

Endbericht

**Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen:
Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch
aktivierbare Massivholzelemente**

**Aktenzeichen:
SWD-10.08.18.7-15.26**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.26)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



Projektlaufzeit: 01.08.2015 – 30.04.2018

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung
Paul-Ehrlich-Straße
Gebäude 29
D-67663 Kaiserslautern

Projektleitung: Prof. Dr. Oliver Kornadt (TUK)
Jun.-Prof. Dr. Svenja Carrigan (TUK)
Dipl.-Ing. (BA) Tim Schöndube, M.Sc. (TUK)

Weitere Bearbeiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter (TUM) – Erstellung der Kap. 5.2.4 & 9
Klaus Mindrup, M.Sc. (TUM) – Erstellung der Kap. 5.2.4 & 9
Gerhard Knieriemen (JUWÖ Poroton)
Dipl.-Ing. Franz Loderer (Xella)
Dipl.-Ing. Juliane Nisse (Arge Mauerziegel)
Dipl.-Ing. Hans R. Peters (Mein Ziegelhaus)
Saif Rashid, M.Sc. (TUK)
Dipl.-Forstw. Christof Richter (Binderholz)
Dipl.-Ing. Torsten Schoch (Xella)
Dipl.-Ing. (FH) André Staniszewski, M.BP. (Arge Mauerziegel)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Methodik.....	5
3	Stand der Technik.....	6
4	Untersuchte Gebäudetypen.....	9
5	Versuchskuben.....	9
5.1	Kuben-Konzept.....	12
5.1.1	Bauliche Details.....	12
5.1.2	Technische Gebäudeausrüstung.....	14
5.1.3	Messtechnik.....	18
5.2	Auswertung von Messdaten.....	21
5.2.1	Ziegel-Kubus.....	21
5.2.2	Porenbeton-Kubus.....	32
5.2.3	Kalksandstein-Kubus.....	42
5.2.4	Brettsperrholz-Kubus.....	51
5.3	Kuben-Simulationen + Abgleich Messdaten und Simulationsergebnisse.....	61
6	Simulation eines Modellgebäudes.....	66
7	Simulationsergebnisse.....	78
7.1	Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Nutzenergiebedarf für Heizen.....	80
7.2	Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die sommerliche Überhitzung.....	82
7.3	Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die thermische Behaglichkeit.....	84
8	Wärmespeicherfähigkeitsindex.....	88
8.1	Wärmespeicherfähigkeitsindex – Nutzenergiebedarf für Heizen.....	88
8.2	Wärmespeicherfähigkeitsindex – sommerliche Überhitzung.....	90
8.3	Wärmespeicherfähigkeitsindex – thermische Behaglichkeit.....	91
9	Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente.....	94
9.1	Grundlagen des Brettsperrholzes.....	94
9.1.1	Entwicklung.....	94
9.1.2	Herstellungsprozess.....	94
9.1.3	Eigenschaften des Brettsperrholzes.....	95
9.2	Untersuchung zur Machbarkeit von thermisch aktivierten Massivholzelementen.....	99
9.2.1	Stand der Technik.....	99
9.2.2	Entwicklungsparameter.....	101
9.3	Produktion der Versuchskörper.....	112
9.3.1	Produktionskonzept.....	112
9.3.2	Bemaßung.....	113
9.3.3	Produktion.....	115
9.3.4	Bewertung des Herstellungsprozesses.....	119

9.4	Laborversuche.....	120
9.4.1	Zeitplanung	120
9.4.2	Versuchskonfiguration.....	120
9.4.3	Versuchsergebnisse	127
9.4.4	Visuelle Prüfung und Bewertung der Materialfeuchteentwicklung.....	128
9.5	Thermische Simulation	134
9.5.1	Implementierung einer luftgeführten thermischen Aktivierung von Brettsperrholzelementen in das thermische Simulationsprogramm TRNSYS.....	134
9.5.2	Aufbau des Simulationsmodells mit TYPE 360	135
9.5.3	Validierung des numerischen Modells.....	140
10	Zusammenfassung und Ausblick	144
11	Literatur.....	146
12	Abbildungsverzeichnis.....	149
13	Tabellenverzeichnis	156
14	Anhänge.....	158

1 Einleitung

Die thermische Speicherfähigkeit von Baukonstruktionen kann erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch und die thermische Behaglichkeit von Gebäuden haben. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an die Energieeffizienz [1–4] und den Nutzungskomfort von Gebäuden [5] müssen neben der Weiterentwicklung von Dämmsystemen und den Systemen zur Energiebereitstellung insbesondere die intrinsischen Eigenschaften von Gebäuden auf Grund ihrer Konstruktionsweise stärker berücksichtigt werden. Im Zuge immer genauerer Berechnungs- und Bilanzierungsverfahren ist es notwendig, auch den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes auf den Energiebedarf [6, 7] zu berücksichtigen.

