der Referenzvariante von Leichtbeton gar nicht erreicht, UHPC erreichte ihn im Vergleich zu Normalbeton gar um 5 Stunden und 50 Minuten früher. Die Abkühlvorgänge offenbarten dann die positiven Eigenschaften einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit. Normalbeton, der aus den stationären Ergebnissen im Mittel um 12,88 % niedrigere Werte als UHPC hatte, unterschritt die 10 % Marke sogar um 3 Stunden und 10 Minuten später als UHPC.

Die Höhenlage war wohl der wichtigste zu untersuchende Parameter für die Fertigteilbauweise. Nach genauer Untersuchung dieses Parameters im stationären Fall wurde klar, dass sich eine Positionierung im Fertigteilelement aus thermischen Betrachtungen als günstig herausstellte. Aus dem Vergleich mit der geringsten Deckungslage von 3 cm oberhalb der Stahlbetonunterkante wurde gezeigt, dass sich prozentuale Unterschiede von bis zu 31,83 % zur höchsten Deckungslage einstellten. Dasselbe Ergebnis spiegelte sich auch bei den instationären Simulationen wider. Bei der zyklischen Betrachtung wurden im Maximalbereich ähnliche Werte errechnet. Bei den Abkühlvorgängen wurde gezeigt, dass ein Betonquerschnitt durch die Positionierung knapp unterhalb der Oberkante zwar langsamer an Wärme verliert, verglichen mit dem Startvorteil von geringen Deckungslagen, aber schneller die festgesetzten Grenzwerte der Referenzvariante unterschreitet. Zurückzuführen war das, auf die Homogenität und hohe Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton. Egal welchen Fall man betrachtete, die Temperaturen an der Grenzfläche von Stahlbetonoberkante und Schüttung waren stets ähnlich. Hingegen wurden an der Stahlbetonunterseite größere Temperaturunterschiede gemessen, weshalb sich auch die höheren Werte für die Kennliniensteigung erklären ließen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN ISO 10456: 2010 02 15, 15.02.2010: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor 1:2009) (konsolidierte Fassung).
- [2] ÖNORM EN 12524: 2000 09 01, 01.09.2000: Baustoffe und -produkte - Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte.
- [3] ÖNORM EN ISO 6946: 2008 04 01, 01.04.2008: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren.
- [4] Bergmeister, Konrad; Fingerloos, Frank; Wörner, Johann Dietrich (Hg.) (2016): Beton Kalender 2016. Beton im Hochbau, Silos und Behälter. Berlin: Ernst & Sohn (Beton-Kalender, 105.2016). Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1163675>.
- [5] ÖNORM EN 206: 2017 05 01, 01.05.2017: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- [6] ÖNORM B 4710-1: 2007 10 01, 01.10.2007: Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Normal- und Schwerbeton).
- [7] ÖNORM B 4710-2: 2008 09 01, 01.09.2008: Beton - Teil 2: Gefügedichter Leichtbeton mit einer Mindesttrockenrohdichte von 800 kg/m³ - Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Leichtbeton.
- [8] Durcrete GmbH: Technische Daten Nanodur Beton. Online verfügbar unter <http://durcrete.de/technische-daten-nanodur/>, zuletzt geprüft am 12.11.2017.
- [9] ÖNORM EN ISO 13790: 2008 10 01, 01.10.2008: Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008).
- [10] ÖNORM EN 1992-1-1: 2015 02 15, 15.02.2015: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung).
- [11] Expertenforum Energiespeicher Beton; Expertenforum Energiespeicher Beton: Visionäres Energiemanagement - von der Forschung zur Umsetzung; Expertenforum Beton (2015): Tagungsband Expertenforum November 2015. Wien: Zement + Beton Handels- und Werbeges. m.b.H (Zement + Beton, Tagungsband November 2015).
- [12] Friedrich, Thomas (2014): Opus C Planen & Gestalten mit Beton. Die Entwicklung der Flachdecke. Neue Deckensysteme aus Betonfertigteilen. In: *Opus C*.
- [13] Friembichler, Felix; Handler, Simon; Krec, Klaus; Kuster, Harald (2016): Thermische Bauteilaktivierung. Energiespeicher Beton Planungsleitfaden Einfamilien- und Reihenhäuser. 1. Ausgabe (Berichte aus Energie- und Umweltforschung).
- [14] Furche, Johannes; Bauermeister, Ulrich (2015): Betonkalender 2016. Elementbauweise mit Gitterträgern nach Eurocode 2. Sonderdruck. In: *Betonkalender*.
- [15] Normenentwurf ÖNORM EN 12831-1: 2014 11 15, 15.11.2014: Heizungsanlagen und wasserbasierte Kühlanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast.
- [16] Krec, Klaus (2015): Energiespeicher Beton. Forschungsprojekt im Auftrag von: Vereinigung Österreichischer Zementwerke.
- [17] Krec, Klaus; Kuster, Harald; Zillner, Theodor; Warmuth, Hannes (2015): Tagungsband Expertenforum November 2015. Wien: Zement + Beton Handels- und Werbeges. m.b.H (Zement + Beton, Tagungsband November 2015).
- [18] Meier, Claus (2010): Phänomen Strahlungsheizung. Ein humanes Heizsystem wird rehabilitiert ; mit 14 Tabellen. 2., durchges. Aufl. Renningen: expert-Verl.
- [19] Richtlinie OIB-330.5-002/15, 26.03.2015: OIB-Richtlinie 5 - Schallschutz.

- [20] OIB-330.6-009/15, 26.03.2015: OIB-Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz.
- [21] ÖNORM EN 1264-2: 2013 01 01, 01.01.2013: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden.
- [22] ÖNORM EN 1264-3: 2009 10 01, 01.10.2009: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 3: Auslegung.
- [23] ÖNORM EN 1264-5: 2009 01 01, 01.01.2009: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden - Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühlleistung.
- [24] Rehau GmbH: Preisliste Gebäudetechnik 2013. Österreich 850310 AT gültig ab April 2013.
- [25] Salzburger Landesregierung (22.06.2016): 55. Verordnung der Salzburger Landesregierung vom 22. Juni 2016, mit der bautechnische Anforderungen für bauliche Anlagen festgelegt und die Salzburger Altstadterhaltungsverordnung 1982, die II. Schutzzonen-Erhaltungsverordnung, die Gassicherheitsverordnung und die Klärschlamm-Bodenschutzverordnung geändert werden. Erlassung: Salzburger Bautechnikverordnung; Änderung: Salzburger Altstadterhaltungsverordnung 1982, II. Schutzzonen-Erhaltungsverordnung, Gassicherheitsverordnung, Klärschlamm-Bodenschutzverordnung. Fundstelle: Rechts Informations System.
- [26] Skalicki, Simone (2016): Planungshandbuch OIB. Nach den OIB-Richtlinien 2015. [1. Auflage]. Graz: Medienfabrik Graz.
- [27] ÖNORM EN ISO 10211: 2008 04 01, 01.04.2008: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2007).
- [28] ÖNORM B 8110-7, 15.03.2013: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte.
- [29] Zürcher, Christoph; Frank, Thomas (2014): Bauphysik. Bau & Energie. 4., überarb. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverl.
- [30] ÖNORM EN ISO 7730:2005, 01.05.2006: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.
- [31] ÖNORM EN ISO 11855-1: 2015 11 15, 15.11.2015: Umweltgerechte Gebäudeplanung - Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme.
- [32] ÖNORM EN 1264-1: 2011 08 15, 15.08.2017: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 1: Definitionen und Symbole.
- [33] Fouad, Nabil A. (Hg.) (2015): Bauphysik Kalender 2015. Simulations- und Berechnungsverfahren. 15. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=999750>.
- [34] Pöhn, Christian; Pech, Anton (2012): Energieeinsparung und Wärmeschutz, Energieausweis - Gesamtenergieeffizienz ; [aktuell nach OIB-Richtlinie 6, 2011. Energieeinsparung und Wärmeschutz]. 2., erw. Aufl. Wien: Springer (Baukonstruktionen, 1,1).
- [35] Wellpott, Edwin; Bohne, Dirk (2006): Technischer Ausbau von Gebäuden. 9., völlig überarb. und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Kohlhammer.

7. Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 1: | Übersichtsdarstellung des Querschnitts und seiner Materialien | 5 |
| Abb. 2: | Ergebnisdarstellung Gesamtquerschnitt | 7 |
| Abb. 3: | Ergebnisdarstellung Teilquerschnitt | 8 |
| Abb. 4: | Übersicht des Wärmestroms zu den vier untersuchten Höhenpositionen..... | 13 |
| Abb. 5: | Auswirkung von Putz, Achsabstand und Rohrdurchmesser | 19 |
| Abb. 6: | Auswirkung von Putz und Achsabstand | 21 |
| Abb. 7: | Auswirkung von Putz, Höhenlage und Deckenstärke..... | 23 |
| Abb. 8: | Auswirkung von Putz, Deckenstärke und Materialien..... | 26 |
| Abb. 9: | Auswirkung von Rohrdurchmesser und Höhenlage | 29 |
| Abb. 10: | Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Höhenlage und Deckenstärke..... | 30 |
| Abb. 11: | Differenz der Rohrdurchmesser zu Deckenstärke und Höhenlage in Prozent.... | 31 |
| Abb. 12: | Darstellung UHPC und Leichtbeton mit Ø 17 thermisches Verhalten..... | 33 |
| Abb. 13: | Auswirkung von Achsabstand und Höhenlage | 36 |
| Abb. 14: | Differenz der Achsabstände zu Höhenlage und Deckenstärke | 39 |
| Abb. 15: | Auswirkung von Deckenstärke und Höhenlage..... | 44 |
| Abb. 16: | Darstellung unterschiedlicher Deckenstärken mit konstante Überdeckung 19 cm | 45 |
| Abb. 17: | Temperaturentwicklung von links nach rechts: Leichtbeton, Normalbeton und UHPC | 48 |
| Abb. 18: | Auswirkung von verschiedenen Höhenpositionen..... | 52 |
| Abb. 19: | Ergebnisse Heizbetrieb-Leichtbeton und Ø 17mm..... | 55 |
| Abb. 20: | Ergebnisse Heizbetrieb 22 cm hoher Querschnitt und Achsabstand 15 cm | 60 |
| Abb. 21: | Ergebnisse Kühlbetrieb-Leichtbeton und Ø 17mm..... | 64 |
| Abb. 22: | Ergebnisse Kühlbetrieb 22 cm hoher Querschnitt und Achsabstand 15 cm | 67 |
| Abb. 23: | Verlauf des Zyklus On/Off der Heiz- (links) und Kühltemperatur (rechts) des Heizmediums °C..... | 72 |
| Abb. 24: | Ergebnisdarstellung Putz – Zyklus On/Off | 73 |
| Abb. 25: | Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Zyklus On/Off..... | 75 |
| Abb. 26: | Ergebnisdarstellung Achsabstand – Zyklus On/Off | 77 |
| Abb. 27: | Ergebnisdarstellung Deckenstärken – Zyklus On/Off | 80 |
| Abb. 28: | Ergebnisdarstellung Deckenstärken 3 cm Deckung oben – Zyklus On/Off..... | 81 |
| Abb. 29: | Ergebnisdarstellung Materialien – Zyklus On/Off | 83 |
| Abb. 30: | Ergebnisdarstellung Höhenlage – Zyklus On/Off | 85 |
| Abb. 31: | Verlauf des Zyklus “Permanent An” der Heiz- (links) und Kühltemperatur (rechts) des Heizmediums °C | 88 |
| Abb. 32: | Illustration 4 Tage zu 2 Tage | 89 |
| Abb. 33: | Ergebnisdarstellung Putz – Permanent An..... | 89 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Abb. 34: | Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Permanent An..... | 91 |
| Abb. 35: | Ergebnisdarstellung Achsabstand – Permanent An | 92 |
| Abb. 36: | Darstellung der geometrischen Differenzen | 94 |
| Abb. 37: | Ergebnisdarstellung Deckenstärke – Permanent An | 96 |
| Abb. 38: | Ergebnisdarstellung Deckenstärken 3 cm Deckung oben – Permanent An..... | 97 |
| Abb. 39: | Ergebnisdarstellung Materialien – Permanent An | 99 |
| Abb. 40: | Ergebnisdarstellung Höhenlage – Permanent An..... | 101 |
| Abb. 41: | Verlauf des Zyklus “Permanent Aus” der Heiz- (links) und Kühltemperatur (rechts) des Heizmediums °C | 103 |
| Abb. 42: | Ergebnisdarstellung Putz – Permanent Aus..... | 104 |
| Abb. 43: | Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser – Permanent Aus..... | 106 |
| Abb. 44: | Ergebnisdarstellung Achsabstand – Permanent Aus..... | 107 |
| Abb. 45: | Ergebnisdarstellung Deckenstärke – Permanent Aus | 109 |
| Abb. 46: | Ergebnisdarstellung Deckenstärke 3 cm Deckung oben – Permanent Aus..... | 111 |
| Abb. 47: | Ergebnisdarstellung Materialien – Permanent Aus..... | 112 |
| Abb. 48: | Ergebnisdarstellung Höhenlage – Permanent Aus..... | 114 |
| Abb. 49: | Übersicht der Achsabstände und Visualisierung der Isothermen | 121 |

8. Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| Tab. 1: | Übersicht der verwendeten Materialien..... | 4 |
| Tab. 2: | Darstellung der Wärmübergangskoeffizienten | 6 |
| Tab. 3: | Ergebnisvergleich Gesamt- zu Teilquerschnitt..... | 9 |
| Tab. 4: | Ergebnisvergleich Standardmethode zu Detail Variante | 11 |
| Tab. 5: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 16 |
| Tab. 6: | Ergebnisdarstellung Putz – Achsabstand Heizbetrieb | 16 |
| Tab. 7: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 18 |
| Tab. 8: | Ergebnisdarstellung Putz – Achsabstand mit Ø 20 mm Heizbetrieb..... | 18 |
| Tab. 9: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 19 |
| Tab. 10: | Ergebnisdarstellung Putz – Höhenlage Heizbetrieb | 20 |
| Tab. 11: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 22 |
| Tab. 12: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 24 |
| Tab. 13: | Ergebnisdarstellung Putz – Materialien und Deckenstärken | 25 |
| Tab. 14: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 27 |
| Tab. 15: | Ergebnisdarstellung Rohrdurchmesser - Höhenlage..... | 28 |
| Tab. 16: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 30 |
| Tab. 17: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 32 |
| Tab. 18: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 35 |
| Tab. 19: | Ergebnisdarstellung Achsabstand – Höhenlage..... | 35 |
| Tab. 20: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 37 |
| Tab. 21: | Ergebnisdarstellung Achsabstand – Höhenlage und Deckenstärke | 38 |
| Tab. 22: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 40 |
| Tab. 23: | Ergebnisdarstellung Achsabstand – Höhenlage und Materialien..... | 40 |
| Tab. 24: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 43 |
| Tab. 25: | Ergebnisdarstellung Deckenstärke und Höhenlage..... | 43 |
| Tab. 26: | Vergleich veränderte Höhenlage – Überdeckung 19 cm | 46 |
| Tab. 27: | Verwendete Materialien und Kennwerte | 47 |
| Tab. 28: | Ergebnisdarstellung Materialien und Höhenlage..... | 49 |
| Tab. 29: | Ergebnisdarstellung Höhenlage | 51 |
| Tab. 30: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 53 |
| Tab. 31: | Ergebnisse Heizbetrieb-Leichtbeton für 22cm Deckenstärke und Ø 17 mm..... | 54 |
| Tab. 32: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 57 |
| Tab. 33: | Heizbetrieb mit verputztem Querschnitt, Achsabstand 15 cm und Ø 17 mm..... | 58 |
| Tab. 34: | Differenz von verschiedenen Rohrdurchmessern bezogen auf ihre Lage im Querschnitt | 62 |
| Tab. 35: | Ergebnisse Kühlbetrieb-Leichtbeton für 22cm Deckenstärke und Ø 17mm..... | 63 |
| Tab. 36: | Kühlbetrieb mit verputztem Querschnitt, Achsabstand 15 cm und Ø 17 mm..... | 66 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----|
| Tab. 37: | Übersichtsmatrix instationärer Untersuchungen..... | 71 |
| Tab. 38: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 73 |
| Tab. 39: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 75 |
| Tab. 40: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 77 |
| Tab. 41: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 79 |
| Tab. 42: | Übersicht Deckenstärke..... | 80 |
| Tab. 43: | Übersicht Deckenstärken 3 cm oben..... | 82 |
| Tab. 44: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 83 |
| Tab. 45: | Übersicht der untersuchten Variante..... | 85 |
| Tab. 46: | Kennliniensteigung und dazugehörige Temperatur an der Stahlbetonoberkante | 87 |
| Tab. 47: | Break-Even Time – Putz Teil 2..... | 90 |
| Tab. 48: | Break-Even Time – Rohrdurchmesser Teil 2..... | 91 |
| Tab. 49: | Break-Even Time – Achsabstand Teil 2..... | 93 |
| Tab. 50: | Break-Even Time – Achsabstand Teil 2 Kühlung..... | 93 |
| Tab. 51: | Break-Even Time – Deckenstärke Teil 2..... | 96 |
| Tab. 52: | Break-Even Time – Deckenstärke 3 cm Deckung oben Teil 2..... | 98 |
| Tab. 53: | Break-Even Time – Materialien Teil 2..... | 100 |
| Tab. 54: | Break-Even Time – Höhenlage Teil 2..... | 102 |
| Tab. 55: | Break-Even Time – Putz Teil 3..... | 104 |
| Tab. 56: | Break-Even Time – Rohrdurchmesser Teil 3..... | 106 |
| Tab. 57: | Break-Even Time – Achsabstand Teil 3..... | 107 |
| Tab. 58: | Break-Even Time – Achsabstand Teil 3 Kühlung..... | 108 |
| Tab. 59: | Break-Even Time – Deckenstärken Teil 3..... | 109 |
| Tab. 60: | Break-Even Time – Deckenstärken 3 cm Deckung oben Teil 3..... | 111 |
| Tab. 61: | Break-Even Time – Materialien Teil 3..... | 112 |
| Tab. 62: | Break-Even Time – Höhenlage Teil 3..... | 114 |
| Tab. 63: | Temperaturgegenüberstellung im Querschnitt – Permanent Aus..... | 116 |
| Tab. 64: | Break-Even Time – Höhenlage Teil 3 Kühlung..... | 117 |

In den Tabellen werden die Werte mit dem höchsten Wert Fett dargestellt, die mit dem niedrigsten Wert werden unterstrichen.

9. Abkürzungsverzeichnis

| Zeichen | Bedeutung | Einheit |
|----------------------|--|------------------------------------|
| α | Wärmeübergangskoeffizient | [W/m ² K] |
| R_s | Wärmeübergangswiderstand | [m ² K/W] |
| ρ | Rohdichte | [kg/m ³] |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | [W/mK] |
| c_p | spezifische Wärmekapazität | [J/kgK] |
| μ | Wasserdampfdiffusionswiderstand | [-] |
| KH_{Unten} | Kennliniensteigung an Deckenunterseite | [W/m ² K] |
| KH_{Oben} | Kennliniensteigung am Fußboden | [W/m ² K] |
| KH_{Gesamt} | Kennliniensteigung Gesamt | [W/m ² K] |
| q | Wärmeabgabeleistung | [W/m ²] |
| Φ | Wärmestrom | [W/m] |
| σ | Stefan-Boltzmann-Konstante | [W/m ² K ⁴] |
| P | Leistung | [W] |
| t | Dicke | [m] |
| A | Fläche | [m ²] |
| V | Volumen | [m ³] |
| T | Temperatur | [K] |
| FE | Finite Elemente | [-] |

10. Anhang – Stationäre Auswertung

10.1 Anhang A – Stationäre Auswertung Leichtbeton Ø 17 - Heizbetrieb

| | | | Temp1min | Temp1max | Temp2min | Temp2max | Temp3min | Temp3max | Temp4min | Temp4max | WärmeStr1 | Wärmestr2 | WärmeStrges |
|------|------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-------------|
| Ø 17 | 22er Decke | 15A 3Ü | 24,16 | 25,18 | 24,58 | 25,82 | 26,06 | 26,07 | 20,41 | 20,42 | 4,513 | 0,367 | 4,88 |
| | | 15A 5Ü | 23,83 | 24,22 | 24,22 | 24,7 | 26,49 | 26,49 | 20,48 | 20,48 | 3,912 | 0,421 | 4,333 |
| | | 15A 11Ü | 22,84 | 22,86 | 23,15 | 23,17 | 27,36 | 27,42 | 20,54 | 20,54 | 2,781 | 0,478 | 3,259 |
| | | 15A 19Ü | 22,05 | 22,06 | 22,27 | 22,28 | 27,86 | 28,88 | 20,61 | 20,61 | 2 | 0,539 | 2,539 |
| | | 15A 3Ü OP | 24,11 | 25,87 | | | 25,95 | 25,96 | 20,48 | 20,48 | 4,725 | 0,425 | 5,15 |
| | | 15A 5Ü OP | 23,89 | 24,54 | | | 26,39 | 26,39 | 20,48 | 20,48 | 4,088 | 0,423 | 4,511 |
| | | 15A 11Ü OP | 22,92 | 22,96 | | | 27,32 | 27,38 | 20,54 | 20,54 | 2,868 | 0,478 | 3,346 |
| | | 15A 19Ü OP | 22,1 | 22,1 | | | 27,82 | 28,87 | 20,61 | 20,61 | 2,053 | 0,536 | 2,589 |
| | | 20A 3Ü | 23,26 | 24,96 | 23,59 | 25,59 | 25,25 | 25,27 | 20,37 | 20,38 | 5,165 | 0,439 | 5,604 |
| | | 20A 5Ü | 23,14 | 23,92 | 23,47 | 24,38 | 25,65 | 25,69 | 20,41 | 20,41 | 4,562 | 0,485 | 5,047 |
| | | 20A 11Ü | 22,54 | 22,62 | 22,81 | 22,91 | 26,56 | 26,74 | 20,46 | 20,47 | 3,349 | 0,548 | 3,897 |
| | | 20A 19Ü | 21,87 | 21,88 | 22,08 | 22,09 | 26,89 | 28,61 | 20,55 | 20,56 | 2,442 | 0,655 | 3,097 |
| | | 20A 3Ü OP | 23,12 | 25,73 | | | 25,06 | 25,09 | 20,36 | 20,36 | 5,346 | 0,425 | 5,771 |
| | | 20A 5Ü OP | 23,11 | 24,32 | | | 25,55 | 25,59 | 20,4 | 20,4 | 4,734 | 0,472 | 5,206 |
| | | 20A 11Ü OP | 22,59 | 22,72 | | | 26,47 | 26,67 | 20,43 | 20,44 | 3,447 | 0,508 | 3,955 |
| | 20A 19Ü | 21,91 | 21,93 | | | 28,58 | 28,86 | 20,55 | 20,56 | 2,493 | 0,653 | 3,146 | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| OP | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|----------|----------|---------|----------|----------|-------|----------|----------|---------|----------|--|
| Max: | 24,16 | 25,87 | 24,58 | 25,82 | 28,58 | 28,88 | 20,61 | 20,61 | 5,346 | 0,655 | 5,771 | |
| Min: | 21,87 | 21,88 | 22,08 | 22,09 | 25,06 | 25,09 | 20,36 | 20,36 | 2 | 0,367 | 2,539 | |
| Avg: | 22,965 | 23,61687 | 23,27125 | 23,8675 | 26,57875 | 26,87375 | 20,48 | 20,48375 | 3,654875 | 0,49075 | 4,145625 | |

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|------|---------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ø 17 | 25er Decke | 15A 3Ü | 24,17 | 25,19 | 24,6 | 25,83 | 25,93 | 25,93 | 20,43 | 20,43 | 4,518 | 0,377 | 4,895 |
| | | 15A 5Ü | 23,82 | 24,21 | 24,22 | 24,69 | 26,3 | 26,3 | 20,46 | 20,46 | 3,909 | 0,405 | 4,314 |
| | | 15A 12,5Ü | 22,65 | 22,68 | 22,94 | 22,97 | 27,35 | 27,37 | 20,54 | 20,54 | 2,605 | 0,48 | 3,085 |
| | | 15A 22Ü | 21,85 | 21,86 | 22,05 | 22,06 | 27,99 | 28,94 | 20,61 | 20,61 | 1,806 | 0,537 | 2,343 |
| | | 15A 3Ü OP | 24,1 | 25,85 | | | 25,78 | 25,79 | 20,42 | 20,42 | 4,715 | 0,373 | 5,088 |
| | | 15A 5Ü OP | 23,9 | 24,55 | | | 26,23 | 26,24 | 20,45 | 20,45 | 4,092 | 0,398 | 4,49 |
| | | 15A 12,5Ü OP | 22,71 | 22,74 | | | 27,34 | 27,37 | 20,58 | 20,59 | 2,658 | 0,517 | 3,175 |
| | | 15A 22Ü OP | 21,89 | 21,91 | | | 27,97 | 28,95 | 20,61 | 20,61 | 1,854 | 0,536 | 2,39 |
| | | 20A 3Ü | 23,28 | 24,96 | 23,61 | 25,59 | 25,11 | 25,12 | 20,36 | 20,37 | 5,167 | 0,427 | 5,594 |
| | | 20A 5Ü | 23,15 | 23,93 | 23,48 | 24,39 | 25,51 | 25,54 | 20,39 | 20,4 | 4,555 | 0,463 | 5,018 |
| | | 20A 12,5Ü | 22,39 | 22,45 | 22,65 | 22,71 | 26,63 | 26,74 | 20,48 | 20,49 | 3,142 | 0,571 | 3,713 |
| | | 20A 22Ü | 21,7 | 21,72 | 21,88 | 21,9 | 27,06 | 28,71 | 20,57 | 20,57 | 2,218 | 0,673 | 2,891 |
| | | 20A 3Ü OP | 23,14 | 25,72 | | | 24,93 | 24,95 | 20,35 | 20,35 | 5,35 | 0,409 | 5,759 |
| | | 20A 5Ü OP | 23,13 | 24,31 | | | 25,4 | 25,42 | 20,39 | 20,39 | 4,734 | 0,455 | 5,189 |
| | | 20A 12,5Ü OP | 22,44 | 22,52 | | | 26,59 | 26,7 | 20,48 | 20,49 | 3,226 | 0,57 | 3,796 |
| | | 20A 22Ü OP | 21,74 | 21,74 | | | 27,02 | 28,69 | 20,57 | 20,57 | 2,257 | 0,671 | 2,928 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | Max: | 24,17 | 25,85 | 24,6 | 25,83 | 27,99 | 28,95 | 20,61 | 20,61 | 5,35 | 0,673 | 5,759 |
| | | Min: | 21,7 | 21,72 | 21,88 | 21,9 | 24,93 | 24,95 | 20,35 | 20,35 | 1,806 | 0,373 | 2,343 |
| | | Avg: | 22,87875 | 23,52125 | 23,17875 | 23,7675 | 26,44625 | 26,7975 | 20,48062 | 20,48375 | 3,550375 | 0,491375 | 4,04175 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges | | |
|------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------|----------|
| Ø 17 | 30er Decke | 15A 3Ü | 24,18 | 25,2 | 24,6 | 25,84 | 25,71 | 25,71 | 20,41 | 20,42 | 4,523 | 0,367 | 4,89 | | |
| | | 15A 5Ü | 23,83 | 24,2 | 24,23 | 24,68 | 26,03 | 26,05 | 20,43 | 20,44 | 3,914 | 0,384 | 4,298 | | |
| | | 15A 15Ü | 22,39 | 22,41 | 22,65 | 22,67 | 27,32 | 27,33 | 20,54 | 20,55 | 2,34 | 0,48 | 2,82 | | |
| | | 15A 27Ü | 21,6 | 21,61 | 21,77 | 21,78 | 28,17 | 29,02 | 20,62 | 20,62 | 1,565 | 0,546 | 2,111 | | |
| | | 15A 3Ü OP | 24,11 | 25,89 | | | 25,57 | 25,57 | 20,4 | 20,41 | 4,731 | 0,358 | 5,089 | | |
| | | 15A 5Ü OP | 23,88 | 24,54 | | | 25,95 | 25,96 | 20,43 | 20,44 | 4,089 | 0,384 | 4,473 | | |
| | | 15A 15Ü OP | 22,46 | 22,48 | | | 27,28 | 27,29 | 20,54 | 20,54 | 2,407 | 0,477 | 2,884 | | |
| | | 15A 27Ü OP | 21,63 | 21,64 | | | 28,14 | 29,01 | 20,62 | 20,62 | 1,593 | 0,545 | 2,138 | | |
| | | 20A 3Ü | 23,28 | 24,96 | 23,61 | 25,59 | 24,92 | 24,93 | 20,36 | 20,36 | 5,179 | 0,425 | 5,604 | | |
| | | 20A 5Ü | 23,15 | 23,94 | 23,47 | 24,4 | 25,3 | 25,3 | 20,38 | 20,39 | 4,569 | 0,453 | 5,022 | | |
| | | 20A 15Ü | 22,18 | 22,2 | 22,41 | 22,44 | 26,65 | 26,72 | 20,46 | 20,46 | 2,849 | 0,541 | 3,39 | | |
| | | 20A 27Ü | 21,49 | 21,49 | 21,65 | 21,65 | 27,33 | 28,78 | 20,59 | 20,59 | 1,94 | 0,693 | 2,633 | | |
| | | 20A 3Ü OP | 23,15 | 25,72 | | | 24,76 | 24,76 | 20,34 | 20,35 | 5,365 | 0,407 | 5,772 | | |
| | | 20A 5Ü OP | 23,14 | 24,31 | | | 25,19 | 25,19 | 20,38 | 20,38 | 4,745 | 0,446 | 5,191 | | |
| | | 20A 15Ü OP | 22,23 | 22,27 | | | 26,61 | 26,68 | 20,46 | 20,46 | 2,923 | 0,538 | 3,461 | | |
| | | 20A 27Ü OP | 21,52 | 21,52 | | | 27,31 | 28,77 | 20,58 | 20,59 | 1,974 | 0,691 | 2,665 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Max: | 24,18 | 25,89 | 24,6 | 25,84 | 28,17 | 29,02 | 20,62 | 20,62 | 5,365 | 0,693 | 5,772 |
| | | | | Min: | 21,49 | 21,49 | 21,65 | 21,65 | 24,76 | 24,76 | 20,34 | 20,35 | 1,565 | 0,358 | 2,111 |
| | | | | Avg: | 22,76375 | 23,39875 | 23,04875 | 23,63125 | 26,39 | 26,69187 | 20,47125 | 20,47625 | 3,419125 | 0,483437 | 3,902562 |

10.2 Anhang B – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 17 – Heizbetrieb

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|--|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
|--|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|

Anhang – Stationäre Auswertung

| Ø 17 | 22er Decke | | | | | | | | | | | | |
|------|---------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|---------|--------|
| | | 15A 3Ü | 26,88 | 27,32 | 27,61 | 28,15 | 28,2 | 28,2 | 20,59 | 20,59 | 6,868 | 0,519 | 7,387 |
| | | 15A 5Ü | 26,68 | 26,87 | 27,39 | 27,62 | 28,26 | 28,26 | 20,58 | 20,59 | 6,601 | 0,522 | 7,123 |
| | | 15A 11Ü | 25,99 | 26,01 | 26,64 | 26,66 | 28,5 | 28,52 | 20,61 | 20,61 | 5,849 | 0,542 | 6,391 |
| | | 15A 19Ü | 25,19 | 25,2 | 25,76 | 25,76 | 28,55 | 29,06 | 20,63 | 20,64 | 5,065 | 0,561 | 5,626 |
| | | 15A 3Ü OP | 27,34 | 28 | | | 28,03 | 28,04 | 20,58 | 20,59 | 7,436 | 0,517 | 7,953 |
| | | 15A 5Ü OP | 27,17 | 27,46 | | | 28,16 | 28,16 | 20,59 | 20,59 | 7,129 | 0,518 | 7,647 |
| | | 15A 11Ü OP | 26,41 | 26,43 | | | 28,42 | 28,44 | 20,61 | 20,61 | 6,263 | 0,538 | 6,801 |
| | | 15A 19Ü OP | 25,51 | 25,52 | | | 28,48 | 29,01 | 20,63 | 20,63 | 5,38 | 0,558 | 5,938 |
| | | 20A 3Ü | 26,19 | 27,03 | 26,85 | 27,84 | 27,57 | 27,58 | 20,54 | 20,55 | 8,503 | 0,638 | 9,141 |
| | | 20A 5Ü | 26,12 | 26,55 | 26,78 | 27,27 | 27,72 | 27,73 | 20,54 | 20,55 | 8,21 | 0,633 | 8,843 |
| | | 20A 11Ü | 25,62 | 25,68 | 26,23 | 26,29 | 27,97 | 28,05 | 20,58 | 20,58 | 7,348 | 0,687 | 8,035 |
| | | 20A 19Ü | 24,9 | 24,91 | 25,43 | 25,44 | 27,92 | 28,8 | 20,61 | 20,61 | 6,377 | 0,713 | 7,09 |
| | | 20A 3Ü OP | 26,58 | 27,72 | | | 27,41 | 27,42 | 20,53 | 20,54 | 9,155 | 0,63 | 9,785 |
| | | 20A 5Ü OP | 26,52 | 27,1 | | | 27,58 | 27,6 | 20,53 | 20,54 | 8,824 | 0,627 | 9,451 |
| | | 20A 11Ü OP | 25,99 | 26,08 | | | 27,87 | 27,95 | 20,59 | 20,59 | 7,85 | 0,696 | 8,546 |
| | | 20A 19Ü OP | 25,18 | 25,19 | | | 27,82 | 28,74 | 20,6 | 20,6 | 6,746 | 0,705 | 7,451 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | Max: | 27,34 | 28 | 27,61 | 28,15 | 28,55 | 29,06 | 20,63 | 20,64 | 9,155 | 0,713 | 9,785 |
| | | Min: | 24,9 | 24,91 | 25,43 | 25,44 | 27,41 | 27,42 | 20,53 | 20,54 | 5,065 | 0,517 | 5,626 |
| | | Avg: | 26,14187 | 26,44187 | 26,58625 | 26,87875 | 28,02875 | 28,2225 | 20,58375 | 20,58812 | 7,10025 | 0,60025 | 7,7005 |

| Ø 17 | 25er Decke | | | | | | | | | | | | |
|------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------|
| | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges | |
| | | 15A 3Ü | 26,84 | 27,29 | 27,56 | 28,12 | 28,1 | 28,1 | 20,59 | 20,59 | 6,866 | 0,518 | 7,384 |
| | | 15A 5Ü | 26,67 | 26,87 | 27,38 | 27,62 | 28,21 | 28,22 | 20,59 | 20,59 | 6,597 | 0,522 | 7,119 |
| | | 15A 12,5Ü | 25,82 | 25,85 | 26,45 | 26,48 | 28,51 | 28,53 | 20,62 | 20,63 | 5,692 | 0,552 | 6,244 |
| | | 15A 22Ü | 24,94 | 24,95 | 25,47 | 25,48 | 28,6 | 29,08 | 20,64 | 20,64 | 4,82 | 0,568 | 5,388 |
| | | 15A 3Ü | 27,35 | 28 | | | 27,98 | 27,98 | 20,58 | 20,58 | 7,439 | 0,513 | 7,952 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| OP | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 15A 5Ü OP | 27,17 | 27,44 | | | 28,11 | 28,12 | 20,6 | 20,61 | 7,116 | 0,536 | 7,652 |
| 15A 12,5Ü OP | 26,24 | 26,26 | | | 28,42 | 28,43 | 20,59 | 20,6 | 6,091 | 0,524 | 6,615 |
| 15A 22Ü OP | 25,23 | 25,25 | | | 28,55 | 29,05 | 20,63 | 20,64 | 5,112 | 0,56 | 5,672 |
| 20A 3Ü | 26,2 | 27,02 | 26,86 | 27,82 | 27,51 | 27,52 | 20,55 | 20,55 | 8,516 | 0,644 | 9,16 |
| 20A 5Ü | 26,13 | 26,54 | 26,79 | 27,26 | 27,67 | 27,68 | 20,55 | 20,55 | 8,213 | 0,645 | 8,858 |
| 20A 12,5Ü | 25,48 | 25,52 | 26,08 | 26,12 | 28 | 28,06 | 20,59 | 20,6 | 7,153 | 0,699 | 7,852 |
| 20A 22Ü | 24,69 | 24,7 | 25,2 | 25,21 | 28 | 28,84 | 20,61 | 20,62 | 6,099 | 0,724 | 6,823 |
| 20A 3Ü OP | 26,6 | 27,71 | | | 27,36 | 27,37 | 20,54 | 20,54 | 9,162 | 0,64 | 9,802 |
| 20A 5Ü OP | 26,55 | 27,09 | | | 27,53 | 27,54 | 20,54 | 20,54 | 8,829 | 0,634 | 9,463 |
| 20A 12,5Ü OP | 25,83 | 25,88 | | | 27,92 | 27,97 | 20,58 | 20,58 | 7,614 | 0,681 | 8,295 |
| 20A 22Ü OP | 24,94 | 24,95 | | | 27,91 | 28,79 | 20,61 | 20,61 | 6,432 | 0,715 | 7,147 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 27,35 | 28 | 27,56 | 28,12 | 28,6 | 29,08 | 20,64 | 20,64 | 9,162 | 0,724 | 9,802 |
| Min: | 24,69 | 24,7 | 25,2 | 25,21 | 27,36 | 27,37 | 20,54 | 20,54 | 4,82 | 0,513 | 5,388 |
| Avg: | 26,0425 | 26,3325 | 26,47375 | 26,76375 | 28,02375 | 28,205 | 20,58812 | 20,59187 | 6,984437 | 0,604687 | 7,589125 |

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ø 17 | 30er Decke | 15A 3Ü | 26,83 | 27,29 | 27,56 | 28,11 | 28,01 | 28,01 | 20,55 | 20,56 | 6,861 | 0,49 | 7,351 |
| | | 15A 5Ü | 26,67 | 26,86 | 27,38 | 27,61 | 28,14 | 28,14 | 20,58 | 20,59 | 6,593 | 0,516 | 7,109 |
| | | 15A 15Ü | 25,58 | 25,58 | 26,18 | 26,18 | 28,52 | 28,53 | 20,62 | 20,62 | 5,439 | 0,551 | 5,99 |
| | | 15A 27Ü | 24,59 | 24,59 | 25,09 | 25,09 | 28,67 | 29,14 | 20,65 | 20,65 | 4,476 | 0,575 | 5,051 |
| | | 15A 3Ü OP | 27,34 | 28 | | | 27,9 | 27,9 | 20,56 | 20,56 | 7,436 | 0,494 | 7,93 |
| | | 15A 5Ü OP | 27,18 | 27,45 | | | 28,04 | 28,04 | 20,58 | 20,58 | 7,124 | 0,513 | 7,637 |
| | | 15A 15Ü OP | 25,94 | 25,94 | | | 28,46 | 28,46 | 20,62 | 20,62 | 5,795 | 0,546 | 6,341 |
| | | 15A 27Ü | 24,83 | 24,84 | | | 28,62 | 29,11 | 20,65 | 20,65 | 4,718 | 0,572 | 5,29 |

| OP | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|-------|----------|----------|--------|
| 20A 3Ü | 26,19 | 27,02 | 26,85 | 27,84 | 27,46 | 27,46 | 20,54 | 20,54 | 8,513 | 0,634 | 9,147 |
| 20A 5Ü | 26,13 | 26,55 | 26,79 | 27,27 | 27,6 | 27,6 | 20,56 | 20,57 | 8,218 | 0,664 | 8,882 |
| 20A 15Ü | 25,27 | 25,29 | 25,84 | 25,87 | 28,04 | 28,07 | 20,59 | 20,59 | 6,871 | 0,695 | 7,566 |
| 20A 27Ü | 24,37 | 24,38 | 24,84 | 24,85 | 28,12 | 28,91 | 20,62 | 20,62 | 5,684 | 0,726 | 6,41 |
| 20A 3Ü OP | 26,61 | 27,72 | | | 27,29 | 27,3 | 20,54 | 20,54 | 9,163 | 0,635 | 9,798 |
| 20A 5Ü OP | 26,55 | 27,09 | | | 27,46 | 27,47 | 20,55 | 20,55 | 8,831 | 0,649 | 9,48 |
| 20A 15Ü OP | 25,58 | 25,63 | | | 27,94 | 27,98 | 20,58 | 20,58 | 7,29 | 0,684 | 7,974 |
| 20A 27Ü OP | 24,59 | 24,59 | | | 28,04 | 28,86 | 20,61 | 20,62 | 5,967 | 0,725 | 6,692 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 27,34 | 28 | 27,56 | 28,11 | 28,67 | 29,14 | 20,65 | 20,65 | 9,163 | 0,726 | 9,798 |
| Min: | 24,37 | 24,38 | 24,84 | 24,85 | 27,29 | 27,3 | 20,54 | 20,54 | 4,476 | 0,49 | 5,051 |
| Avg: | 25,89062 | 26,17625 | 26,31625 | 26,6025 | 28,01937 | 28,18625 | 20,5875 | 20,59 | 6,811187 | 0,604312 | 7,4155 |

10.3 Anhang C – Stationäre Auswertung UHPC Ø 17 – Heizbetrieb

| Ø 17 | 22er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|---------------|---------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27,63 | 27,82 | 28,45 | 28,68 | 28,71 | 28,71 | 20,63 | 20,63 | 7,527 | 0,559 | 8,086 |
| 15A 5Ü | 27,52 | 27,6 | 28,33 | 28,43 | 28,7 | 28,7 | 20,63 | 20,64 | 7,37 | 0,563 | 7,933 | | |
| 15A 11Ü | 27,2 | 27,2 | 27,98 | 27,99 | 28,77 | 28,78 | 20,63 | 20,63 | 7,024 | 0,558 | 7,582 | | |
| 15A 19Ü | 26,76 | 26,77 | 27,5 | 27,5 | 28,78 | 29,01 | 20,64 | 20,65 | 6,599 | 0,568 | 7,167 | | |
| 15A 3Ü OP | 28,27 | 28,53 | | | 28,54 | 28,55 | 20,62 | 20,62 | 8,174 | 0,546 | 8,72 | | |
| 15A 5Ü OP | 28,18 | 28,3 | | | 28,59 | 28,59 | 20,62 | 20,63 | 8,035 | 0,553 | 8,588 | | |
| 15A 11Ü OP | 27,81 | 27,82 | | | 28,68 | 28,69 | 20,62 | 20,63 | 7,624 | 0,552 | 8,176 | | |
| 15A 19Ü OP | 27,31 | 27,31 | | | 28,69 | 28,94 | 20,63 | 20,64 | 7,129 | 0,562 | 7,691 | | |
| 20A 3Ü | 27,16 | 27,5 | 27,93 | 28,34 | 28,22 | 28,23 | 20,6 | 20,6 | 9,495 | 0,708 | 10,203 | | |
| 20A 5Ü | 27,12 | 27,3 | 27,89 | 28,1 | 28,28 | 28,28 | 20,6 | 20,6 | 9,37 | 0,71 | 10,08 | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 20A 11Ü | 26,85 | 26,9 | 27,6 | 27,64 | 28,38 | 28,41 | 20,59 | 20,59 | 8,94 | 0,697 | 9,637 |
| 20A 19Ü | 26,46 | 26,47 | 27,16 | 27,17 | 28,32 | 28,73 | 20,61 | 20,62 | 8,407 | 0,724 | 9,131 |
| 20A 3Ü OP | 27,76 | 28,21 | | | 28,09 | 28,09 | 20,59 | 20,6 | 10,325 | 0,702 | 11,027 |
| 20A 5Ü OP | 27,72 | 27,96 | | | 28,16 | 28,16 | 20,61 | 20,62 | 10,179 | 0,726 | 10,905 |
| 20A 11Ü OP | 27,42 | 27,46 | | | 28,26 | 28,3 | 20,59 | 20,59 | 9,677 | 0,694 | 10,371 |
| 20A 19Ü OP | 26,95 | 26,96 | | | 28,21 | 28,65 | 20,61 | 20,61 | 9,049 | 0,716 | 9,765 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 28,27 | 28,53 | 28,45 | 28,68 | 28,78 | 29,01 | 20,64 | 20,65 | 10,325 | 0,726 | 11,027 |
| Min: | 26,46 | 26,47 | 27,16 | 27,17 | 28,09 | 28,09 | 20,59 | 20,59 | 6,599 | 0,546 | 7,167 |
| Avg: | 27,3825 | 27,50687 | 27,855 | 27,98125 | 28,46125 | 28,55125 | 20,61375 | 20,61875 | 8,43275 | 0,633625 | 9,066375 |