Darüber hinaus ist die wechselseitige Abhängigkeit von Feuchtegehalt und -transport von der Wärmeleit- und Speicherfähigkeit im Holz bei der Verwendung von statischen Materialkennwerten nur unzureichend berücksichtigt, was jedoch für eine exakte energetische Betrachtung von Gebäuden erforderlich ist.

Hier setzt das vorliegende Forschungsprojekt mit einer Untersuchung und Bewertung der Auswirkungen der Wärmespeicherfähigkeit auf das thermische Verhalten von Gebäuden an.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude, welcher es ermöglicht, ohne aufwendige Simulationsrechnungen Aussagen bezüglich des Einflusses der Wärmespeicherfähigkeit auf den Nutzenergiebedarf für Heizen, das sommerliche Überhitzungspotential und die thermische Behaglichkeit treffen zu können. Zu diesem Zweck wurden zum einen Versuchskuben aus verschiedenen Außenwandkonstruktionen errichtet und über ein Jahr messtechnisch untersucht, um z.B. auch Aussagen zum Eindringverhalten von Temperaturwellen in Bauteilen unter realen Klimabedingungen treffen zu können. Zum anderen wurde ein repräsentatives Mehrfamilienhaus für die Durchführung einer Simulationsvariantenuntersuchung herangezogen.

Ferner wurde für Holzkonstruktionen der Effekt von instationären Bauteilfeuchten auf die aktivierbare Speichermasse untersucht. Der Einfluss von Massivholzgebäuden auf das thermische Raumklima wurde im ersten Schritt bei passiven und im zweiten Schritt bei thermisch aktivierbaren Massivholzelementen erforscht.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den messtechnischen Untersuchungen und den Simulationsberechnungen wurde ein Wärmespeicherfähigkeitsindex in Form von Näherungsformeln entwickelt. Diese ermöglichen das Abschätzen des Einflusses der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit (Beschreibung siehe Kapitel 3) von Gebäuden auf den Nutzenergiebedarf zum Heizen, auf das sommerliche Überhitzungspotential und auf die thermische Behaglichkeit der Nutzer.

Eine Berücksichtigung der Wärmespeicherfähigkeit wird auch für moderne Holzkonstruktionen immer wichtiger. Die Einführung von massiven Brettsperrholzbausystemen kombiniert die Möglichkeit des schnellen Bauens mit den Effekten der thermischen Speichermasse auf den Energiebedarf und die thermische Behaglichkeit. Darüber hinaus wird in diesem Projekt für Massivholzgebäude, mit Sichtholzoberflächen, die Umsetzbarkeit eines bauteilintegrierten Flächenheiz- und Kühlsystems untersucht. Dafür wurde auf der Grundlage eines standardisierten Brettsperrholz-Herstellungsprozesses ein möglicher Ablauf zur Produktion thermisch aktivierter Massivholzelemente erarbeitet. Damit wurden zwei Prototypen dieses Systems hergestellt und im Labor getestet. Zur Weiterentwicklung des Systems und für die Auslegung der thermisch aktivierten Massivholzelemente wurde ein Simulationsmodell auf der im Labor gemessenen Daten entwickelt. Anhand der Labormessdaten und der numerischen Simulationen wird eine Aussage zur maximalen Heiz- und Kühlleistung des Systems getroffen.

Am Projekt beteiligt waren die Technische Universität Kaiserslautern als Projektleiter, die Technische Universität München, die Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel, die Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH sowie die Binderholz Bausysteme GmbH.

2 Methodik

Im vorliegenden Forschungsbericht wird zunächst im Kapitel 3 der Stand der Technik bezüglich der Berücksichtigung der Wärmespeicherfähigkeit von Baukonstruktionen und Gebäuden in ausgewählten deutschen Normen und Verordnungen vorgestellt.

Im Anschluss wird im Kapitel 4 darauf eingegangen, welche Gebäudetypen im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht wurden.

Das darauffolgende Kapitel 5 befasst sich mit Versuchskuben, die während der Projektlaufzeit zu Messzwecken sowie zur Validierung von Simulationsmodellen und Materialkennwerten errichtet wurden. Zunächst werden die baulichen Details, die verwendete technische Gebäudeausrüstung und die eingesetzte Messtechnik vorgestellt. Im Folgenden werden die gewonnenen Messdaten ausgewertet und es wird eingegangen auf Simulationen, welche für die Versuchskuben durchgeführt wurden. Zur Validierung der Simulationsmodelle und der verwendeten Materialkennwerte werden die gewonnenen Messdaten mit den Simulationsergebnissen abgeglichen.