| Ø 17 | 25er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27,59 | 27,78 | 28,4 | 28,64 | 28,63 | 28,63 | 20,64 | 20,64 | 7,483 | 0,564 | 8,047 |
| 15A 5Ü | 27,51 | 27,6 | 28,33 | 28,43 | 28,66 | 28,66 | 20,62 | 20,62 | 7,369 | 0,545 | 7,914 | | |
| 15A 12,5Ü | 27,1 | 27,12 | 27,87 | 27,89 | 28,77 | 28,79 | 20,65 | 20,65 | 6,936 | 0,574 | 7,51 | | |
| 15A 22Ü | 26,61 | 26,61 | 27,32 | 27,33 | 28,79 | 29,03 | 20,64 | 20,65 | 6,444 | 0,568 | 7,012 | | |
| 15A 3Ü OP | 28,27 | 28,52 | | | 28,53 | 28,53 | 20,63 | 20,63 | 8,169 | 0,559 | 8,728 | | |
| 15A 5Ü OP | 28,18 | 28,3 | | | 28,57 | 28,57 | 20,62 | 20,62 | 8,03 | 0,548 | 8,578 | | |
| 15A 12,5Ü OP | 27,73 | 27,73 | | | 28,67 | 28,68 | 20,62 | 20,63 | 7,535 | 0,553 | 8,088 | | |
| 15A 22Ü OP | 27,13 | 27,14 | | | 28,71 | 28,96 | 20,64 | 20,65 | 6,96 | 0,568 | 7,528 | | |
| 20A 3Ü | 27,15 | 27,51 | 27,92 | 28,34 | 28,21 | 28,21 | 20,58 | 20,59 | 9,492 | 0,687 | 10,179 | | |
| 20A 5Ü | 27,12 | 27,31 | 27,89 | 28,11 | 28,26 | 28,27 | 20,59 | 20,6 | 9,369 | 0,7 | 10,069 | | |
| 20A 12,5Ü | 26,8 | 26,82 | 27,54 | 27,56 | 28,39 | 28,41 | 20,62 | 20,63 | 8,858 | 0,737 | 9,595 | | |
| 20A 22Ü | 26,33 | 26,34 | 27,02 | 27,02 | 28,35 | 28,76 | 20,62 | 20,62 | 8,231 | 0,728 | 8,959 | | |
| 20A 3Ü OP | 27,75 | 28,21 | | | 28,08 | 28,08 | 20,57 | 20,58 | 10,318 | 0,676 | 10,994 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|-------|--------|----------|----------|
| 20A 5Ü OP | 27,71 | 27,95 | | | 28,13 | 28,14 | 20,58 | 20,59 | 10,169 | 0,687 | 10,856 |
| 20A 12,5Ü OP | 27,34 | 27,37 | | | 28,28 | 28,31 | 20,6 | 20,61 | 9,564 | 0,712 | 10,276 |
| 20A 22Ü OP | 26,79 | 26,81 | | | 28,24 | 28,67 | 20,61 | 20,61 | 8,841 | 0,72 | 9,561 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 28,27 | 28,52 | 28,4 | 28,64 | 28,79 | 29,03 | 20,65 | 20,65 | 10,318 | 0,737 | 10,994 |
| Min: | 26,33 | 26,34 | 27,02 | 27,02 | 28,08 | 28,08 | 20,57 | 20,58 | 6,444 | 0,545 | 7,012 |
| Avg: | 27,31937 | 27,445 | 27,78625 | 27,915 | 28,45437 | 28,54375 | 20,61437 | 20,62 | 8,3605 | 0,632875 | 8,993375 |

| Ø 17 | 30er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27,59 | 27,77 | 28,41 | 28,63 | 28,59 | 28,59 | 20,62 | 20,63 | 7,48 | 0,552 | 8,032 |
| 15A 5Ü | 27,52 | 27,6 | 28,33 | 28,42 | 28,64 | 28,64 | 20,63 | 20,63 | 7,366 | 0,554 | 7,92 | | |
| 15A 15Ü | 26,98 | 26,98 | 27,73 | 27,74 | 28,78 | 28,79 | 20,64 | 20,65 | 6,805 | 0,569 | 7,374 | | |
| 15A 27Ü | 26,38 | 26,38 | 27,07 | 27,07 | 28,83 | 29,06 | 20,65 | 20,65 | 6,223 | 0,575 | 6,798 | | |
| 15A 3Ü OP | 28,26 | 28,52 | | | 28,48 | 28,49 | 20,6 | 20,6 | 8,167 | 0,531 | 8,698 | | |
| 15A 5Ü OP | 28,18 | 28,29 | | | 28,54 | 28,55 | 20,62 | 20,62 | 8,031 | 0,547 | 8,578 | | |
| 15A 15Ü OP | 27,55 | 27,56 | | | 28,7 | 28,7 | 20,64 | 20,64 | 7,37 | 0,563 | 7,933 | | |
| 15A 27Ü OP | 28,86 | 28,86 | | | 28,75 | 29 | 20,65 | 20,65 | 6,691 | 0,57 | 7,261 | | |
| 20A 3Ü | 27,15 | 27,5 | 27,92 | 28,34 | 28,17 | 28,17 | 20,58 | 20,59 | 9,494 | 0,685 | 10,179 | | |
| 20A 5Ü | 27,12 | 27,3 | 27,88 | 28,09 | 28,23 | 28,23 | 20,6 | 20,61 | 9,366 | 0,713 | 10,079 | | |
| 20A 15Ü | 26,67 | 26,68 | 27,39 | 27,4 | 28,4 | 28,41 | 20,6 | 20,6 | 8,681 | 0,705 | 9,386 | | |
| 20A 27Ü | 26,11 | 26,11 | 26,78 | 26,78 | 28,4 | 28,79 | 20,62 | 20,62 | 7,951 | 0,725 | 8,676 | | |
| 20A 3Ü OP | 27,74 | 28,21 | | | 28,04 | 28,04 | 20,57 | 20,57 | 10,316 | 0,674 | 10,99 | | |
| 20A 5Ü OP | 27,71 | 27,95 | | | 28,11 | 28,11 | 20,59 | 20,59 | 10,171 | 0,696 | 10,867 | | |
| 20A 15Ü OP | 27,19 | 27,21 | | | 28,29 | 28,3 | 20,59 | 20,59 | 9,368 | 0,696 | 10,064 | | |
| 20A 27Ü OP | 26,55 | 26,55 | | | 28,3 | 28,71 | 20,61 | 20,61 | 8,524 | 0,717 | 9,241 | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges | | |
|------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------|
| Ø 17 | 30er Decke | 15A 3Ü | 21,96 | 23,03 | 21,15 | 22,53 | 20,72 | 20,73 | 25,62 | 25,63 | 5,584 | 0,331 | 5,915 | | |
| | | 15A 5Ü | 22,89 | 23,29 | 22,31 | 22,82 | 20,25 | 20,56 | 25,58 | 25,58 | 4,694 | 0,369 | 5,063 | | |
| | | 15A 15Ü | 24,39 | 24,4 | 24,1 | 24,12 | 18,8 | 18,81 | 25,49 | 25,49 | 2,594 | 0,448 | 3,042 | | |
| | | 15A 27Ü | 24,96 | 24,97 | 24,77 | 24,78 | 17,03 | 17,9 | 25,39 | 25,39 | 1,679 | 0,54 | 2,219 | | |
| | | 15A 3Ü OP | 21,25 | 23,09 | | | 20,91 | 20,91 | 25,64 | 25,64 | 5,933 | 0,32 | 6,253 | | |
| | | 15A 5Ü OP | 22,59 | 23,25 | | | 20,37 | 20,38 | 25,59 | 25,59 | 4,953 | 0,36 | 5,313 | | |
| | | 15A 15Ü OP | 24,35 | 24,36 | | | 18,84 | 18,84 | 25,49 | 25,49 | 2,67 | 0,447 | 3,117 | | |
| | | 15A 27Ü OP | 24,94 | 24,95 | | | 17,04 | 17,92 | 25,39 | 25,39 | 1,711 | 0,539 | 2,25 | | |
| | | 20A 3Ü | 22,13 | 23,8 | 21,34 | 23,42 | 21,57 | 21,58 | 25,69 | 25,69 | 6,236 | 0,367 | 6,603 | | |
| | | 20A 5Ü | 23,11 | 23,78 | 22,56 | 23,5 | 21,07 | 21,08 | 25,64 | 25,64 | 5,353 | 0,419 | 5,772 | | |
| | | 20A 15Ü | 24,53 | 24,56 | 24,27 | 24,3 | 19,44 | 19,49 | 25,51 | 25,51 | 3,145 | 0,578 | 3,723 | | |
| | | 20A 27Ü | 25,04 | 25,05 | 24,87 | 24,87 | 17,25 | 18,79 | 25,45 | 25,45 | 2,065 | 0,651 | 2,716 | | |
| | | 20A 3Ü OP | 21,36 | 23,91 | | | 21,78 | 21,78 | 25,7 | 25,7 | 6,541 | 0,35 | 6,891 | | |
| | | 20A 5Ü OP | 22,77 | 23,89 | | | 21,21 | 21,22 | 25,65 | 25,66 | 5,61 | 0,405 | 6,015 | | |
| | | 20A 15Ü OP | 24,49 | 24,52 | | | 19,49 | 19,53 | 25,51 | 25,52 | 3,232 | 0,572 | 3,804 | | |
| | | 20A 27Ü OP | 25,02 | 25,03 | | | 17,26 | 18,82 | 25,45 | 25,45 | 2,103 | 0,649 | 2,752 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Max: | 25,04 | 25,05 | 24,87 | 24,87 | 21,78 | 21,78 | 25,7 | 25,7 | 6,541 | 0,651 | 6,891 |
| | | | | Min: | 21,25 | 23,03 | 21,15 | 22,53 | 17,03 | 17,9 | 25,39 | 25,39 | 1,679 | 0,32 | 2,219 |
| | | | | Avg: | 23,48625 | 24,1175 | 23,17125 | 23,7925 | 19,56437 5 | 19,89625 | 25,54937 5 | 25,55125 | 4,006437 5 | 0,459062 5 | 4,4655 |

10.5 Anhang E – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 17 - Kühlbetrieb

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|------|---------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ø 17 | 22er Decke | 15A 3Ü | 19,75 | 20,33 | 18,58 | 19,32 | 18,37 | 18,38 | 25,45 | 25,45 | 9,603 | 0,483 | 10,086 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|----------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|---------|------------|
| 15A 5Ü | 20,28 | 20,52 | 19,24 | 19,54 | 18,21 | 18,2 | 25,43 | 25,43 | 9,065 | 0,501 | 9,566 |
| 15A 11Ü | 21,23 | 21,24 | 20,37 | 20,39 | 17,83 | 17,86 | 25,41 | 25,41 | 7,717 | 0,522 | 8,239 |
| 15A 19Ü | 22,04 | 22,04 | 21,32 | 21,32 | 17,15 | 17,78 | 25,39 | 25,39 | 6,419 | 0,539 | 6,958 |
| 15A 3Ü OP | 18,85 | 19,74 | | | 18,61 | 18,62 | 25,47 | 25,48 | 10,76 | 0,463 | 11,223 |
| 15A 5Ü OP | 19,58 | 19,94 | | | 18,41 | 18,41 | 25,45 | 25,45 | 10,097 | 0,484 | 10,581 |
| 15A 11Ü OP | 20,77 | 20,8 | | | 17,97 | 18 | 25,42 | 25,42 | 8,445 | 0,515 | 8,96 |
| 15A 19Ü OP | 21,73 | 21,73 | | | 17,23 | 17,88 | 25,39 | 25,39 | 6,914 | 0,535 | 7,449 |
| 20A 3Ü | 20,05 | 21,05 | 18,92 | 20,17 | 19,09 | 19,1 | 25,5 | 25,5 | 11,598 | 0,587 | 12,185 |
| 20A 5Ü | 20,61 | 21,11 | 19,63 | 20,24 | 18,88 | 18,9 | 25,47 | 25,48 | 11,058 | 0,624 | 11,682 |
| 20A 11Ü | 21,55 | 21,63 | 20,75 | 20,83 | 18,41 | 18,5 | 25,46 | 25,47 | 9,531 | 0,625 | 10,156 |
| 20A 19Ü | 22,31 | 22,32 | 21,65 | 21,66 | 17,45 | 18,51 | 25,43 | 25,43 | 7,962 | 0,669 | 8,631 |
| 20A 3Ü OP | 19,19 | 20,63 | | | 19,38 | 19,39 | 25,53 | 25,53 | 12,845 | 0,558 | 13,403 |
| 20A 5Ü OP | 19,97 | 20,66 | | | 19,13 | 19,15 | 25,49 | 25,5 | 12,199 | 0,596 | 12,795 |
| 20A 11Ü OP | 21,16 | 21,26 | | | 18,58 | 18,69 | 25,48 | 25,48 | 10,352 | 0,61 | 10,962 |
| 20A 19Ü OP | 22,05 | 22,06 | | | 17,53 | 18,68 | 25,44 | 25,45 | 8,532 | 0,653 | 9,185 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 22,31 | 22,32 | 21,65 | 21,66 | 19,38 | 19,39 | 25,53 | 25,53 | 12,845 | 0,669 | 13,403 |
| Min: | 18,85 | 19,74 | 18,58 | 19,32 | 17,15 | 17,78 | 25,39 | 25,39 | 6,419 | 0,463 | 6,958 |
| Avg: | 20,695 | 21,06625 | 20,0575 | 20,43375 | 18,264375 | 18,503125 | 25,450625 | 25,45375 | 9,5685625 | 0,56025 | 10,1288125 |

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ø 17 | 25er Decke | 15A 3Ü | 19,76 | 20,34 | 18,59 | 19,34 | 18,41 | 18,41 | 25,45 | 25,46 | 9,591 | 0,481 | 10,072 |
| | | 15A 5Ü | 20,29 | 20,52 | 19,24 | 19,54 | 18,26 | 18,26 | 25,43 | 25,44 | 9,063 | 0,499 | 9,562 |
| | | 15A 12,5Ü | 21,4 | 21,42 | 20,57 | 20,59 | 17,82 | 17,84 | 25,41 | 25,41 | 7,44 | 0,517 | 7,957 |
| | | 15A 22Ü | 22,26 | 22,27 | 21,59 | 21,59 | 17,1 | 17,69 | 25,38 | 25,38 | 6,048 | 0,544 | 6,592 |
| | | 15A 3Ü OP | 18,87 | 19,75 | | | 18,64 | 18,65 | 25,47 | 25,47 | 10,737 | 0,467 | 11,204 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|----------------------|--------------------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 15A 5Ü OP | 19,58 | 19,93 | | | 18,46 | 18,47 | 25,46 | 25,47 | 10,103 | 0,471 | 10,574 |
| 15A 12,5Ü OP | 20,98 | 21 | | | 17,94 | 17,95 | 25,4 | 25,4 | 8,122 | 0,527 | 8,649 |
| 15A 22Ü OP | 22 | 22,01 | | | 17,18 | 17,8 | 25,39 | 25,39 | 6,472 | 0,535 | 7,007 |
| 20A 3Ü | 20,05 | 21,05 | 18,91 | 20,17 | 19,13 | 19,13 | 25,5 | 25,5 | 11,587 | 0,588 | 12,175 |
| 20A 5Ü | 20,6 | 21,11 | 19,61 | 20,23 | 18,92 | 18,93 | 25,47 | 25,48 | 11,07 | 0,622 | 11,692 |
| 20A 12,5Ü | 21,72 | 21,76 | 20,95 | 21 | 18,37 | 18,44 | 25,46 | 25,47 | 9,209 | 0,625 | 9,834 |
| 20A 22Ü | 22,52 | 22,52 | 21,89 | 21,9 | 17,38 | 18,4 | 25,43 | 25,43 | 7,52 | 0,675 | 8,195 |
| 20A 3Ü OP | 19,17 | 20,63 | | | 19,42 | 19,42 | 25,52 | 25,53 | 12,84 | 0,555 | 13,395 |
| 20A 5Ü OP | 19,96 | 20,67 | | | 19,17 | 19,18 | 25,49 | 25,5 | 12,198 | 0,594 | 12,792 |
| 20A 12,5Ü OP | 21,33 | 21,39 | | | 18,55 | 18,62 | 25,48 | 25,48 | 10,016 | 0,609 | 10,625 |
| 20A 22Ü OP | 22,28 | 22,29 | | | 17,46 | 18,54 | 25,43 | 25,44 | 8,034 | 0,666 | 8,7 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 22,52 | 22,52 | 21,89 | 21,9 | 19,42 | 19,42 | 25,52 | 25,53 | 12,84 | 0,675 | 13,395 |
| Min: | 18,87 | 19,75 | 18,59 | 19,34 | 17,1 | 17,69 | 25,38 | 25,38 | 6,048 | 0,467 | 6,592 |
| Avg: | 20,79812 5 | 21,16625 20,16875 | 20,16875 20,545 | | 18,26312 5 | 18,48312 5 | 25,44812 5 | 25,45312 5 | 9,378125 5 | 0,560937 5 | 9,939062 5 |

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Ø 17 | 30er Decke | 15A 3Ü | 19,76 | 20,33 | 18,59 | 19,33 | 18,49 | 18,49 | 25,44 | 25,45 | 9,599 | 0,492 | 10,091 |
| | | 15A 5Ü | 20,29 | 20,52 | 19,24 | 19,54 | 18,33 | 18,34 | 25,42 | 25,42 | 9,061 | 0,513 | 9,574 |
| | | 15A 15Ü | 21,66 | 21,67 | 20,88 | 20,88 | 17,78 | 17,79 | 25,41 | 25,41 | 7,026 | 0,519 | 7,545 |
| | | 15A 27Ü | 22,6 | 22,6 | 21,98 | 21,99 | 17,02 | 17,57 | 25,38 | 25,38 | 5,511 | 0,548 | 6,059 |
| | | 15A 3Ü OP | 18,85 | 19,75 | | | 18,72 | 18,72 | 25,46 | 25,47 | 10,747 | 0,472 | 11,219 |
| | | 15A 5Ü OP | 19,59 | 19,94 | | | 18,54 | 18,54 | 25,46 | 25,46 | 10,088 | 0,478 | 10,566 |
| | | 15A 15Ü OP | 21,29 | 21,3 | | | 17,9 | 17,91 | 25,42 | 25,42 | 7,626 | 0,512 | 8,138 |
| | | 15A 27Ü OP | 22,38 | 22,37 | | | 17,08 | 17,66 | 25,38 | 25,38 | 5,871 | 0,544 | 6,415 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|---------------|----------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|---------------|----------|
| 20A 3Ü | 20,05 | 21,06 | 18,92 | 20,18 | 19,2 | 19,2 | 25,5 | 25,51 | 11,594 | 0,582 | 12,176 |
| 20A 5Ü | 20,62 | 21,11 | 19,63 | 20,24 | 18,98 | 18,99 | 25,51 | 25,52 | 11,05 | 0,572 | 11,622 |
| 20A 15Ü | 21,9 | 21,92 | 21,16 | 21,19 | 18,37 | 18,4 | 25,44 | 25,44 | 8,838 | 0,656 | 9,494 |
| 20A 27Ü | 22,79 | 22,8 | 22,21 | 22,22 | 17,29 | 18,22 | 25,38 | 25,39 | 6,927 | 0,722 | 7,649 |
| 20A 3Ü OP | 19,18 | 20,63 | | | 19,47 | 19,48 | 25,54 | 25,54 | 12,836 | 0,542 | 13,378 |
| 20A 5Ü OP | 19,96 | 20,67 | | | 19,23 | 19,23 | 25,52 | 25,53 | 12,192 | 0,556 | 12,748 |
| 20A 15Ü OP | 21,62 | 21,66 | | | 18,47 | 18,5 | 25,46 | 25,46 | 9,429 | 0,635 | 10,064 |
| 20A 27Ü OP | 22,61 | 22,62 | | | 17,34 | 18,34 | 25,43 | 25,44 | 7,318 | 0,662 | 7,98 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 22,79 | 22,8 | 22,21 | 22,22 | 19,47 | 19,48 | 25,54 | 25,54 | 12,836 | 0,722 | 13,378 |
| Min: | 18,85 | 19,75 | 18,59 | 19,33 | 17,02 | 17,57 | 25,38 | 25,38 | 5,511 | 0,472 | 6,059 |
| Avg: | 20,94687 5 | 21,30937 5 | 20,32625 | 20,69625 | 18,26312 5 | 18,46125 | 25,44687 5 | 25,45125 | 9,107062 5 | 0,562812 5 | 9,669875 |

10.6 Anhang F – Stationäre Auswertung UHPC Ø 17 – Kühlbetrieb

| | | | <i>Temp1m in</i> | <i>Temp1m ax</i> | <i>Temp2m in</i> | <i>Temp2m ax</i> | <i>Temp3m in</i> | <i>Temp3m ax</i> | <i>Temp4m in</i> | <i>Temp4m ax</i> | <i>WärmStr 1</i> | <i>Wärmstr 2</i> | <i>WärmStr ges</i> |
|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Ø 17 | 22er Decke | 15A 3Ü | 19,18 | 19,43 | 17,93 | 18,26 | 17,85 | 17,86 | 25,41 | 25,41 | 10,828 | 0,518 | 11,346 |
| | | 15A 5Ü | 19,41 | 19,52 | 18,21 | 18,35 | 17,79 | 17,79 | 25,41 | 25,42 | 10,591 | 0,516 | 11,107 |
| | | 15A 11Ü | 19,89 | 19,9 | 18,79 | 18,8 | 17,64 | 17,65 | 25,39 | 25,39 | 9,89 | 0,535 | 10,425 |
| | | 15A 19Ü | 20,41 | 20,41 | 19,4 | 19,4 | 17,32 | 17,63 | 25,39 | 25,39 | 9,057 | 0,542 | 9,599 |
| | | 15A 3Ü OP | 18,18 | 18,55 | | | 18,08 | 18,08 | 25,43 | 25,43 | 12,325 | 0,505 | 12,83 |
| | | 15A 5Ü OP | 18,5 | 18,66 | | | 18 | 18 | 25,42 | 25,43 | 12,021 | 0,507 | 12,528 |
| | | 15A 11Ü OP | 19,13 | 19,14 | | | 17,82 | 17,83 | 25,41 | 25,41 | 11,125 | 0,523 | 11,648 |
| | | 15A 19Ü OP | 19,78 | 19,79 | | | 17,46 | 17,8 | 25,4 | 25,4 | 10,074 | 0,532 | 10,606 |
| | | 20A 3Ü | 19,5 | 19,96 | 18,3 | 18,87 | 18,4 | 18,41 | 25,45 | 25,46 | 13,466 | 0,641 | 14,107 |
| | | 20A 5Ü | 19,75 | 19,99 | 18,62 | 18,91 | 18,31 | 18,32 | 25,45 | 25,45 | 13,216 | 0,65 | 13,866 |
| | | 20A 11Ü | 20,24 | 20,29 | 19,21 | 19,26 | 18,12 | 18,17 | 25,43 | 25,43 | 12,401 | 0,671 | 13,072 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------|-------|----------|---------------|----------|---------------|-------|----------------|---------|----------------|
| 20A 19Ü | 20,73 | 20,74 | 19,78 | 19,78 | 17,66 | 18,2 | 25,42 | 25,42 | 11,38 | 0,681 | 12,061 |
| 20A 3Ü OP | 18,58 | 19,23 | | | 18,68 | 18,68 | 25,47 | 25,48 | 15,185 | 0,617 | 15,802 |
| 20A 5Ü OP | 18,94 | 19,27 | | | 18,57 | 18,58 | 25,47 | 25,47 | 14,869 | 0,626 | 15,495 |
| 20A 11Ü OP | 19,57 | 19,62 | | | 18,34 | 18,4 | 25,45 | 25,45 | 13,845 | 0,652 | 14,497 |
| 20A 19Ü OP | 20,17 | 20,18 | | | 17,83 | 18,42 | 25,43 | 25,44 | 12,59 | 0,664 | 13,254 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 20,73 | 20,74 | 19,78 | 19,78 | 18,68 | 18,68 | 25,47 | 25,48 | 15,185 | 0,681 | 15,802 |
| Min: | 18,18 | 18,55 | 17,93 | 18,26 | 17,32 | 17,63 | 25,39 | 25,39 | 9,057 | 0,505 | 9,599 |
| Avg: | 19,4975 | 19,6675 | 18,78 | 18,95375 | 17,99187 5 | 18,11375 | 25,42687 5 | 25,43 | 12,05393 75 | 0,58625 | 12,64018 75 |

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-------------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ø 17 | 25er Decke | 15A 3Ü | 19,18 | 19,43 | 17,94 | 18,26 | 17,88 | 17,88 | 25,43 | 25,43 | 10,821 | 0,506 | 11,327 |
| | | 15A 5Ü | 19,42 | 19,53 | 18,23 | 18,36 | 17,8 | 17,8 | 25,4 | 25,4 | 10,576 | 0,531 | 11,107 |
| | | 15A 12,5Ü | 20 | 20,01 | 18,92 | 18,93 | 17,63 | 17,65 | 25,4 | 25,4 | 9,716 | 0,531 | 10,247 |
| | | 15A 22Ü | 20,57 | 20,57 | 19,59 | 19,6 | 17,6 | 17,29 | 25,38 | 25,38 | 8,791 | 0,545 | 9,336 |
| | | 15A 3Ü OP | 18,19 | 18,56 | | | 18,1 | 18,1 | 25,44 | 25,44 | 12,314 | 0,492 | 12,806 |
| | | 15A 5Ü OP | 18,51 | 18,66 | | | 18,02 | 18,03 | 25,42 | 25,42 | 12,005 | 0,509 | 12,514 |
| | | 15A 12,5Ü OP | 19,27 | 19,27 | | | 17,81 | 17,82 | 25,4 | 25,41 | 10,907 | 0,524 | 11,431 |
| | | 15A 22Ü OP | 19,98 | 19,99 | | | 17,42 | 17,76 | 25,39 | 25,4 | 9,735 | 0,533 | 10,268 |
| | | 20A 3Ü | 19,51 | 19,95 | 18,3 | 18,86 | 18,42 | 18,42 | 25,44 | 25,45 | 13,468 | 0,656 | 14,124 |
| | | 20A 5Ü | 19,77 | 20 | 18,63 | 18,92 | 18,34 | 18,35 | 25,46 | 25,46 | 13,201 | 0,64 | 13,841 |
| | | 20A 12,5Ü | 20,34 | 20,37 | 19,32 | 19,35 | 18,12 | 18,15 | 25,44 | 25,44 | 12,203 | 0,661 | 12,864 |
| | | 20A 22Ü | 20,88 | 20,88 | 19,96 | 19,96 | 17,63 | 18,15 | 25,41 | 25,42 | 11,059 | 0,69 | 11,749 |
| | | 20A 3Ü OP | 18,59 | 19,24 | | | 18,71 | 18,71 | 25,48 | 25,48 | 15,172 | 0,615 | 15,787 |
| | | 20A 5Ü OP | 18,95 | 19,27 | | | 18,6 | 18,61 | 25,47 | 25,48 | 14,857 | 0,618 | 15,475 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|----------|-------|---------|---------------|---------------|---------------|---------|----------|---------------|
| 20A 12,5Ü OP | 19,68 | 19,72 | | | 18,34 | 18,38 | 25,44 | 25,45 | 13,617 | 0,653 | 14,27 |
| 20A 22Ü OP | 20,35 | 20,35 | | | 17,78 | 18,35 | 25,43 | 25,43 | 12,206 | 0,674 | 12,88 |
| Max: | 20,88 | 20,88 | 19,96 | 19,96 | 18,71 | 18,71 | 25,48 | 25,48 | 15,172 | 0,69 | 15,787 |
| Min: | 18,19 | 18,56 | 17,94 | 18,26 | 17,42 | 17,29 | 25,38 | 25,38 | 8,791 | 0,492 | 9,336 |
| Avg: | 19,57437 5 | 19,7375 | 18,86125 | 19,03 | 18,0125 | 18,09062 5 | 25,42687 5 | 25,43062 5 | 11,9155 | 0,586125 | 12,50162 5 |

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ø 17 | 30er Decke | 15A 3Ü | 19,17 | 19,43 | 17,93 | 18,26 | 17,89 | 17,89 | 25,42 | 25,42 | 10,827 | 0,513 | 11,34 |
| | | 15A 5Ü | 19,42 | 19,52 | 18,22 | 18,36 | 17,84 | 17,84 | 25,41 | 25,41 | 10,58 | 0,52 | 11,1 |
| | | 15A 15Ü | 20,16 | 20,16 | 19,1 | 19,11 | 17,61 | 17,61 | 25,4 | 25,4 | 9,462 | 0,53 | 9,992 |
| | | 15A 27Ü | 20,83 | 20,83 | 19,9 | 19,9 | 17,23 | 17,53 | 25,38 | 25,38 | 8,376 | 0,547 | 8,923 |
| | | 15A 3Ü OP | 18,19 | 18,56 | | | 18,12 | 18,12 | 25,42 | 25,42 | 12,315 | 0,51 | 12,825 |
| | | 15A 5Ü OP | 18,51 | 18,67 | | | 18,05 | 18,06 | 25,43 | 25,43 | 12,003 | 0,504 | 12,507 |
| | | 15A 15Ü OP | 19,46 | 19,47 | | | 17,78 | 17,78 | 25,41 | 25,41 | 10,586 | 0,52 | 11,106 |
| | | 15A 27Ü OP | 20,29 | 20,29 | | | 17,35 | 17,67 | 25,39 | 25,39 | 9,246 | 0,538 | 9,784 |
| | | 20A 3Ü | 19,51 | 19,96 | 18,31 | 18,88 | 18,45 | 18,45 | 25,44 | 25,45 | 13,459 | 0,653 | 14,112 |
| | | 20A 5Ü | 19,76 | 19,99 | 18,63 | 18,92 | 18,37 | 18,37 | 25,45 | 25,45 | 13,205 | 0,649 | 13,854 |
| | | 20A 15Ü | 20,49 | 20,5 | 19,49 | 19,51 | 18,09 | 18,1 | 25,42 | 25,42 | 11,903 | 0,682 | 12,585 |
| | | 20A 27Ü | 21,11 | 21,11 | 20,23 | 20,23 | 17,56 | 18,07 | 25,41 | 25,41 | 10,566 | 0,696 | 11,262 |
| | | 20A 3Ü OP | 18,58 | 19,23 | | | 18,73 | 18,73 | 25,47 | 25,47 | 15,184 | 0,627 | 15,811 |
| | | 20A 5Ü OP | 18,95 | 19,27 | | | 18,62 | 18,62 | 25,45 | 25,46 | 14,86 | 0,643 | 15,503 |
| | | 20A 15Ü OP | 19,87 | 19,88 | | | 18,3 | 18,31 | 25,44 | 25,44 | 13,233 | 0,662 | 13,895 |
| | | 20A 27Ü OP | 20,62 | 20,62 | | | 17,71 | 18,25 | 25,42 | 25,42 | 11,624 | 0,683 | 12,307 |
| | | Max: | 21,11 | 21,11 | 20,23 | 20,23 | 18,73 | 18,73 | 25,47 | 25,47 | 15,184 | 0,696 | 15,811 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------|-----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|------------|-----------|-----------|
| Min: | 18,19 | 18,56 | 17,93 | 18,26 | 17,23 | 17,53 | 25,38 | 25,38 | 8,376 | 0,504 | 8,923 |
| Avg: | 19,6825 | 19,843125 | 18,97625 | 19,14625 | 17,98125 | 18,0875 | 25,4225 | 25,42375 | 11,7143125 | 0,5923125 | 12,306625 |

10.7 Anhang G – Stationäre Auswertung Leichtbeton Ø 20 – Heizbetrieb

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges | |
|------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--|
| Ø 20 | 22er Decke | 15A 3Ü | 24,35 | 25,43 | 24,79 | 26,1 | 26,3 | 26,31 | 20,42 | 20,43 | 4,727 | 0,372 | 5,099 | |
| | | 15A 5Ü | 23,95 | 24,37 | 24,36 | 24,87 | 26,75 | 26,76 | 20,53 | 20,54 | 4,046 | 0,477 | 4,523 | |
| | | 15A 11Ü | 22,92 | 22,96 | 23,24 | 23,29 | 27,53 | 27,28 | 20,56 | 20,56 | 2,874 | 0,493 | 3,367 | |
| | | 15A 19Ü | 22,08 | 22,08 | 22,3 | 22,31 | 28,03 | 29,04 | 20,69 | 20,69 | 2,03 | 0,607 | 2,637 | |
| | | 15A 3Ü OP | 24,3 | 26,16 | | | 26,2 | 26,21 | 20,47 | 20,47 | 4,947 | 0,415 | 5,362 | |
| | | 15A 5Ü OP | 24,04 | 24,7 | | | 26,64 | 26,65 | 20,53 | 20,54 | 4,245 | 0,471 | 4,716 | |
| | | 15A 11Ü OP | 23,02 | 23,07 | | | 27,51 | 27,56 | 20,55 | 20,56 | 2,969 | 0,492 | 3,461 | |
| | | 15A 19Ü OP | 22,12 | 22,13 | | | 27,98 | 29,03 | 20,72 | 20,72 | 2,072 | 0,633 | 2,705 | |
| | | 20A 3Ü | 23,43 | 25,23 | 23,78 | 25,89 | 25,49 | 25,52 | 20,4 | 20,4 | 5,436 | 0,471 | 5,907 | |
| | | 20A 5Ü | 23,28 | 24,12 | 23,62 | 24,6 | 25,9 | 25,94 | 20,43 | 20,43 | 4,769 | 0,505 | 5,274 | |
| | | 20A 11Ü | 22,61 | 22,71 | 22,9 | 23,01 | 26,77 | 26,95 | 20,46 | 20,47 | 3,462 | 0,55 | 4,012 | |
| | | 20A 19Ü | 21,92 | 21,93 | 22,12 | 22,14 | 27,08 | 28,83 | 20,57 | 20,57 | 2,503 | 0,673 | 3,176 | |
| | | 20A 3Ü OP | 23,28 | 26,06 | | | 25,32 | 25,35 | 20,38 | 20,38 | 5,627 | 0,444 | 6,071 | |
| | | 20A 5Ü OP | 23,26 | 24,52 | | | 25,79 | 25,83 | 20,42 | 20,42 | 4,957 | 0,495 | 5,452 | |
| | | 20A 11Ü OP | 22,68 | 22,82 | | | 26,73 | 26,9 | 20,47 | 20,48 | 3,571 | 0,553 | 4,124 | |
| | | 20A 19Ü OP | 21,96 | 21,97 | | | 27,03 | 28,82 | 20,57 | 20,57 | 2,554 | 0,674 | 3,228 | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Max: | 24,35 | 26,16 | 24,79 | 26,1 | 28,03 | 29,04 | 20,72 | 20,72 | 5,627 | 0,674 | 6,071 | |
| | | Min: | 21,92 | 21,93 | 22,12 | 22,14 | 25,32 | 25,35 | 20,38 | 20,38 | 2,03 | 0,372 | 2,637 | |
| | | Avg: | 23,075 | 23,76625 | 23,38875 | 24,02625 | 26,690625 | 27,06125 | 20,510625 | 20,514375 | 3,7993125 | 0,5203125 | 4,319625 | |

| Ø 20 | 25er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-----------------|---------------|----------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 24,33 | 25,43 | 24,77 | 26,1 | 26,17 | 26,18 | 20,41 | 20,42 | 4,725 | 0,366 | 5,091 |
| 15A 5Ü | 23,95 | 24,38 | 24,36 | 24,88 | 26,56 | 26,57 | 20,51 | 20,52 | 4,066 | 0,456 | 4,522 | | |
| 15A 12,5Ü | 22,75 | 22,76 | 23,04 | 23,06 | 27,51 | 27,53 | 20,55 | 20,55 | 2,686 | 0,488 | 3,174 | | |
| 15A 22Ü | 21,89 | 21,9 | 22,1 | 22,11 | 28,11 | 29,12 | 20,69 | 20,69 | 1,85 | 0,611 | 2,461 | | |
| 15A 3Ü OP | 24,28 | 26,18 | | | 26,05 | 26,07 | 20,45 | 20,45 | 4,946 | 0,397 | 5,343 | | |
| 15A 5Ü OP | 24,02 | 24,72 | | | 26,49 | 26,5 | 20,53 | 20,53 | 4,254 | 0,469 | 4,723 | | |
| 15A 12,5Ü OP | 22,82 | 22,85 | | | 27,45 | 27,48 | 20,55 | 20,55 | 2,763 | 0,485 | 3,248 | | |
| 15A 22Ü OP | 21,94 | 21,94 | | | 28,1 | 29,1 | 20,69 | 20,69 | 1,89 | 0,609 | 2,499 | | |
| 20A 3Ü | 23,42 | 25,26 | 23,77 | 25,92 | 25,37 | 25,41 | 20,38 | 20,39 | 5,45 | 0,452 | 5,902 | | |
| 20A 5Ü | 23,29 | 24,12 | 23,63 | 24,59 | 25,73 | 25,75 | 20,4 | 20,41 | 4,77 | 0,472 | 5,242 | | |
| 20A 12,5Ü | 22,47 | 22,53 | 22,73 | 22,8 | 26,85 | 26,95 | 20,49 | 20,49 | 3,251 | 0,574 | 3,825 | | |
| 20A 22Ü | 21,75 | 21,75 | 21,94 | 21,94 | 27,27 | 28,89 | 20,59 | 20,6 | 2,276 | 0,7 | 2,976 | | |
| 20A 3Ü OP | 23,3 | 26,04 | | | 25,17 | 25,19 | 20,37 | 20,38 | 5,645 | 0,436 | 6,081 | | |
| 20A 5Ü OP | 23,27 | 24,51 | | | 25,63 | 25,65 | 20,39 | 20,4 | 4,963 | 0,465 | 5,428 | | |
| 20A 12,5Ü OP | 22,53 | 22,61 | | | 26,8 | 26,91 | 20,48 | 20,49 | 3,345 | 0,571 | 3,916 | | |
| 20A 22Ü OP | 21,78 | 21,8 | | | 27,21 | 28,86 | 20,61 | 20,62 | 2,328 | 0,723 | 3,051 | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Max: | 24,33 | 26,18 | 24,77 | 26,1 | 28,11 | 29,12 | 20,69 | 20,69 | 5,645 | 0,723 | 6,081 | | |
| Min: | 21,75 | 21,75 | 21,94 | 21,94 | 25,17 | 25,19 | 20,37 | 20,38 | 1,85 | 0,366 | 2,461 | | |
| Avg: | 22,98687 5 | 23,67375 | 23,2925 | 23,925 | 26,65437 5 | 27,01 | 20,50562 5 | 20,51125 | 3,7005 | 0,517125 | 4,217625 | | |

| Ø 20 | 30er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|------|---------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 24,36 | 25,44 | 24,8 | 26,11 | 25,94 | 25,95 | 20,41 | 20,42 | 4,728 | 0,366 | 5,094 |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|----------|----------|----------|----------|---------|-------|----------|---------------|---------------|----------|---------------|
| | 15A 5Ü | 23,98 | 24,39 | 24,4 | 24,89 | 26,28 | 26,29 | 20,45 | 20,45 | 4,076 | 0,397 | 4,473 |
| | 15A 15Ü | 22,45 | 22,46 | 22,72 | 22,73 | 27,5 | 27,51 | 20,59 | 20,59 | 2,396 | 0,515 | 2,911 |
| | 15A 27Ü | 21,63 | 21,64 | 21,81 | 21,82 | 28,28 | 29,16 | 20,65 | 20,65 | 1,594 | 0,571 | 2,165 |
| | 15A 3Ü OP | 24,3 | 26,18 | | | 25,82 | 25,8 | 20,4 | 20,41 | 4,957 | 0,356 | 5,313 |
| | 15A 5Ü OP | 24,05 | 24,75 | | | 26,2 | 26,22 | 20,45 | 20,45 | 4,264 | 0,395 | 4,659 |
| | 15A 15Ü OP | 22,52 | 22,53 | | | 27,47 | 27,48 | 20,58 | 20,58 | 2,464 | 0,513 | 2,977 |
| | 15A 27Ü OP | 21,66 | 21,67 | | | 28,27 | 29,15 | 20,64 | 20,65 | 1,625 | 0,569 | 2,194 |
| | 20A 3Ü | 23,44 | 25,24 | 23,78 | 25,9 | 25,15 | 25,16 | 20,38 | 20,38 | 5,448 | 0,445 | 5,893 |
| | 20A 5Ü | 23,29 | 24,11 | 23,64 | 24,59 | 25,52 | 25,52 | 20,39 | 20,39 | 4,773 | 0,456 | 5,229 |
| | 20A 15Ü | 22,24 | 22,27 | 22,49 | 22,52 | 26,85 | 26,91 | 20,48 | 20,48 | 2,938 | 0,561 | 3,499 |
| | 20A 27Ü | 21,52 | 21,52 | 21,69 | 21,69 | 27,5 | 28,97 | 20,61 | 20,61 | 1,981 | 0,717 | 2,698 |
| | 20A 3Ü OP | 23,29 | 26,05 | | | 25,02 | 25,03 | 20,36 | 20,36 | 5,645 | 0,425 | 6,07 |
| | 20A 5Ü OP | 23,28 | 24,51 | | | 25,42 | 25,42 | 20,38 | 20,38 | 4,966 | 0,447 | 5,413 |
| | 20A 15Ü OP | 22,3 | 22,34 | | | 26,81 | 26,88 | 20,47 | 20,48 | 3,016 | 0,558 | 3,574 |
| | 20A 27Ü OP | 21,55 | 21,56 | | | 27,45 | 28,95 | 20,62 | 20,63 | 2,02 | 0,739 | 2,759 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | Max: | 24,36 | 26,18 | 24,8 | 26,11 | 28,28 | 29,16 | 20,65 | 20,65 | 5,645 | 0,739 | 6,07 |
| | Min: | 21,52 | 21,52 | 21,69 | 21,69 | 25,02 | 25,03 | 20,36 | 20,36 | 1,594 | 0,356 | 2,165 |
| | Avg: | 22,86625 | 23,54125 | 23,16625 | 23,78125 | 26,5925 | 26,9 | 20,49125 | 20,49437 5 | 3,555687 5 | 0,501875 | 4,057562 5 |