Darauf aufbauend wird im Kapitel 6 eine Simulationsuntersuchung am Beispiel eines repräsentativen Mehrfamilienhauses vorgestellt.

Im Kapitel 7 wird auf Basis der Messdaten und der Simulationsergebnisse der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Nutzenergiebedarf für Heizen, das sommerliche Überhitzungspotential und die thermische Behaglichkeit herausgestellt.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden im Kapitel 8 Näherungsformeln entwickelt, mit denen die prozentualen Unterschiede bzgl. des Heiz-Nutzenergiebedarfs, der Übertemperaturgradstunden, des jährlich gemittelten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen und des sommerlich gemittelten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen zwischen einer geplanten Bauweise und einer Bauweise mit einer grundflächenbezogenen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} von $50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ näherungsweise abgeschätzt werden können.

Kapitel 9 enthält eine Dokumentation zur Entwicklung der thermisch aktivierten Massivholzelemente. Zunächst werden Materialdaten für die Entwicklung eines numerischen Bauteilmodells der thermisch aktivierten Massivholzelemente zusammengetragen. Fehlende Daten wurden im Rahmen von Vorversuchen erhoben und gehen in die weitere Entwicklung ein. Nach einer Diskussion möglicher Systemaufbauten und eines möglichen Herstellungsprozesses wurden zwei Prototypen thermisch aktivierter Massivholzelemente produziert. Die Produktion und aufgetretenen Probleme sowie Optimierungsansätze werden präsentiert. Mit den Prototypen wurden umfangreiche Laborversuche unternommen, die zum einen die reale Umsetzbarkeit zeigen, zum anderen Messdaten liefern sollen mit denen ein numerisches Auslegungsmodell validiert werden kann. Nach der Vorstellung der Versuchsergebnisse wird das numerische Modell sowie dessen Entwicklung erläutert.

Die Kapitel 5.2.4 (Auswertung Messdaten Brettsperrholz-Kubus) und 9 (Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente) wurden von der TU München erstellt. Alle übrigen Abschnitte wurden von der TU Kaiserslautern erarbeitet.

3 Stand der Technik

Zur Beurteilung von Bauteil- und Baukonstruktionseigenschaften im Zusammenhang mit der Wärmespeicherfähigkeit von Baustoffen kann insbesondere die spezifische Wärmekapazität c , die Temperaturleitzahl a und der Wärmeeindringkoeffizient b herangezogen werden. Die spezifische Wärmekapazität beschreibt diejenige Wärmemenge Q , welche erforderlich ist, um 1 kg eines Materials um 1 K zu erwärmen. [8]

Möchte man die Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes bewerten, können Rückschlüsse aus der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} gezogen werden. Gemäß der nachfolgenden Formel (1) ist die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} abhängig von der spezifischen Wärmekapazität c , der Rohdichte ρ und der wirksamen Schichtdicke der eingesetzten Baustoffe sowie von den wirksamen Bauteilflächen. Für ein Gebäude sind umso bessere Wärmespeicherfähigkeitseigenschaften zu erwarten, je höher die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} ist. [8]

$$C_{\text{wirk}} = \sum_j c_j \cdot \rho_j \cdot d_j \cdot A_j \quad (1)$$

Legende

C_{wirk}	wirksame Wärmespeicherfähigkeit [Wh/K]
c_j	spezifische Wärmekapazität des Baustoffes in Schicht j [Wh/(kgK)]
ρ_j	Rohdichte des Baustoffes in Schicht j [kg/m ³]
d_j	wirksame Schichtdicke der Schicht j [m]
A_j	wirksame Bauteilfläche [m ²]

Bauteilschichten bis zu 10 cm entfernt von der raumseitigen Oberfläche sind als wirksam anzusetzen (10-cm-Regel). Bei raumtrennenden Wänden und Decken mit einer Dicke unter 20 cm darf pro Raumseite höchstens der halbe Bauteilquerschnitt berücksichtigt werden. Sofern wärmedämmende Schichten (Schichten mit Wärmeleitfähigkeit $\lambda < 0,1$ W/(mK) und mit Wärmedurchlasswiderstand $R > 0,25$ m²K/W) im beschriebenen 10-cm-Bereich bzw. im halben Bauteilquerschnitt liegen, ist nur der raumseitige Bereich bis zur Wärmedämmebene anzusetzen. Man bezeichnet diese Vorgaben als 10-cm-Regel. [8, 9]

Sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäude können entsprechend der EnEV 2016 [10] mit Hilfe der Normenreihe DIN V 18599 energetisch bewertet werden. DIN V 18599-2 [11] erlaubt vereinfacht die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} mittels den nachstehenden Formeln (2) bis (4) zu bestimmen.