10.8 Anhang H – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 20 - Heizbetrieb

| | | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|------|---------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ø 20 | 22er Decke | 15A 3Ü | 27,01 | 27,5 | 27,76 | 28,34 | 28,35 | 28,35 | 20,57 | 20,58 | 7,05 | 0,507 | 7,557 |
| | | 15A 5Ü | 26,84 | 27,04 | 27,57 | 27,82 | 28,44 | 28,44 | 20,55 | 20,56 | 6,768 | 0,505 | 7,273 |
| | | 15A 11Ü | 26,13 | 26,14 | 26,79 | 26,8 | 28,68 | 28,7 | 20,63 | 20,64 | 5,978 | 0,56 | 6,538 |
| | | 15A 19Ü | 25,31 | 25,3 | 25,87 | 25,88 | 28,68 | 29,24 | 20,66 | 20,67 | 5,168 | 0,586 | 5,754 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|----------|----------|-------|---------------|---------------|--------|---------------|----------|---------------|---------------|
| 15A 3Ü OP | 27,55 | 28,23 | | | 28,25 | 28,25 | 20,56 | 20,57 | 7,645 | 0,497 | 8,142 |
| 15A 5Ü OP | 27,37 | 27,65 | | | 28,36 | 28,36 | 20,58 | 20,59 | 7,317 | 0,515 | 7,832 |
| 15A 11Ü OP | 26,56 | 26,58 | | | 28,6 | 28,63 | 20,63 | 20,63 | 6,409 | 0,558 | 6,967 |
| 15A 19Ü OP | 25,62 | 25,64 | | | 28,62 | 29,2 | 20,66 | 20,66 | 5,489 | 0,584 | 6,073 |
| 20A 3Ü | 26,4 | 27,26 | 27,08 | 28,09 | 27,8 | 27,81 | 20,57 | 20,57 | 8,778 | 0,667 | 9,445 |
| 20A 5Ü | 26,32 | 26,74 | 27 | 27,49 | 27,95 | 27,97 | 20,55 | 20,56 | 8,463 | 0,648 | 9,111 |
| 20A 11Ü | 25,78 | 25,86 | 26,4 | 26,49 | 28,2 | 28,28 | 20,62 | 20,63 | 7,568 | 0,739 | 8,307 |
| 20A 19Ü | 25,02 | 25,02 | 25,56 | 25,57 | 28,12 | 29 | 20,62 | 20,62 | 6,527 | 0,729 | 7,256 |
| 20A 3Ü OP | 26,8 | 27,99 | | | 27,66 | 27,67 | 20,55 | 20,55 | 9,466 | 0,646 | 10,112 |
| 20A 5Ü OP | 26,75 | 27,33 | | | 27,83 | 27,85 | 20,55 | 20,55 | 9,114 | 0,644 | 9,758 |
| 20A 11Ü OP | 26,17 | 26,26 | | | 28,1 | 28,18 | 20,61 | 20,62 | 8,085 | 0,724 | 8,809 |
| 20A 19Ü OP | 25,31 | 25,32 | | | 28,03 | 28,96 | 20,61 | 20,61 | 6,913 | 0,722 | 7,635 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 27,55 | 28,23 | 27,76 | 28,34 | 28,68 | 29,24 | 20,66 | 20,67 | 9,466 | 0,739 | 10,112 |
| Min: | 25,02 | 25,02 | 25,56 | 25,57 | 27,66 | 27,67 | 20,55 | 20,55 | 5,168 | 0,497 | 5,754 |
| Avg: | 26,30875 | 26,61625 | 26,75375 | 27,06 | 28,22937 5 | 28,43062 5 | 20,595 | 20,60062 5 | 7,296125 | 0,614437 5 | 7,910562 5 |

| Ø 20 | 25er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27 | 27,48 | 27,74 | 28,33 | 28,3 | 28,3 | 20,58 | 20,58 | 7,042 | 0,509 | 7,551 |
| 15A 5Ü | 26,82 | 27,04 | 27,55 | 27,82 | 28,39 | 28,39 | 20,55 | 20,55 | 6,763 | 0,485 | 7,248 | | |
| 15A 12,5Ü | 25,97 | 25,98 | 26,62 | 26,63 | 28,69 | 28,71 | 20,65 | 20,65 | 5,825 | 0,573 | 6,398 | | |
| 15A 22Ü | 25,05 | 25,06 | 25,6 | 25,61 | 28,73 | 29,27 | 20,67 | 20,67 | 4,925 | 0,59 | 5,515 | | |
| 15A 3Ü OP | 27,55 | 28,22 | | | 28,2 | 28,2 | 20,56 | 20,57 | 7,644 | 0,499 | 8,143 | | |
| 15A 5Ü OP | 27,37 | 27,66 | | | 28,3 | 28,3 | 20,53 | 20,54 | 7,32 | 0,471 | 7,791 | | |
| 15A 12,5Ü OP | 26,39 | 26,4 | | | 28,63 | 28,64 | 20,64 | 20,64 | 6,233 | 0,567 | 6,8 | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|
| 15A 22Ü OP | 25,34 | 25,35 | | | 28,67 | 29,23 | 20,66 | 20,67 | 5,125 | 0,586 | 5,711 |
| 20A 3Ü | 26,39 | 27,24 | 27,07 | 28,07 | 27,75 | 27,76 | 20,57 | 20,58 | 8,777 | 0,678 | 9,455 |
| 20A 5Ü | 26,31 | 26,74 | 26,98 | 27,49 | 27,89 | 27,9 | 20,57 | 20,57 | 8,467 | 0,675 | 9,142 |
| 20A 12,5Ü | 25,63 | 25,68 | 26,24 | 26,3 | 28,23 | 28,28 | 20,61 | 20,62 | 7,359 | 0,726 | 8,085 |
| 20A 22Ü | 24,79 | 24,8 | 25,31 | 25,32 | 28,19 | 29,04 | 20,62 | 20,62 | 6,23 | 0,732 | 6,962 |
| 20A 3Ü OP | 26,82 | 27,97 | | | 27,61 | 27,61 | 20,56 | 20,57 | 9,467 | 0,667 | 10,134 |
| 20A 5Ü OP | 26,74 | 27,32 | | | 27,77 | 27,78 | 20,57 | 20,58 | 9,114 | 0,676 | 9,79 |
| 20A 12,5Ü OP | 25,99 | 26,06 | | | 28,14 | 28,19 | 20,61 | 20,62 | 7,839 | 0,723 | 8,562 |
| 20A 22Ü OP | 25,05 | 25,07 | | | 28,1 | 28,99 | 20,62 | 20,62 | 6,579 | 0,728 | 7,307 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 27,55 | 28,22 | 27,74 | 28,33 | 28,73 | 29,27 | 20,67 | 20,67 | 9,467 | 0,732 | 10,134 |
| Min: | 24,79 | 24,8 | 25,31 | 25,32 | 27,61 | 27,61 | 20,53 | 20,54 | 4,925 | 0,471 | 5,515 |
| Avg: | 26,20062 5 | 26,50437 5 | 26,63875 | 26,94625 | 28,22437 5 | 28,41187 5 | 20,59812 5 | 20,60312 5 | 7,169312 5 | 0,617812 5 | 7,787125 |

| Ø 20 | 30er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27,01 | 27,5 | 27,76 | 28,35 | 28,22 | 28,22 | 20,57 | 20,57 | 7,051 | 0,504 | 7,555 |
| 15A 5Ü | 26,82 | 27,03 | 27,56 | 27,81 | 28,33 | 28,34 | 20,59 | 20,59 | 6,759 | 0,523 | 7,282 | | |
| 15A 15Ü | 25,68 | 25,68 | 26,29 | 26,3 | 28,71 | 28,72 | 20,64 | 20,64 | 5,539 | 0,566 | 6,105 | | |
| 15A 27Ü | 24,67 | 24,67 | 25,17 | 25,18 | 28,83 | 29,31 | 20,66 | 20,66 | 4,552 | 0,582 | 5,134 | | |
| 15A 3Ü OP | 27,55 | 28,24 | | | 28,12 | 28,12 | 20,56 | 20,56 | 7,649 | 0,498 | 8,147 | | |
| 15A 5Ü OP | 27,36 | 27,64 | | | 28,24 | 28,24 | 20,58 | 20,59 | 7,312 | 0,516 | 7,828 | | |
| 15A 15Ü OP | 26,05 | 26,06 | | | 28,65 | 28,66 | 20,64 | 20,64 | 5,905 | 0,567 | 6,472 | | |
| 15A 27Ü OP | 24,93 | 24,93 | | | 28,74 | 29,28 | 20,67 | 20,67 | 4,804 | 0,59 | 5,394 | | |
| 20A 3Ü | 26,37 | 27,25 | 27,05 | 28,08 | 27,7 | 27,7 | 20,55 | 20,55 | 8,78 | 0,652 | 9,432 | | |
| 20A 5Ü | 26,31 | 26,75 | 26,99 | 27,5 | 27,83 | 27,83 | 20,58 | 20,58 | 8,471 | 0,683 | 9,154 | | |
| 20A 15Ü | 25,4 | 25,43 | 25,99 | 26,02 | 28,25 | 28,28 | 20,6 | 20,61 | 7,046 | 0,716 | 7,762 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|----------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|----------|----------|
| 20A 27Ü | 24,44 | 24,45 | 24,92 | 24,93 | 28,3 | 29,1 | 20,59 | 20,6 | 5,778 | 0,697 | 6,475 |
| 20A 3Ü OP | 26,84 | 27,97 | | | 27,54 | 27,55 | 20,55 | 20,56 | 9,477 | 0,656 | 10,133 |
| 20A 5Ü OP | 26,76 | 27,33 | | | 27,7 | 27,7 | 20,58 | 20,59 | 9,126 | 0,688 | 9,814 |
| 20A 15Ü OP | 25,74 | 25,77 | | | 28,17 | 28,2 | 20,6 | 20,6 | 7,49 | 0,705 | 8,195 |
| 20A 27Ü OP | 24,67 | 24,68 | | | 28,22 | 29,06 | 20,59 | 20,6 | 6,077 | 0,695 | 6,772 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 27,55 | 28,24 | 27,76 | 28,35 | 28,83 | 29,31 | 20,67 | 20,67 | 9,477 | 0,716 | 10,133 |
| Min: | 24,44 | 24,45 | 24,92 | 24,93 | 27,54 | 27,55 | 20,55 | 20,55 | 4,552 | 0,498 | 5,134 |
| Avg: | 26,0375 | 26,33625 | 26,46625 | 26,77125 | 28,22187 5 | 28,39437 5 | 20,59687 5 | 20,60062 5 | 6,9885 | 0,614875 | 7,603375 |

10.9 Anhang I – Stationäre Auswertung UHPC Ø 20 - Heizbetrieb

| Ø 20 | 22er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27,75 | 27,93 | 28,58 | 28,81 | 28,83 | 28,83 | 20,64 | 20,64 | 7,637 | 0,565 | 8,202 |
| 15A 5Ü | 27,67 | 27,76 | 28,5 | 28,6 | 28,85 | 28,85 | 20,61 | 20,61 | 7,525 | 0,539 | 8,064 | | |
| 15A 11Ü | 27,34 | 27,35 | 28,13 | 28,15 | 28,94 | 28,95 | 20,65 | 20,65 | 7,163 | 0,57 | 7,733 | | |
| 15A 19Ü | 26,88 | 26,88 | 27,62 | 27,63 | 28,93 | 29,18 | 20,65 | 20,65 | 6,712 | 0,577 | 7,289 | | |
| 15A 3Ü OP | 28,45 | 28,72 | | | 28,72 | 28,72 | 20,6 | 20,61 | 8,353 | 0,534 | 8,887 | | |
| 15A 5Ü OP | 28,37 | 28,48 | | | 28,77 | 28,77 | 20,63 | 20,63 | 8,211 | 0,554 | 8,765 | | |
| 15A 11Ü OP | 27,93 | 27,94 | | | 28,88 | 28,89 | 20,65 | 20,65 | 7,74 | 0,571 | 8,311 | | |
| 15A 19Ü OP | 27,44 | 27,45 | | | 28,85 | 29,12 | 20,65 | 20,65 | 7,26 | 0,576 | 7,836 | | |
| 20A 3Ü | 27,33 | 27,71 | 28,12 | 28,56 | 28,44 | 28,44 | 20,6 | 20,6 | 9,742 | 0,704 | 10,446 | | |
| 20A 5Ü | 27,31 | 27,49 | 28,1 | 28,31 | 28,5 | 28,51 | 20,61 | 20,61 | 9,61 | 0,713 | 10,323 | | |
| 20A 11Ü | 27,04 | 27,08 | 27,8 | 27,85 | 28,59 | 28,62 | 20,64 | 20,64 | 9,184 | 0,756 | 9,94 | | |
| 20A 19Ü | 26,62 | 26,62 | 27,33 | 27,34 | 28,52 | 28,94 | 20,63 | 20,64 | 8,604 | 0,747 | 9,351 | | |
| 20A 3Ü OP | 27,96 | 28,45 | | | 28,32 | 28,32 | 20,59 | 20,59 | 10,611 | 0,694 | 11,305 | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|----------|---------|----------|---------|--------|---------------|---------|---------|---------------|---------------|
| 20A 5Ü OP | 27,93 | 28,18 | | | 28,39 | 28,4 | 20,6 | 20,6 | 10,456 | 0,707 | 11,163 |
| 20A 11Ü OP | 27,63 | 27,68 | | | 28,49 | 28,52 | 20,63 | 20,64 | 9,957 | 0,749 | 10,706 |
| 20A 19Ü OP | 27,13 | 27,14 | | | 28,42 | 28,86 | 20,63 | 20,63 | 9,279 | 0,739 | 10,018 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 28,45 | 28,72 | 28,58 | 28,81 | 28,94 | 29,18 | 20,65 | 20,65 | 10,611 | 0,756 | 11,305 |
| Min: | 26,62 | 26,62 | 27,33 | 27,34 | 28,32 | 28,32 | 20,59 | 20,59 | 6,712 | 0,534 | 7,289 |
| Avg: | 27,54875 | 27,67875 | 28,0225 | 28,15625 | 28,6525 | 28,745 | 20,62562 5 | 20,6275 | 8,62775 | 0,643437 5 | 9,271187 5 |

| Ø 20 | 25er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27,74 | 27,94 | 28,58 | 28,82 | 28,8 | 28,81 | 20,61 | 20,61 | 7,641 | 0,539 | 8,18 |
| 15A 5Ü | 27,67 | 27,75 | 28,5 | 28,6 | 28,85 | 28,85 | 20,65 | 20,65 | 7,52 | 0,57 | 8,09 | | |
| 15A 12,5Ü | 27,26 | 27,27 | 28,05 | 28,05 | 28,95 | 28,96 | 20,65 | 20,65 | 7,081 | 0,578 | 7,659 | | |
| 15A 22Ü | 26,74 | 26,74 | 27,47 | 27,47 | 28,96 | 29,2 | 20,66 | 20,66 | 6,57 | 0,581 | 7,151 | | |
| 15A 3Ü OP | 28,45 | 28,72 | | | 28,72 | 28,72 | 20,63 | 20,63 | 8,357 | 0,552 | 8,909 | | |
| 15A 5Ü OP | 28,37 | 28,48 | | | 28,76 | 28,76 | 20,63 | 20,63 | 8,216 | 0,555 | 8,771 | | |
| 15A 12,5Ü OP | 27,88 | 27,9 | | | 28,88 | 28,88 | 20,65 | 20,65 | 7,693 | 0,572 | 8,265 | | |
| 15A 22Ü OP | 27,27 | 27,28 | | | 28,89 | 29,14 | 20,65 | 20,65 | 7,091 | 0,576 | 7,667 | | |
| 20A 3Ü | 27,35 | 27,71 | 28,14 | 28,56 | 28,43 | 28,43 | 20,61 | 20,61 | 9,751 | 0,718 | 10,469 | | |
| 20A 5Ü | 27,31 | 27,5 | 28,1 | 28,32 | 28,48 | 28,48 | 20,62 | 20,62 | 9,619 | 0,725 | 10,344 | | |
| 20A 12,5Ü | 26,96 | 26,98 | 27,71 | 27,74 | 28,61 | 28,63 | 20,63 | 20,63 | 9,066 | 0,741 | 9,807 | | |
| 20A 22Ü | 26,48 | 26,48 | 27,18 | 27,19 | 28,55 | 28,96 | 20,64 | 20,64 | 8,423 | 0,75 | 9,173 | | |
| 20A 3Ü OP | 27,98 | 28,44 | | | 28,3 | 28,31 | 20,6 | 20,6 | 10,62 | 0,708 | 11,328 | | |
| 20A 5Ü OP | 27,91 | 28,18 | | | 28,37 | 28,37 | 20,61 | 20,61 | 10,458 | 0,715 | 11,173 | | |
| 20A 12,5Ü OP | 27,54 | 27,57 | | | 28,49 | 28,53 | 20,61 | 20,61 | 9,827 | 0,715 | 10,542 | | |
| 20A 22Ü OP | 26,97 | 26,98 | | | 28,45 | 28,89 | 20,63 | 20,63 | 9,067 | 0,745 | 9,812 | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------|-------|----------|----------|---------------|--------|-------|-------|--------|---------|---------|
| Max: | 28,45 | 28,72 | 28,58 | 28,82 | 28,96 | 29,2 | 20,66 | 20,66 | 10,62 | 0,75 | 11,328 |
| Min: | 26,48 | 26,48 | 27,18 | 27,19 | 28,3 | 28,31 | 20,6 | 20,6 | 6,57 | 0,539 | 7,151 |
| Avg: | 27,4925 | 27,62 | 27,96625 | 28,09375 | 28,65562 5 | 28,745 | 20,63 | 20,63 | 8,5625 | 0,64625 | 9,20875 |

| Ø 20 | 30er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 27,74 | 27,94 | 28,58 | 28,81 | 28,78 | 28,78 | 20,63 | 20,63 | 7,64 | 0,559 | 8,199 |
| 15A 5Ü | 27,67 | 27,75 | 28,5 | 28,6 | 28,82 | 28,82 | 20,64 | 20,64 | 7,519 | 0,565 | 8,084 | | |
| 15A 15Ü | 27,11 | 27,11 | 27,88 | 27,88 | 28,95 | 28,97 | 20,68 | 20,68 | 6,932 | 0,598 | 7,53 | | |
| 15A 27Ü | 26,49 | 26,49 | 27,19 | 27,2 | 28,99 | 29,22 | 20,66 | 20,66 | 6,329 | 0,582 | 6,911 | | |
| 15A 3Ü OP | 28,46 | 28,72 | | | 28,69 | 28,69 | 20,63 | 20,63 | 8,355 | 0,555 | 8,91 | | |
| 15A 5Ü OP | 28,37 | 28,48 | | | 28,74 | 28,75 | 20,63 | 20,64 | 8,213 | 0,56 | 8,773 | | |
| 15A 15Ü OP | 27,71 | 27,71 | | | 28,88 | 28,89 | 20,67 | 20,67 | 7,518 | 0,593 | 8,111 | | |
| 15A 27Ü OP | 26,99 | 26,99 | | | 28,93 | 29,17 | 20,65 | 20,66 | 6,814 | 0,578 | 7,392 | | |
| 20A 3Ü | 27,34 | 27,7 | 28,14 | 28,55 | 28,39 | 28,39 | 20,61 | 20,62 | 9,744 | 0,722 | 10,466 | | |
| 20A 5Ü | 27,31 | 27,49 | 28,1 | 28,31 | 28,45 | 28,45 | 20,62 | 20,62 | 9,616 | 0,734 | 10,35 | | |
| 20A 15Ü | 26,84 | 26,84 | 27,58 | 27,59 | 28,61 | 28,62 | 20,61 | 20,61 | 8,897 | 0,72 | 9,617 | | |
| 20A 27Ü | 26,25 | 26,25 | 26,93 | 26,93 | 28,59 | 28,99 | 20,63 | 20,63 | 8,133 | 0,747 | 8,88 | | |
| 20A 3Ü OP | 27,97 | 28,44 | | | 28,27 | 28,27 | 20,61 | 20,61 | 10,613 | 0,715 | 11,328 | | |
| 20A 5Ü OP | 27,93 | 28,18 | | | 28,34 | 28,34 | 20,61 | 20,61 | 10,464 | 0,722 | 11,186 | | |
| 20A 15Ü OP | 27,39 | 27,4 | | | 28,51 | 28,52 | 20,6 | 20,6 | 9,618 | 0,711 | 10,329 | | |
| 20A 27Ü OP | 26,71 | 26,71 | | | 28,49 | 28,92 | 20,63 | 20,63 | 8,732 | 0,74 | 9,472 | | |
| Max: | 28,46 | 28,72 | 28,58 | 28,81 | 28,99 | 29,22 | 20,68 | 20,68 | 10,613 | 0,747 | 11,328 | | |
| Min: | 26,25 | 26,25 | 26,93 | 26,93 | 28,27 | 28,27 | 20,6 | 20,6 | 6,329 | 0,555 | 6,911 | | |
| Avg: | 27,3925 | 27,5125 | 27,8625 | 27,98375 | 28,65187 5 | 28,73687 5 | 20,63187 5 | 20,63375 | 8,446062 5 | 0,650062 5 | 9,096125 | | |

10.10 Anhang J – Stationäre Auswertung Leichtbeton Ø 20 - Kühlbetrieb

| Ø 20 | 22er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 21,72 | 22,88 | 20,85 | 22,36 | 20,05 | 20,06 | 25,56 | 25,56 | 5,89 | 0,389 | 6,279 |
| 15A 5Ü | 22,74 | 23,17 | 22,13 | 22,67 | 19,6 | 19,61 | 25,57 | 25,58 | 4,925 | 0,37 | 5,295 | | |
| 15A 11Ü | 23,94 | 23,99 | 23,57 | 23,63 | 18,59 | 18,64 | 25,49 | 25,49 | 3,289 | 0,449 | 3,738 | | |
| 15A 19Ü | 24,61 | 24,62 | 24,37 | 24,37 | 16,98 | 18,07 | 25,41 | 25,42 | 2,24 | 0,516 | 2,756 | | |
| 15A 3Ü OP | 20,95 | 22,94 | | | 20,26 | 20,27 | 25,62 | 25,63 | 6,283 | 0,332 | 6,615 | | |
| 15A 5Ü OP | 22,39 | 23,12 | | | 19,7 | 19,71 | 25,58 | 25,58 | 5,205 | 0,369 | 5,574 | | |
| 15A 11Ü OP | 23,87 | 23,92 | | | 18,7 | 18,65 | 25,49 | 25,5 | 3,413 | 0,441 | 3,854 | | |
| 15A 19Ü OP | 24,57 | 24,58 | | | 16,99 | 18,1 | 25,44 | 25,44 | 2,306 | 0,495 | 2,801 | | |
| 20A 3Ü | 21,9 | 23,67 | 21,06 | 23,27 | 20,99 | 21,02 | 25,63 | 25,64 | 6,611 | 0,431 | 7,042 | | |
| 20A 5Ü | 22,95 | 23,75 | 22,37 | 23,36 | 20,45 | 20,5 | 25,6 | 25,6 | 5,636 | 0,471 | 6,107 | | |
| 20A 11Ü | 24,14 | 24,24 | 23,81 | 23,92 | 19,21 | 19,41 | 25,49 | 25,5 | 3,913 | 0,598 | 4,511 | | |
| 20A 19Ü | 24,73 | 24,74 | 24,51 | 24,51 | 17,2 | 19,09 | 25,45 | 25,45 | 2,726 | 0,644 | 3,37 | | |
| 20A 3Ü OP | 21,06 | 23,78 | | | 21,21 | 21,25 | 25,65 | 25,65 | 6,956 | 0,415 | 7,371 | | |
| 20A 5Ü OP | 22,6 | 23,78 | | | 20,59 | 20,65 | 25,6 | 25,61 | 5,912 | 0,469 | 6,381 | | |
| 20A 11Ü OP | 24,06 | 24,2 | | | 19,25 | 19,44 | 25,48 | 25,49 | 4,048 | 0,609 | 4,657 | | |
| 20A 19Ü OP | 24,7 | 24,71 | | | 17,22 | 19,15 | 25,46 | 25,46 | 2,796 | 0,635 | 3,431 | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Max: | 24,73 | 24,74 | 24,51 | 24,51 | 21,21 | 21,25 | 25,65 | 25,65 | 6,956 | 0,644 | 7,371 | | |
| Min: | 20,95 | 22,88 | 20,85 | 22,36 | 16,98 | 18,07 | 25,41 | 25,42 | 2,24 | 0,332 | 2,756 | | |
| Avg: | 23,18312 5 | 23,88062 5 | 22,83375 | 23,51125 | 19,18687 5 | 19,60125 | 25,5325 | 25,5375 | 4,509312 5 | 0,477062 5 | 4,986375 | | |

| Ø 20 | 25er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|--------|---------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 21,71 | 22,91 | 20,85 | 22,39 | 20,21 | 20,23 | 25,57 | 25,57 | 5,901 | 0,378 | 6,279 |
| 15A 5Ü | 22,75 | 23,17 | 22,14 | 22,68 | 19,77 | 19,77 | 25,57 | 25,58 | 4,912 | 0,373 | 5,285 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------|----------|----------|----------|---------------|---------------|---------|----------|---------------|----------|---------------|
| 15A 12,5Ü | 24,14 | 24,16 | 23,81 | 23,83 | 18,51 | 18,55 | 25,47 | 25,47 | 2,996 | 0,47 | 3,466 |
| 15A 22Ü | 24,75 | 24,76 | 24,52 | 24,53 | 16,92 | 17,94 | 25,49 | 25,5 | 2,019 | 0,445 | 2,464 |
| 15A 3Ü OP | 20,95 | 22,97 | | | 20,42 | 20,43 | 25,63 | 25,63 | 6,281 | 0,326 | 6,607 |
| 15A 5Ü OP | 22,41 | 23,12 | | | 19,87 | 19,88 | 25,58 | 25,58 | 5,199 | 0,37 | 5,569 |
| 15A 12,5Ü OP | 24,06 | 24,09 | | | 18,59 | 18,63 | 25,47 | 25,47 | 3,121 | 0,467 | 3,588 |
| 15A 22Ü OP | 24,72 | 24,73 | | | 16,93 | 17,96 | 25,48 | 25,49 | 2,064 | 0,455 | 2,519 |
| 20A 3Ü | 21,89 | 23,66 | 21,04 | 23,27 | 21,11 | 21,14 | 25,64 | 25,65 | 6,625 | 0,417 | 7,042 |
| 20A 5Ü | 22,95 | 23,76 | 22,37 | 23,37 | 20,6 | 20,63 | 25,61 | 25,61 | 5,635 | 0,459 | 6,094 |
| 20A 12,5Ü | 24,3 | 24,36 | 23,99 | 24,06 | 19,19 | 19,31 | 25,51 | 25,51 | 3,617 | 0,576 | 4,193 |
| 20A 22Ü | 24,86 | 24,87 | 24,65 | 24,66 | 17,12 | 18,89 | 25,44 | 25,44 | 2,456 | 0,656 | 3,112 |
| 20A 3Ü OP | 21,06 | 23,79 | | | 21,34 | 21,37 | 25,66 | 25,66 | 6,942 | 0,401 | 7,343 |
| 20A 5Ü OP | 22,59 | 23,78 | | | 20,75 | 20,78 | 25,61 | 25,62 | 5,903 | 0,456 | 6,359 |
| 20A 12,5Ü OP | 24,23 | 24,33 | | | 19,23 | 19,33 | 25,51 | 25,51 | 3,726 | 0,576 | 4,302 |
| 20A 22Ü OP | 24,83 | 24,84 | | | 17,13 | 18,93 | 25,44 | 25,45 | 2,514 | 0,653 | 3,167 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 24,86 | 24,87 | 24,65 | 24,66 | 21,34 | 21,37 | 25,66 | 25,66 | 6,942 | 0,656 | 7,343 |
| Min: | 20,95 | 22,91 | 20,85 | 22,39 | 16,92 | 17,94 | 25,44 | 25,44 | 2,019 | 0,326 | 2,464 |
| Avg: | 23,2625 | 23,95625 | 22,92125 | 23,59875 | 19,23062 5 | 19,61062 5 | 25,5425 | 25,54625 | 4,369437 5 | 0,467375 | 4,836812 5 |

| Ø 20 | 30er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|----------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 21,71 | 22,88 | 20,85 | 22,36 | 20,45 | 20,47 | 25,58 | 25,59 | 5,897 | 0,37 | 6,267 |
| 15A 5Ü | 22,74 | 23,17 | 22,13 | 22,67 | 20 | 20,01 | 25,57 | 25,57 | 4,918 | 0,38 | 5,298 | | |
| 15A 15Ü | 24,35 | 24,36 | 24,05 | 24,06 | 18,63 | 18,63 | 25,5 | 25,51 | 2,669 | 0,438 | 3,107 | | |
| 15A 27Ü | 24,94 | 24,95 | 24,75 | 24,76 | 16,85 | 17,78 | 25,39 | 25,39 | 1,71 | 0,538 | 2,248 | | |
| 15A 3Ü OP | 20,93 | 22,94 | | | 20,63 | 20,65 | 25,59 | 25,6 | 6,287 | 0,36 | 6,647 | | |
| 15A 5Ü | 22,41 | 23,11 | | | 20,11 | 20,12 | 25,58 | 25,58 | 5,204 | 0,374 | 5,578 | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| OP | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|----------|----------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|--|
| 15A 15Ü OP | 24,3 | 24,31 | | | 18,66 | 18,66 | 25,5 | 25,51 | 2,749 | 0,437 | 3,186 | |
| 15A 27Ü OP | 24,92 | 24,93 | | | 16,86 | 17,8 | 25,39 | 25,39 | 1,744 | 0,538 | 2,282 | |
| 20A 3Ü | 21,9 | 23,66 | 21,05 | 23,26 | 21,34 | 21,34 | 25,67 | 25,67 | 6,622 | 0,39 | 7,012 | |
| 20A 5Ü | 22,95 | 23,75 | 22,37 | 23,36 | 20,8 | 20,82 | 25,6 | 25,61 | 5,642 | 0,4713 | 6,1133 | |
| 20A 15Ü | 24,48 | 24,51 | 24,21 | 24,24 | 19,23 | 19,28 | 25,49 | 25,5 | 3,25 | 0,595 | 3,845 | |
| 20A 27Ü | 25,02 | 25,02 | 24,84 | 24,85 | 17,03 | 18,64 | 25,46 | 25,46 | 2,117 | 0,635 | 2,752 | |
| 20A 3Ü OP | 21,07 | 23,78 | | | 21,55 | 21,55 | 25,68 | 25,68 | 6,966 | 0,374 | 7,34 | |
| 20A 5Ü OP | 22,59 | 23,77 | | | 22,59 | 23,77 | 20,94 | 20,95 | 5,93 | 0,461 | 6,391 | |
| 20A 15Ü OP | 24,44 | 24,47 | | | 19,28 | 19,32 | 25,5 | 25,5 | 3,343 | 0,59 | 3,933 | |
| 20A 27Ü OP | 25 | 25,01 | | | 17,04 | 18,67 | 25,46 | 25,46 | 2,155 | 0,633 | 2,788 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Max: | 25,02 | 25,02 | 24,84 | 24,85 | 22,59 | 23,77 | 25,68 | 25,68 | 6,966 | 0,635 | 7,34 | |
| Min: | 20,93 | 22,88 | 20,85 | 22,36 | 16,85 | 17,78 | 20,94 | 20,95 | 1,71 | 0,36 | 2,248 | |
| Avg: | 23,35937 5 | 24,03875 | 23,03125 | 23,695 | 19,44062 5 | 19,84437 5 | 25,24812 5 | 25,24812 5 | 4,200187 5 | 0,474018 75 | 4,674206 25 | |

10.11 Anhang K – Stationäre Auswertung Normalbeton Ø 20 - Kühlbetrieb

| Ø 20 | 22er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|---------------|---------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 19,56 | 20,14 | 18,34 | 19,1 | 18,11 | 18,12 | 25,4 | 25,41 | 9,922 | 0,527 | 10,449 |
| 15A 5Ü | 20,1 | 20,34 | 19,03 | 19,33 | 17,94 | 17,94 | 25,37 | 25,37 | 9,352 | 0,555 | 9,907 | | |
| 15A 11Ü | 21,08 | 21,11 | 20,2 | 20,23 | 17,61 | 17,63 | 25,39 | 25,4 | 7,946 | 0,534 | 8,48 | | |
| 15A 19Ü | 21,94 | 21,95 | 21,21 | 21,22 | 16,96 | 17,6 | 25,38 | 25,38 | 6,567 | 0,545 | 7,112 | | |
| 15A 3Ü OP | 18,59 | 19,5 | | | 18,32 | 18,33 | 25,42 | 25,42 | 11,161 | 0,515 | 11,676 | | |
| 15A 5Ü OP | 19,36 | 19,72 | | | 18,13 | 18,13 | 25,41 | 25,42 | 10,456 | 0,516 | 10,972 | | |
| 15A 11Ü OP | 20,61 | 20,63 | | | 17,73 | 17,76 | 25,4 | 25,4 | 8,719 | 0,527 | 9,246 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|--------|----------|----------|-------|---------|---------------|----------|----------|---------------|----------------|
| 15A 19Ü OP | 21,62 | 21,63 | | | 17,02 | 17,7 | 25,39 | 25,39 | 7,083 | 0,539 | 7,622 |
| 20A 3Ü | 19,8 | 20,85 | 18,63 | 19,95 | 18,8 | 18,81 | 25,48 | 25,48 | 12,08 | 0,609 | 12,689 |
| 20A 5Ü | 20,39 | 20,92 | 19,36 | 20,01 | 18,6 | 18,62 | 25,45 | 25,45 | 11,503 | 0,648 | 12,151 |
| 20A 11Ü | 21,4 | 21,48 | 20,57 | 20,66 | 18,14 | 18,24 | 25,45 | 25,45 | 9,856 | 0,648 | 10,504 |
| 20A 19Ü | 22,2 | 22,21 | 21,51 | 21,53 | 17,18 | 18,29 | 25,42 | 25,43 | 8,206 | 0,678 | 8,884 |
| 20A 3Ü OP | 18,87 | 20,4 | | | 19,07 | 19,09 | 25,5 | 25,51 | 13,433 | 0,582 | 14,015 |
| 20A 5Ü OP | 19,69 | 20,44 | | | 18,83 | 18,85 | 25,47 | 25,47 | 12,739 | 0,62 | 13,359 |
| 20A 11Ü OP | 20,97 | 21,07 | | | 18,3 | 18,41 | 25,45 | 25,45 | 10,762 | 0,647 | 11,409 |
| 20A 19Ü OP | 21,92 | 21,93 | | | 17,26 | 18,44 | 25,43 | 25,43 | 8,805 | 0,671 | 9,476 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 22,2 | 22,21 | 21,51 | 21,53 | 19,07 | 19,09 | 25,5 | 25,51 | 13,433 | 0,678 | 14,015 |
| Min: | 18,59 | 19,5 | 18,34 | 19,1 | 16,96 | 17,6 | 25,37 | 25,37 | 6,567 | 0,515 | 7,112 |
| Avg: | 20,50625 | 20,895 | 19,85625 | 20,25375 | 18 | 18,2475 | 25,42562 5 | 25,42875 | 9,911875 | 0,585062 5 | 10,49693 75 |

| Ø 20 | 25er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 19,53 | 20,12 | 18,32 | 19,09 | 18,14 | 18,14 | 25,41 | 25,41 | 9,92 | 0,522 | 10,442 |
| 15A 5Ü | 20,09 | 20,33 | 19,01 | 19,32 | 17,98 | 17,98 | 25,38 | 25,38 | 9,35 | 0,545 | 9,895 | | |
| 15A 12,5Ü | 21,27 | 21,28 | 20,42 | 20,44 | 17,59 | 17,6 | 25,4 | 25,4 | 7,627 | 0,529 | 8,156 | | |
| 15A 22Ü | 22,18 | 22,18 | 21,49 | 21,5 | 16,9 | 17,51 | 25,38 | 25,38 | 6,166 | 0,548 | 6,714 | | |
| 15A 3Ü OP | 18,56 | 19,48 | | | 18,35 | 18,35 | 25,42 | 25,43 | 11,153 | 0,511 | 11,664 | | |
| 15A 5Ü OP | 19,34 | 19,71 | | | 18,16 | 18,16 | 25,39 | 25,39 | 10,445 | 0,538 | 10,983 | | |
| 15A 12,5Ü OP | 20,82 | 20,84 | | | 17,7 | 17,72 | 25,4 | 25,41 | 8,345 | 0,525 | 8,87 | | |
| 15A 22Ü OP | 21,89 | 21,9 | | | 16,96 | 17,6 | 25,38 | 25,38 | 6,63 | 0,544 | 7,174 | | |
| 20A 3Ü | 19,79 | 20,85 | 18,61 | 19,94 | 18,83 | 18,84 | 25,49 | 25,5 | 12,072 | 0,595 | 12,667 | | |
| 20A 5Ü | 20,39 | 20,92 | 19,36 | 20,02 | 18,63 | 18,64 | 25,46 | 25,47 | 11,495 | 0,629 | 12,124 | | |
| 20A 12,5Ü | 21,57 | 21,62 | 20,77 | 20,83 | 18,12 | 18,19 | 25,44 | 25,45 | 9,531 | 0,652 | 10,183 | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------|---------------|----------|--------|--------|----------|---------|----------|---------|---------------|----------------|
| 20A 22Ü | 22,41 | 22,43 | 21,77 | 21,78 | 17,12 | 18,17 | 25,42 | 25,42 | 7,739 | 0,681 | 8,42 |
| 20A 3Ü OP | 18,85 | 20,38 | | | 19,1 | 19,11 | 25,51 | 25,52 | 13,437 | 0,569 | 14,006 |
| 20A 5Ü OP | 19,69 | 20,45 | | | 18,86 | 18,87 | 25,48 | 25,48 | 12,732 | 0,609 | 13,341 |
| 20A 12,5Ü OP | 21,17 | 21,23 | | | 18,27 | 18,35 | 25,46 | 25,46 | 10,371 | 0,635 | 11,006 |
| 20A 22Ü OP | 22,16 | 22,17 | | | 17,21 | 18,31 | 25,42 | 25,42 | 8,279 | 0,685 | 8,964 |
| | | | | | | | | | | | |
| Max: | 22,41 | 22,43 | 21,77 | 21,78 | 19,1 | 19,11 | 25,51 | 25,52 | 13,437 | 0,685 | 14,006 |
| Min: | 18,56 | 19,48 | 18,32 | 19,09 | 16,9 | 17,51 | 25,38 | 25,38 | 6,166 | 0,511 | 6,714 |
| Avg: | 20,60687 5 | 20,99312 5 | 19,96875 | 20,365 | 17,995 | 18,22125 | 25,4275 | 25,43125 | 9,70575 | 0,582312 5 | 10,28806 25 |

| Ø 20 | 30er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|---------------|---------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 19,53 | 20,14 | 18,32 | 19,1 | 18,22 | 18,22 | 25,44 | 25,44 | 9,941 | 0,491 | 10,432 |
| 15A 5Ü | 20,09 | 20,34 | 19,01 | 19,33 | 18,07 | 18,08 | 25,42 | 25,42 | 9,369 | 0,515 | 9,884 | | |
| 15A 15Ü | 21,53 | 21,53 | 20,73 | 20,73 | 17,58 | 17,58 | 25,41 | 25,41 | 7,237 | 0,522 | 7,759 | | |
| 15A 27Ü | 22,53 | 22,53 | 21,9 | 21,91 | 16,83 | 17,4 | 25,37 | 25,38 | 5,624 | 0,553 | 6,177 | | |
| 15A 3Ü OP | 18,59 | 19,49 | | | 18,44 | 18,44 | 25,43 | 25,43 | 11,168 | 0,501 | 11,669 | | |
| 15A 5Ü OP | 19,35 | 19,74 | | | 18,25 | 18,25 | 25,41 | 25,41 | 10,459 | 0,522 | 10,981 | | |
| 15A 15Ü OP | 21,14 | 21,14 | | | 17,68 | 17,69 | 25,41 | 25,42 | 7,875 | 0,516 | 8,391 | | |
| 15A 27Ü OP | 22,29 | 22,3 | | | 16,88 | 17,48 | 25,38 | 25,38 | 6,004 | 0,55 | 6,554 | | |
| 20A 3Ü | 19,79 | 20,85 | 18,62 | 19,93 | 18,92 | 18,92 | 25,48 | 25,48 | 12,09 | 0,61 | 12,7 | | |
| 20A 5Ü | 20,4 | 20,92 | 19,37 | 20,01 | 18,7 | 18,7 | 25,49 | 25,5 | 11,496 | 0,593 | 12,089 | | |
| 20A 15Ü | 21,82 | 21,85 | 21,07 | 21,11 | 18,07 | 18,1 | 25,44 | 25,44 | 9,001 | 0,657 | 9,658 | | |
| 20A 27Ü | 22,71 | 22,72 | 22,12 | 22,13 | 17,05 | 18,02 | 25,39 | 25,39 | 7,095 | 0,719 | 7,814 | | |
| 20A 3Ü OP | 18,85 | 20,39 | | | 19,16 | 19,17 | 25,53 | 25,53 | 13,435 | 0,55 | 13,985 | | |
| 20A 5Ü OP | 19,7 | 20,43 | | | 18,93 | 18,93 | 25,51 | 25,51 | 12,733 | 0,575 | 13,308 | | |
| 20A 15Ü OP | 21,46 | 21,51 | | | 18,2 | 18,24 | 25,44 | 25,45 | 9,757 | 0,652 | 10,409 | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------|---------------|---------|----------|--------|---------------|---------------|---------|---------|---------------|----------------|--|
| 20A 27Ü | | | | | | | | | | | | |
| OP | 22,51 | 22,51 | | | 17,1 | 18,13 | 25,4 | 25,41 | 7,544 | 0,701 | 8,245 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Max: | 22,71 | 22,72 | 22,12 | 22,13 | 19,16 | 19,17 | 25,53 | 25,53 | 13,435 | 0,719 | 13,985 | |
| Min: | 18,59 | 19,49 | 18,32 | 19,1 | 16,83 | 17,4 | 25,37 | 25,38 | 5,624 | 0,491 | 6,177 | |
| Avg: | 20,76812 5 | 21,14937 5 | 20,1425 | 20,53125 | 18,005 | 18,20937 5 | 25,43437 5 | 25,4375 | 9,42675 | 0,576687 5 | 10,00343 75 | |

10.12 Anhang L - Stationäre Auswertung UHPC Ø 20 - Kühlbetrieb

| Ø 20 | 22er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 18,98 | 19,24 | 17,7 | 18,03 | 17,62 | 17,62 | 25,4 | 25,4 | 11,139 | 0,531 | 11,67 |
| 15A 5Ü | 19,23 | 19,33 | 18 | 18,14 | 17,54 | 17,54 | 25,37 | 25,38 | 10,879 | 0,553 | 11,432 | | |
| 15A 11Ü | 19,74 | 19,75 | 18,61 | 18,62 | 17,41 | 17,43 | 25,38 | 25,38 | 10,14 | 0,549 | 10,689 | | |
| 15A 19Ü | 20,27 | 20,28 | 19,23 | 19,24 | 17,1 | 17,43 | 25,37 | 25,38 | 9,28 | 0,551 | 9,831 | | |
| 15A 3Ü OP | 17,93 | 18,31 | | | 17,81 | 17,81 | 25,38 | 25,38 | 12,726 | 0,547 | 13,273 | | |
| 15A 5Ü OP | 18,27 | 18,42 | | | 17,74 | 17,74 | 25,4 | 25,4 | 12,395 | 0,531 | 12,926 | | |
| 15A 11Ü OP | 18,93 | 18,95 | | | 17,58 | 17,59 | 25,39 | 25,39 | 11,445 | 0,539 | 11,984 | | |
| 15A 19Ü OP | 19,6 | 19,61 | | | 17,22 | 17,58 | 25,39 | 25,39 | 10,359 | 0,54 | 10,899 | | |
| 20A 3Ü | 19,26 | 19,74 | 18,02 | 18,62 | 18,12 | 18,13 | 25,42 | 25,42 | 13,959 | 0,681 | 14,64 | | |
| 20A 5Ü | 19,53 | 19,78 | 18,36 | 18,66 | 18,04 | 18,05 | 25,43 | 25,43 | 13,694 | 0,67 | 14,364 | | |
| 20A 11Ü | 20,05 | 20,11 | 18,98 | 19,03 | 17,86 | 17,91 | 25,42 | 25,43 | 12,811 | 0,675 | 13,486 | | |
| 20A 19Ü | 20,56 | 20,58 | 19,59 | 19,59 | 17,39 | 17,96 | 25,41 | 25,41 | 11,728 | 0,69 | 12,418 | | |
| 20A 3Ü OP | 18,27 | 18,95 | | | 18,37 | 18,38 | 25,44 | 25,44 | 15,817 | 0,659 | 16,476 | | |
| 20A 5Ü OP | 18,65 | 19 | | | 18,28 | 18,29 | 25,45 | 25,45 | 15,477 | 0,649 | 16,126 | | |
| 20A 11Ü OP | 19,33 | 19,4 | | | 18,06 | 18,12 | 25,44 | 25,44 | 14,347 | 0,66 | 15,007 | | |
| 20A 19Ü OP | 19,97 | 19,98 | | | 17,53 | 18,16 | 25,42 | 25,42 | 13,013 | 0,678 | 13,691 | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

Anhang – Stationäre Auswertung

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------|---------------|----------|----------|---------------|----------|---------------|----------|----------------|---------------|--------|
| Max: | 20,56 | 20,58 | 19,59 | 19,59 | 18,37 | 18,38 | 25,45 | 25,45 | 15,817 | 0,69 | 16,476 |
| Min: | 17,93 | 18,31 | 17,7 | 18,03 | 17,1 | 17,43 | 25,37 | 25,38 | 9,28 | 0,531 | 9,831 |
| Avg: | 19,28562 5 | 19,46437 5 | 18,56125 | 18,74125 | 17,72937 5 | 17,85875 | 25,40687 5 | 25,40875 | 12,45056 25 | 0,606437 5 | 13,057 |

| Ø 20 | 25er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|-----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 18,98 | 19,23 | 17,69 | 18,02 | 17,61 | 17,62 | 25,37 | 25,37 | 11,154 | 0,556 | 11,71 |
| 15A 5Ü | 19,21 | 19,33 | 17,99 | 18,13 | 17,57 | 17,57 | 25,4 | 25,4 | 10,902 | 0,53 | 11,432 | | |
| 15A 12,5Ü | 19,84 | 19,84 | 18,73 | 18,73 | 17,4 | 17,4 | 25,38 | 25,38 | 9,981 | 0,546 | 10,527 | | |
| 15A 22Ü | 20,44 | 20,45 | 19,44 | 19,44 | 17,07 | 17,38 | 25,37 | 25,38 | 9,002 | 0,553 | 9,555 | | |
| 15A 3Ü OP | 17,93 | 18,31 | | | 17,83 | 17,84 | 25,42 | 25,43 | 12,725 | 0,507 | 13,232 | | |
| 15A 5Ü OP | 18,26 | 18,43 | | | 17,76 | 17,76 | 25,43 | 25,43 | 12,4 | 0,501 | 12,901 | | |
| 15A 12,5Ü OP | 19,06 | 19,07 | | | 17,55 | 17,56 | 25,37 | 25,37 | 11,233 | 0,554 | 11,787 | | |
| 15A 22Ü OP | 19,83 | 19,83 | | | 17,18 | 17,52 | 25,38 | 25,38 | 9,999 | 0,549 | 10,548 | | |
| 20A 3Ü | 19,27 | 19,73 | 18,02 | 18,6 | 18,14 | 18,14 | 25,42 | 25,43 | 13,962 | 0,677 | 14,639 | | |
| 20A 5Ü | 19,53 | 19,77 | 18,36 | 18,65 | 18,04 | 18,05 | 25,42 | 25,42 | 13,692 | 0,68 | 14,372 | | |
| 20A 12,5Ü | 20,15 | 20,18 | 19,1 | 19,13 | 17,84 | 17,88 | 25,42 | 25,42 | 12,606 | 0,68 | 13,286 | | |
| 20A 22Ü | 20,72 | 20,73 | 19,78 | 19,78 | 17,34 | 17,91 | 25,41 | 25,41 | 11,39 | 0,689 | 12,079 | | |
| 20A 3Ü OP | 18,27 | 18,94 | | | 18,38 | 18,39 | 25,44 | 25,44 | 15,827 | 0,658 | 16,485 | | |
| 20A 5Ü OP | 18,65 | 18,99 | | | 18,28 | 18,29 | 25,44 | 25,44 | 15,494 | 0,661 | 16,155 | | |
| 20A 12,5Ü OP | 19,44 | 19,47 | | | 18,05 | 18,09 | 25,44 | 25,44 | 14,137 | 0,66 | 14,797 | | |
| 20A 22Ü OP | 20,16 | 20,17 | | | 17,47 | 18,1 | 25,42 | 25,42 | 12,601 | 0,679 | 13,28 | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Max: | 20,72 | 20,73 | 19,78 | 19,78 | 18,38 | 18,39 | 25,44 | 25,44 | 15,827 | 0,689 | 16,485 | | |
| Min: | 17,93 | 18,31 | 17,69 | 18,02 | 17,07 | 17,38 | 25,37 | 25,37 | 9,002 | 0,501 | 9,555 | | |
| Avg: | 19,35875 | 19,52937 5 | 18,63875 | 18,81 | 17,71937 5 | 17,84375 | 25,40812 5 | 25,41 | 12,31906 25 | 0,605 | 12,92406 25 | | |

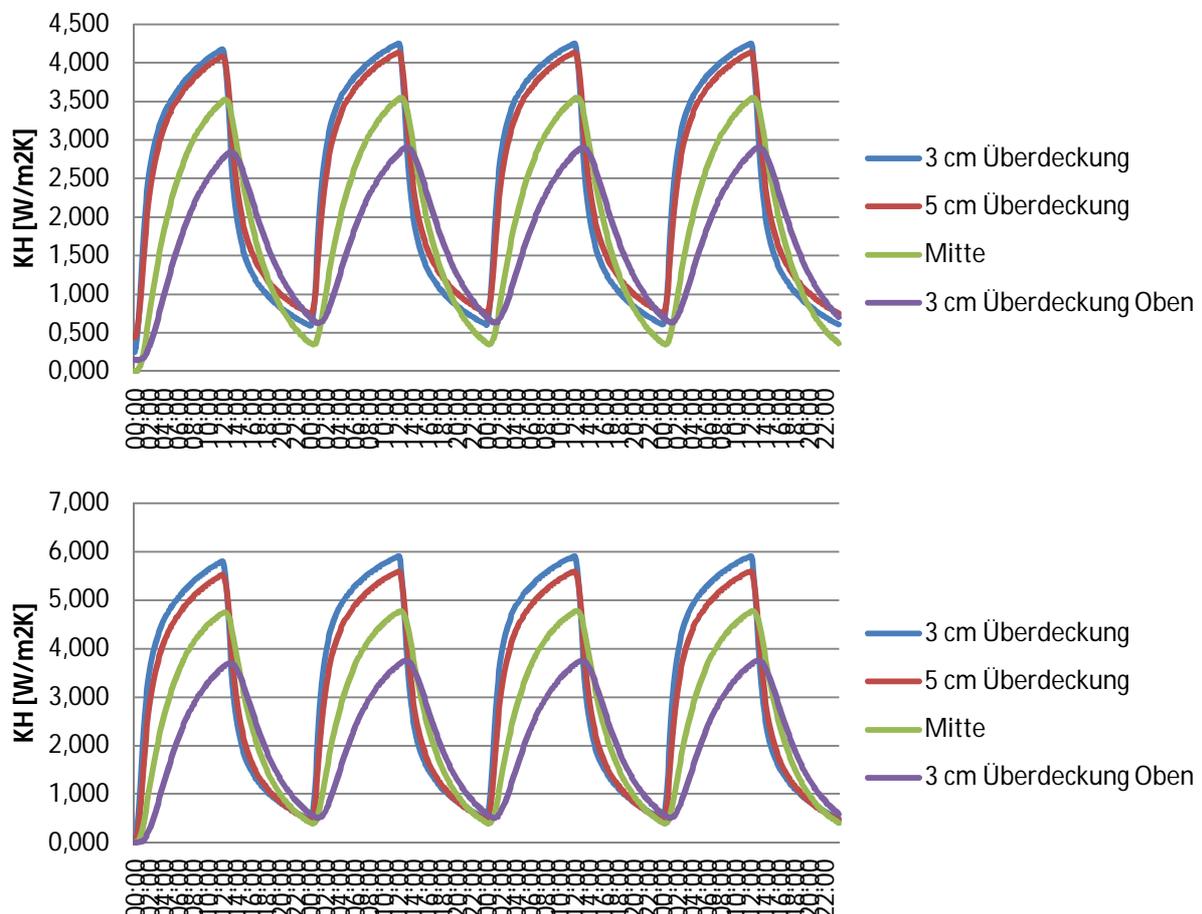
Anhang – Stationäre Auswertung

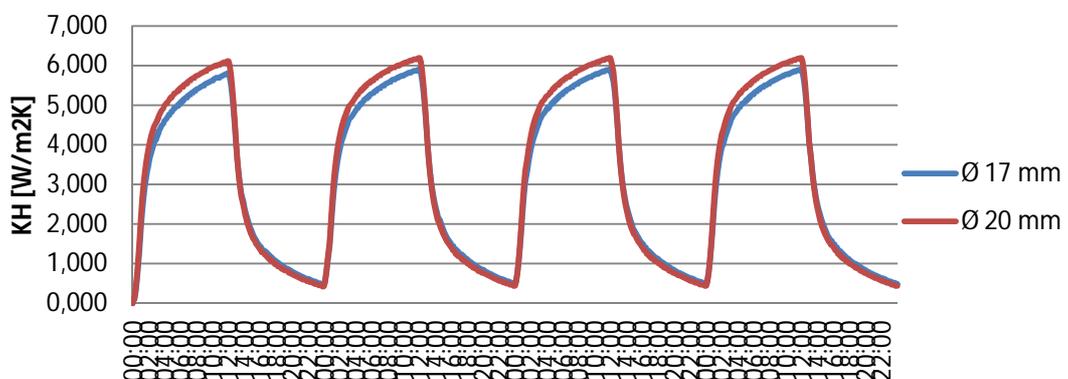
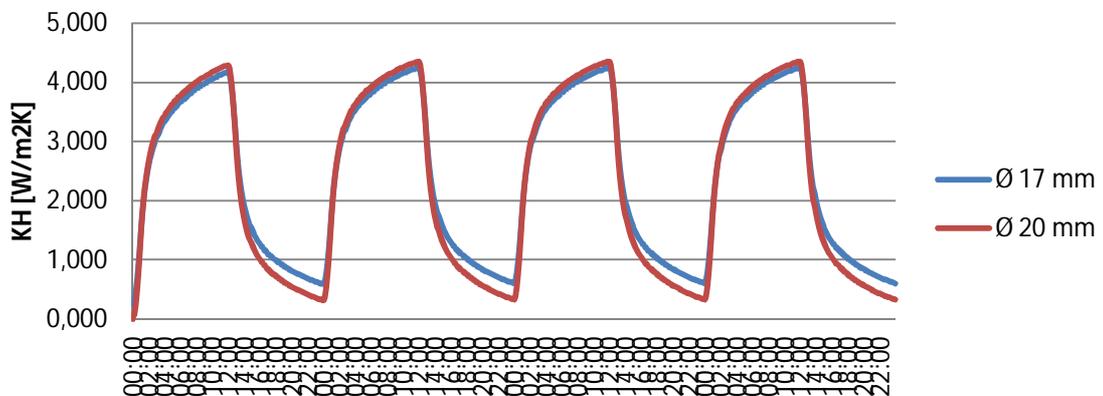
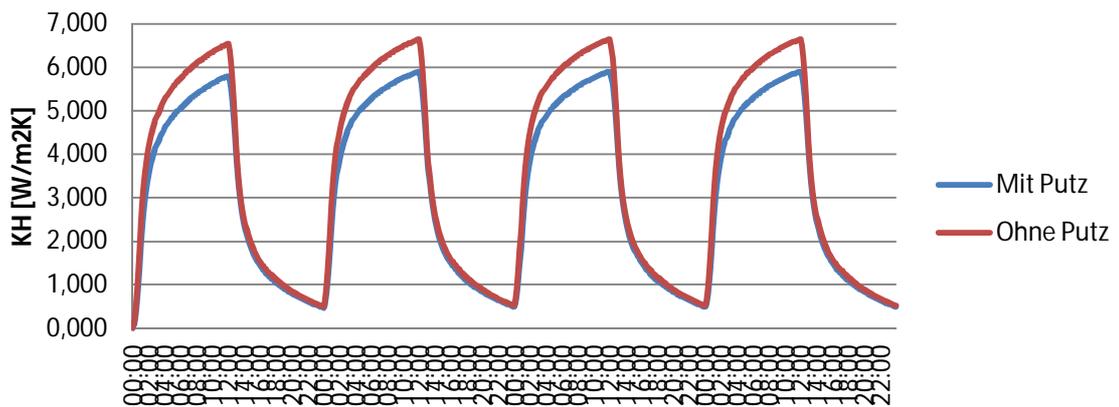
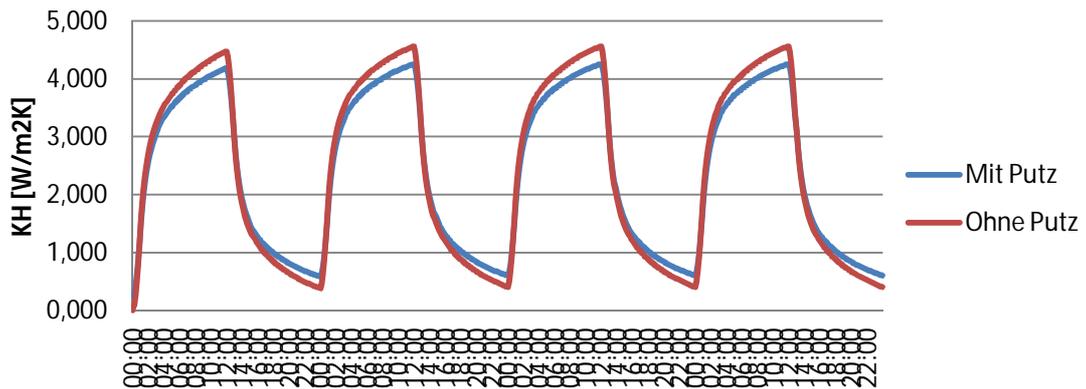
| Ø 20 | 30er Decke | | Temp1m in | Temp1m ax | Temp2m in | Temp2m ax | Temp3m in | Temp3m ax | Temp4m in | Temp4m ax | WärmStr 1 | Wärmstr 2 | WärmStr ges |
|---------------|---------------|----------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|--------------|----------------|
| | | 15A 3Ü | 18,98 | 19,24 | 17,7 | 18,03 | 17,65 | 17,66 | 25,39 | 25,4 | 11,141 | 0,534 | 11,675 |
| 15A 5Ü | 19,22 | 19,33 | 17,99 | 18,13 | 17,59 | 17,6 | 25,39 | 25,4 | 10,894 | 0,536 | 11,43 | | |
| 15A 15Ü | 20 | 20 | 18,92 | 18,92 | 17,39 | 17,4 | 25,4 | 25,41 | 9,715 | 0,526 | 10,241 | | |
| 15A 27Ü | 20,71 | 20,71 | 19,75 | 19,76 | 17,02 | 17,32 | 25,37 | 25,37 | 8,573 | 0,56 | 9,133 | | |
| 15A 3Ü OP | 17,93 | 18,31 | | | 17,85 | 17,85 | 25,4 | 25,41 | 12,724 | 0,527 | 13,251 | | |
| 15A 5Ü OP | 18,26 | 18,42 | | | 17,78 | 17,79 | 25,41 | 25,41 | 12,404 | 0,523 | 12,927 | | |
| 15A 15Ü OP | 19,27 | 19,27 | | | 17,54 | 17,55 | 25,41 | 25,42 | 10,899 | 0,516 | 11,415 | | |
| 15A 27Ü OP | 20,14 | 20,15 | | | 17,12 | 17,45 | 25,37 | 25,38 | 9,484 | 0,552 | 10,036 | | |
| 20A 3Ü | 19,27 | 19,74 | 18,03 | 18,61 | 18,17 | 18,17 | 25,44 | 25,44 | 13,954 | 0,664 | 14,618 | | |
| 20A 5Ü | 19,54 | 19,78 | 18,36 | 18,66 | 18,08 | 18,09 | 25,44 | 25,44 | 13,687 | 0,66 | 14,347 | | |
| 20A 15Ü | 20,31 | 20,32 | 19,28 | 19,29 | 17,83 | 17,84 | 25,4 | 25,4 | 12,29 | 0,705 | 12,995 | | |
| 20A 27Ü | 20,97 | 20,97 | 20,06 | 20,06 | 17,31 | 17,84 | 25,39 | 25,39 | 10,869 | 0,713 | 11,582 | | |
| 20A 3Ü OP | 18,28 | 18,95 | | | 18,42 | 18,42 | 25,46 | 25,46 | 15,815 | 0,64 | 16,455 | | |
| 20A 5Ü OP | 18,66 | 18,99 | | | 18,32 | 18,32 | 25,45 | 25,45 | 15,473 | 0,647 | 16,12 | | |
| 20A 15Ü OP | 19,65 | 19,66 | | | 18,01 | 18,03 | 25,41 | 25,42 | 13,71 | 0,689 | 14,399 | | |
| 20A 27Ü OP | 20,46 | 20,46 | | | 17,43 | 18,01 | 25,4 | 25,41 | 11,978 | 0,701 | 12,679 | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Max: | 20,97 | 20,97 | 20,06 | 20,06 | 18,42 | 18,42 | 25,46 | 25,46 | 15,815 | 0,713 | 16,455 | | |
| Min: | 17,93 | 18,31 | 17,7 | 18,03 | 17,02 | 17,32 | 25,37 | 25,37 | 8,573 | 0,516 | 9,133 | | |
| Avg: | 19,47812 5 | 19,64375 | 18,76125 | 18,9325 | 17,71937 5 | 17,83375 | 25,40812 5 | 25,41312 5 | 12,10062 5 | 0,605812 5 | 12,70643 75 | | |

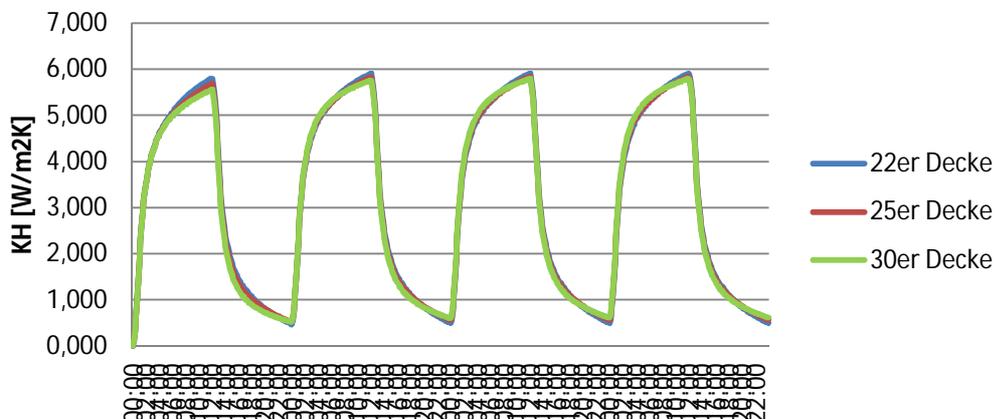
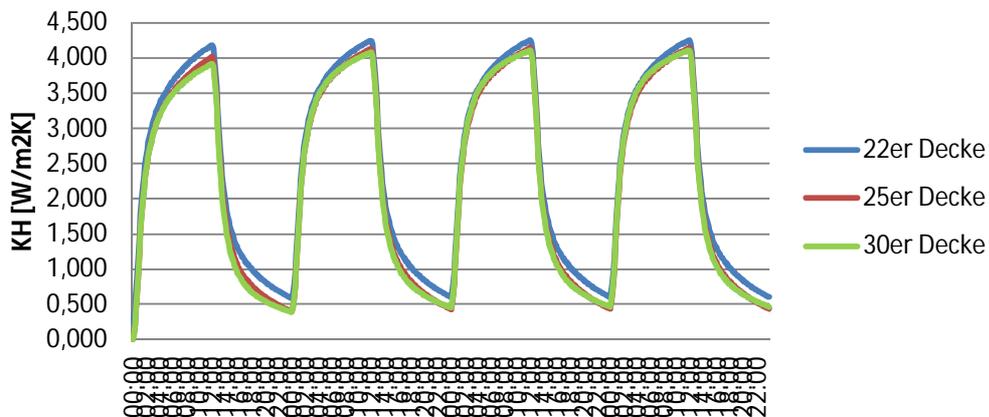
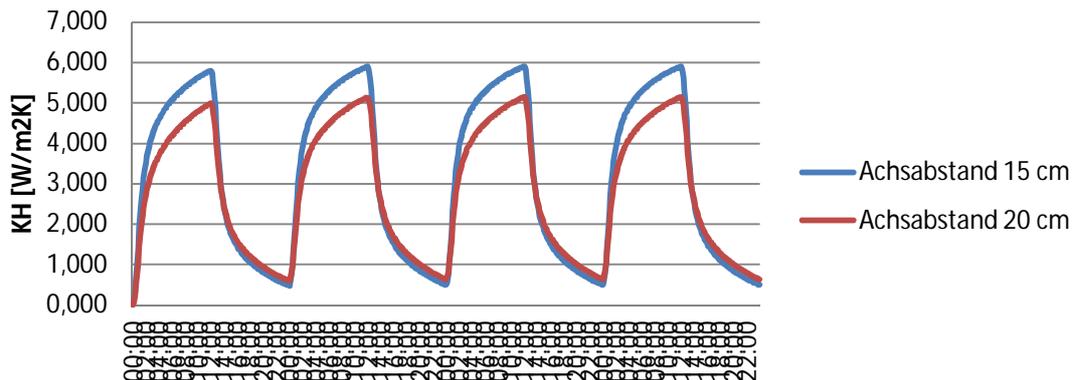
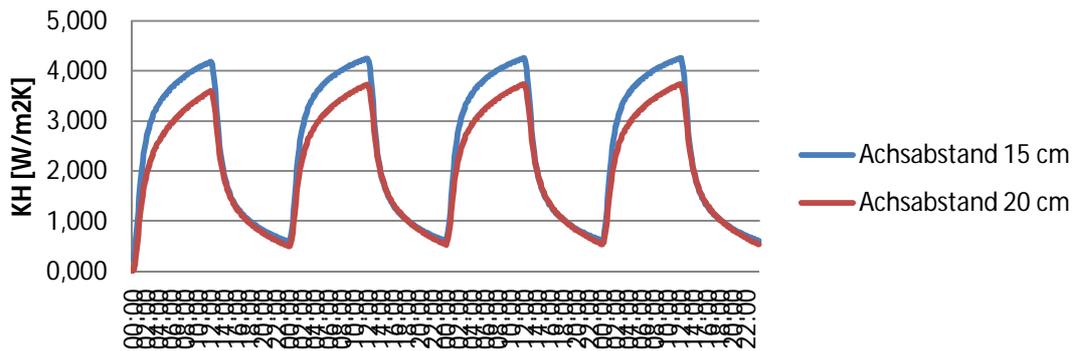
11 Anhang – Instationäre Auswertung

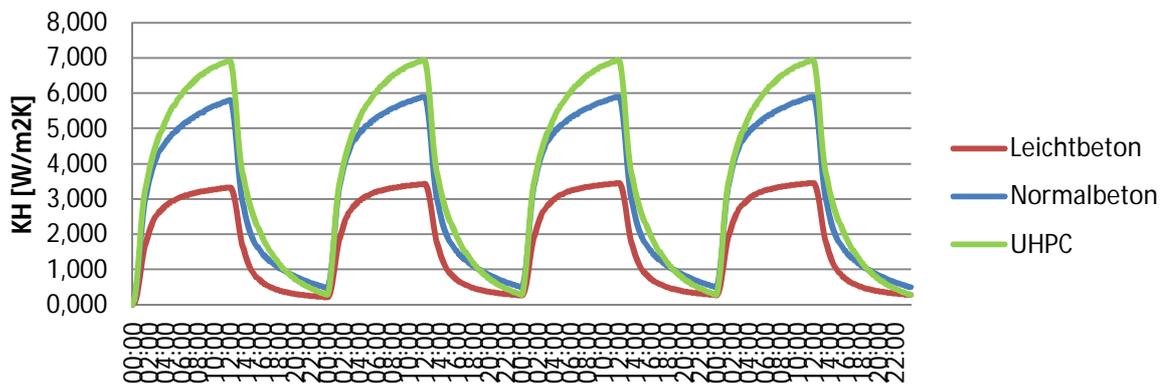
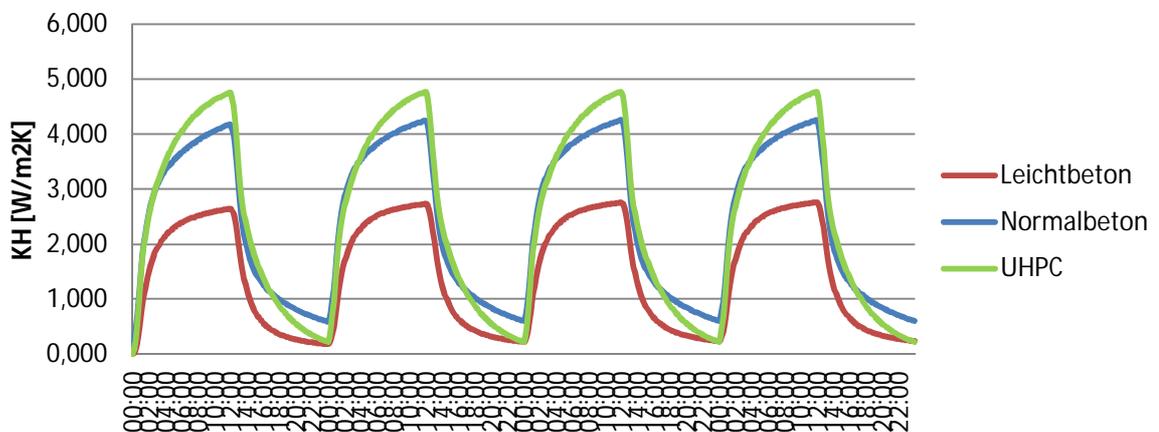
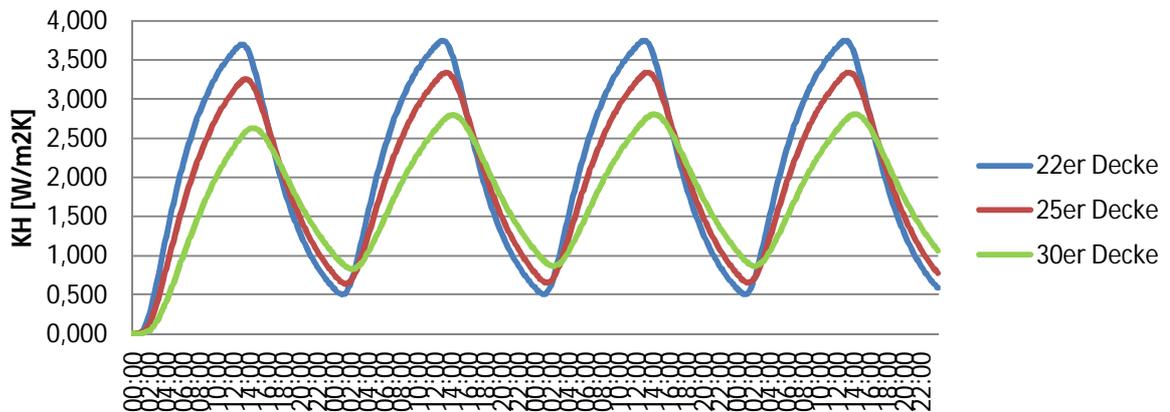
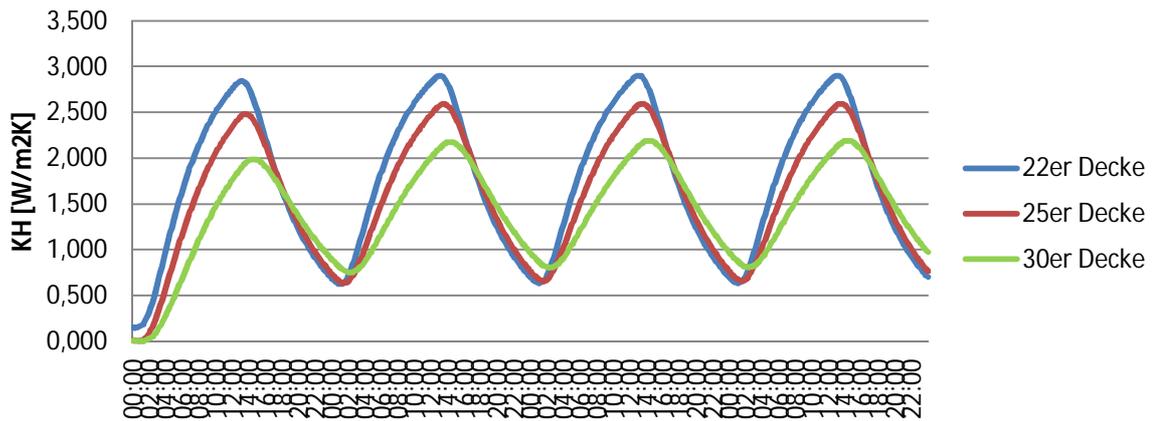
Würde man hier alle Zahlenwerte anführen, würde man lediglich sehr viele Seiten mit Zahlenwerten füllen, genau 51840 verschiedene Ergebnisse. Daher ist es an dieser Stelle zweckdienlicher die Übersichtsgrafiken aus allen Berechnungen anzuführen. In ihnen sind sämtliche Ergebnisse enthalten und zeigen die grafische Auswertung der Simulationen. Die Darstellung zeigt zuerst die Auswertung der Höhenlage des Heizbetriebs und im Anschluss die des Kühlbetriebs. Danach folgen die Grafiken für die Parameter Putz, Durchmesser, Achsabstand, Deckenstärke und Materialien.

11.1 Anhang A – Instationäre Auswertung Zyklus An/Aus

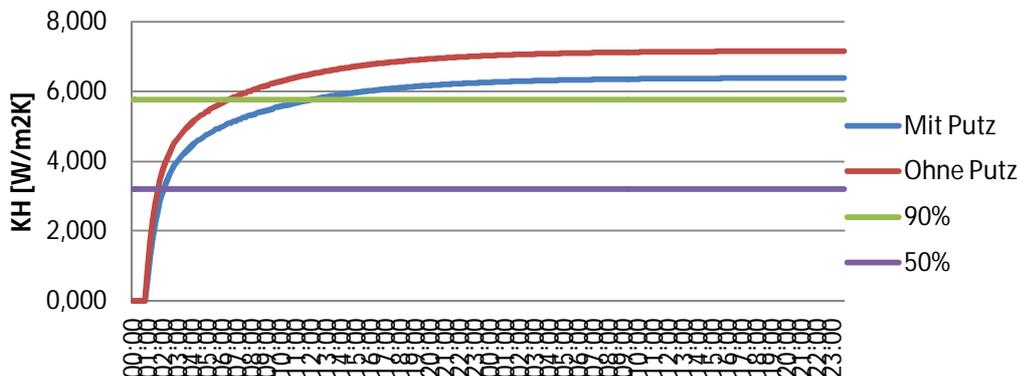
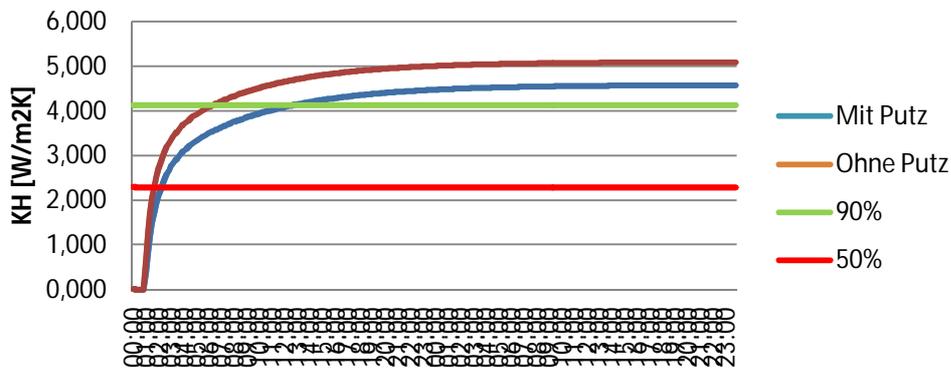
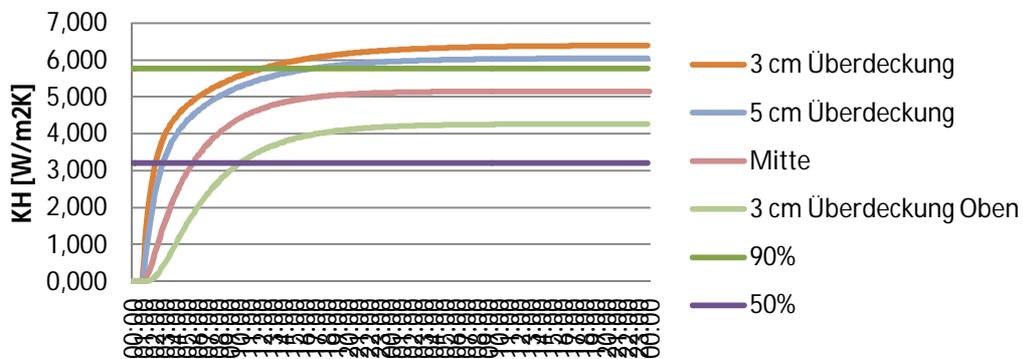
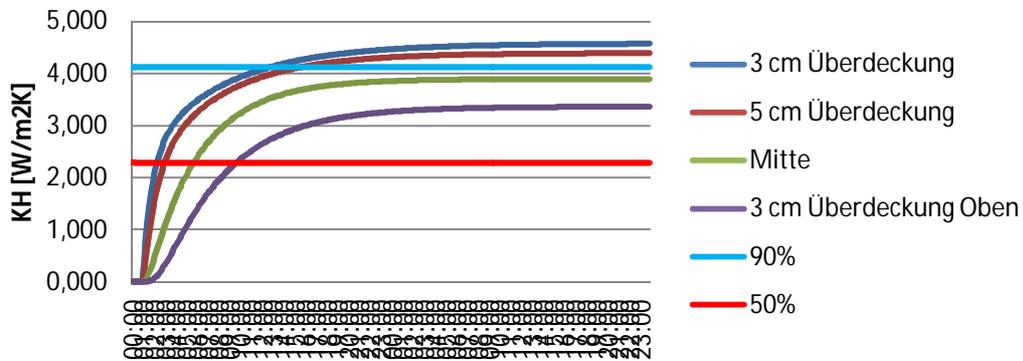


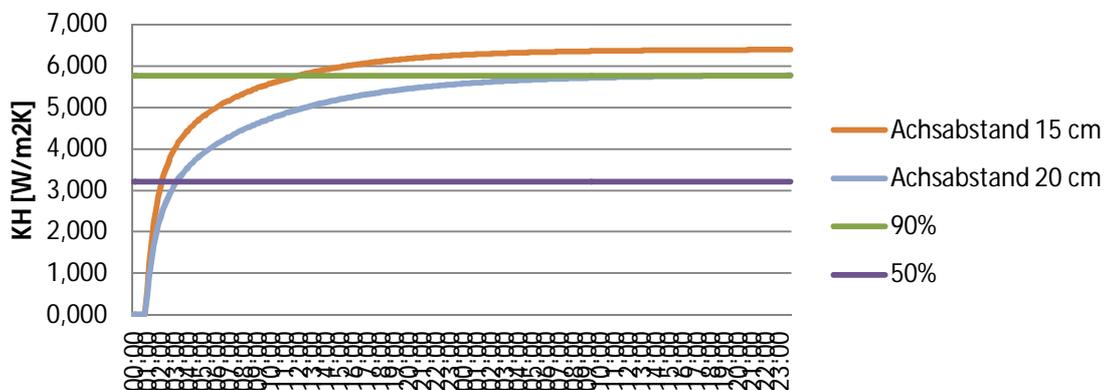
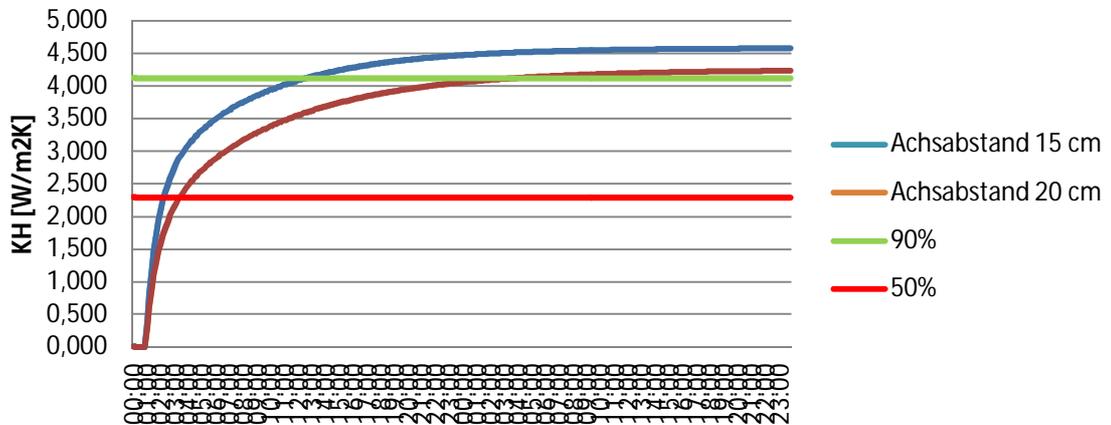
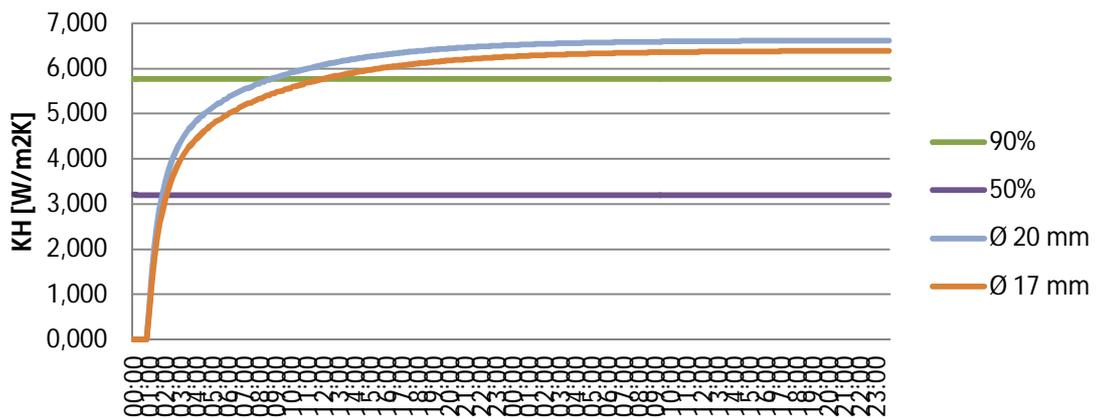
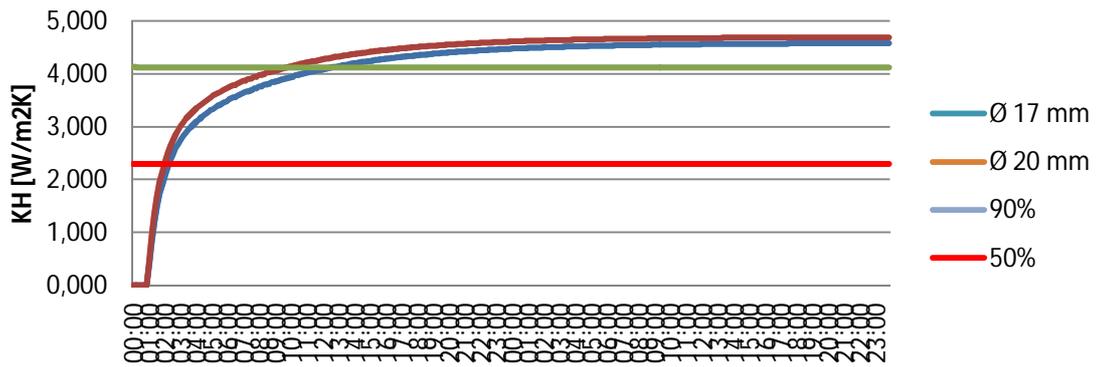


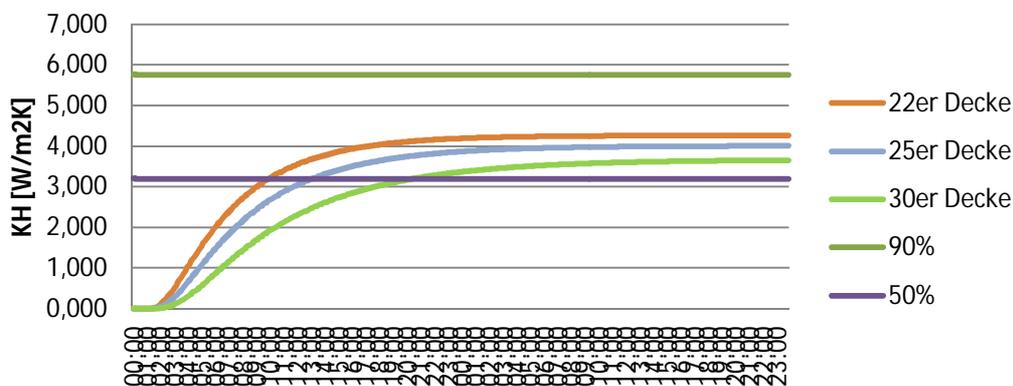
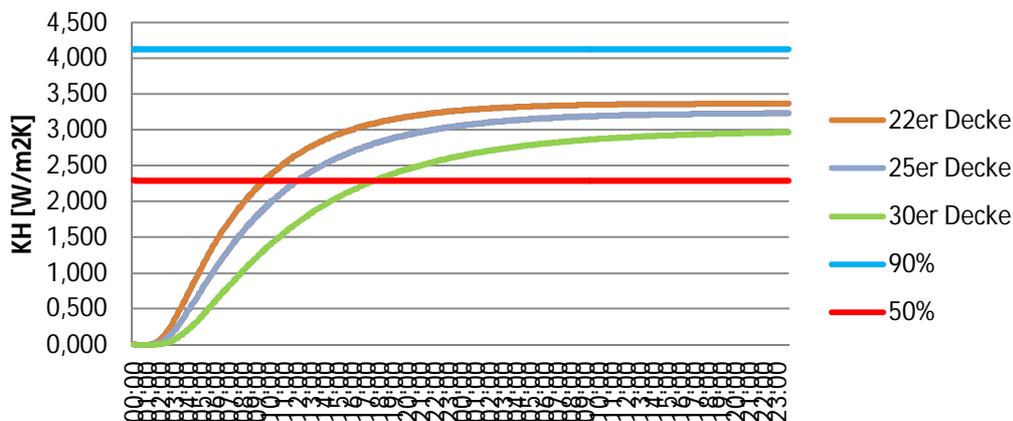
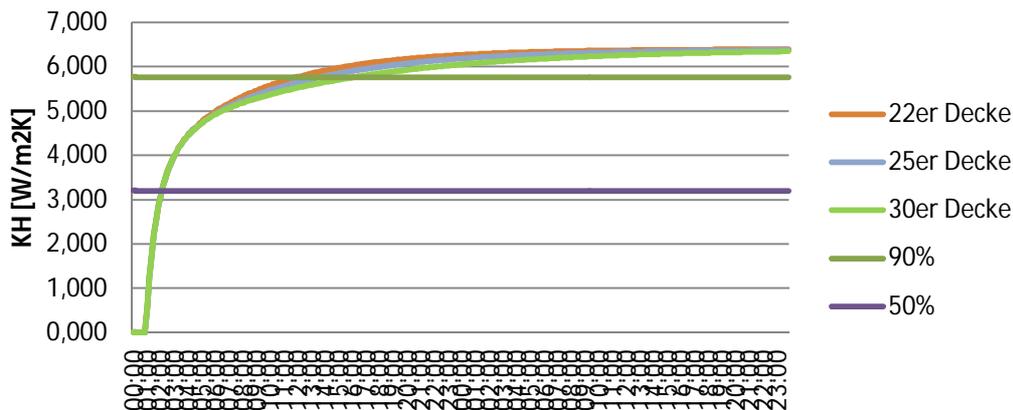
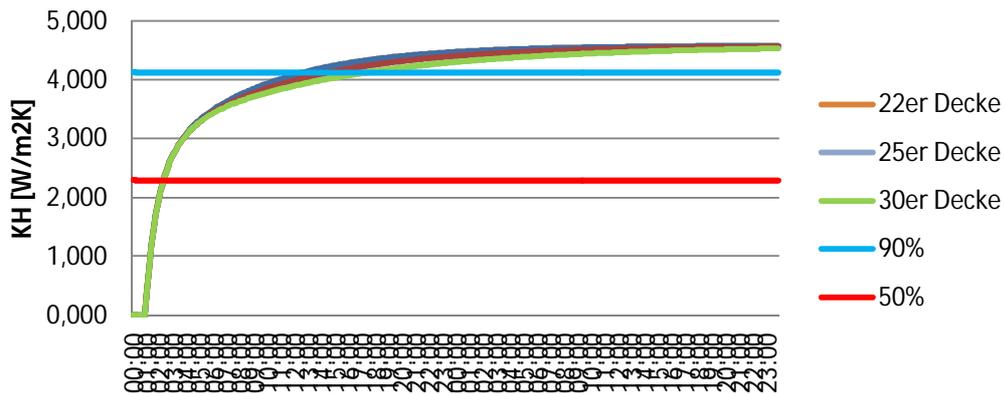


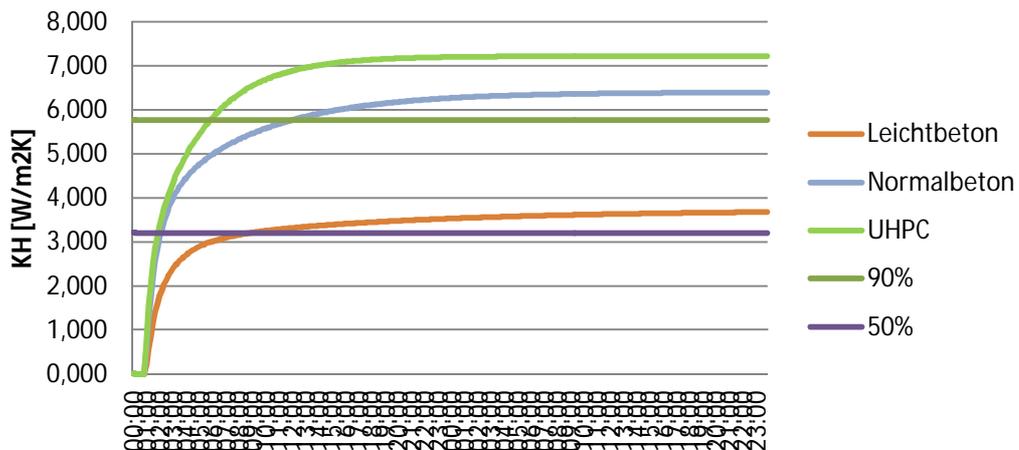
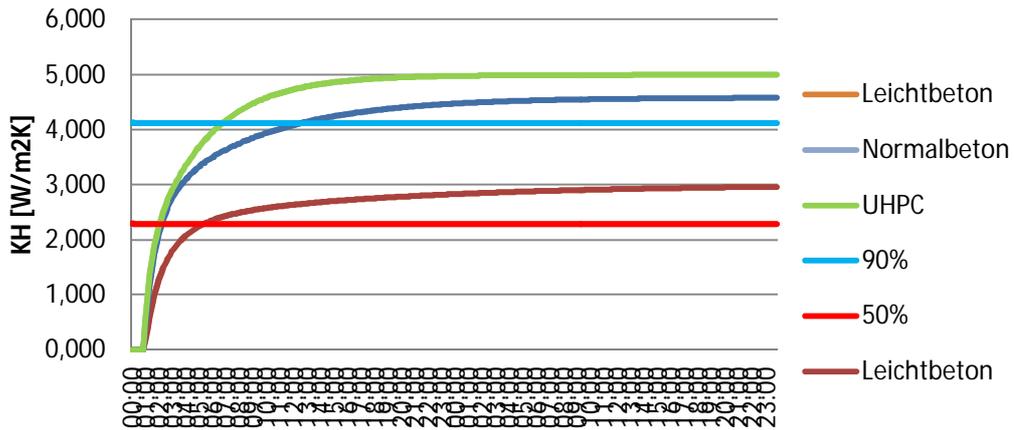


11.2 Anhang B – Instationäre Auswertung Permanent An









11.3 Anhang C – Instationäre Auswertung Permanent Aus