$$\text{Für leichte Gebäudezonen:} \quad C_{\text{wirk}} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot A_B \quad (2)$$

$$\text{Für mittelschwere Gebäudezonen:} \quad C_{\text{wirk}} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot A_B \quad (3)$$

$$\text{Für schwere Gebäudezonen:} \quad C_{\text{wirk}} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot A_B \quad (4)$$

Legende

C_{wirk}	wirksame Wärmespeicherfähigkeit [Wh/K]
A_B	Bezugsfläche [m ²]

Alternativ enthält DIN V 18599-2 [11] zur Einstufung der Bauschwere die Kriterien, dass alle Gebäudezonen mit abgehängten oder thermisch abgedeckten Decken, mit Innendämmung der Außenbauteile und/oder mit hohen Räumen (> 4,5 m) als leicht einzustufen sind. Zonen bzw. Gebäude, welche die im Voraus genannten Kriterien nicht erfüllen, und Stahlbetondecken sowie massive Innen- und Außenbauteile mit einer Rohdichte von mindestens 600 kg/m³ und unter 1600 kg/m³ aufweisen, erfüllen die Vorgaben für eine mittelschwere Bauweise. Beträgt die Rohdichte der massiven Innen- und Außenbauteile wenigstens 1600 kg/m³, liegt eine schwere Bauart vor.

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes ist auch bei der Planung des sommerlichen Wärmeschutzes zu berücksichtigen. Die EnEV 2016 [10] fordert für neu zu errichtende Gebäude und für Erweiterungen mit einer hinzukommenden zusammenhängenden beheizten und/oder gekühlten Nutzfläche größer als 50 m² die Einhaltung der Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 [12]. Für reguläre Räume (nicht verbunden mit unbeheizten Glasvorbauten, Doppelfassaden oder transparenten Wärmedämmsystemen) kann die Erfüllung der Vorgaben vereinfacht mit Hilfe des Sonneneintragskennwerte-Verfahrens nachgewiesen werden. Im Rahmen dieses Verfahrens sind für einen kritischen Raum der vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh} und der zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} zu bestimmen und gegenüberzustellen. Die Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz ist erfüllt, wenn der vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh} den zulässigen Sonneneintragswert S_{zul} nicht überschreitet. Die Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes geht gemäß der folgenden Formel (5) bei der Bestimmung des zulässigen Sonneneintragskennwertes S_{zul} durch die anteiligen Sonneneintragskennwert S_1 und S_6 ein.

$$S_{\text{zul}} = \sum S_x = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 \quad (5)$$

Legende

S_{zul}	zulässiger Sonneneintragskennwert [-]
S_x	anteiliger Sonneneintragskennwert [-]
S_1	Sonneneintragskennwert resultierend aus Nachtlüftung und Bauart [-]
S_2	Sonneneintragskennwert resultierend aus grundflächenbezogenem Fensterflächenanteil [-]
S_3	Sonneneintragskennwert resultierend aus Sonnenschutzglas [-]
S_4	Sonneneintragskennwert resultierend aus Fensterneigung [-]
S_5	Sonneneintragskennwert resultierend aus Fensterorientierung [-]
S_6	Sonneneintragskennwert resultierend aus Einsatz passiver Kühlung [-]

In Übereinstimmung mit DIN V 18599-2 [11] ist ohne Nachweis der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} von einer leichten Bauart auszugehen bei Gebäuden mit abgehängten oder thermisch abgedeckten Decken, mit Innendämmung der Außenbauteile und/oder mit hohen Räumen (> 4,5 m). Sind stattdessen Stahlbetondecken sowie massive Innen- und Außenbauteile mit einer flächenanteilig gemittelten Rohdichte zwischen 600 kg/m³ und 1600 kg/m³ vorhanden, kann vereinfacht eine mittlere Bauart angesetzt werden. Bei einer Rohdichte der massiven Innen- und Außenbauteile von mindestens 1600 kg/m³ ist von einer schweren Bauart auszugehen. Alternativ darf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit auch nach DIN EN ISO 13786 [9] bestimmt werden um daraus mit Hilfe der nachstehenden Formeln (6) bis (8) die Bauart einzuordnen. [12]

leichte Bauart, wenn: $\frac{C_{wirk}}{A_G} < 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ (6)

mittlere Bauart, wenn: $50 \text{ Wh}/(\text{K}\text{m}^2) \leq \frac{C_{wirk}}{A_G} \leq 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ (7)

schwere Bauart, wenn: $\frac{C_{wirk}}{A_G} > 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ (8)

Legende

C_{wirk} wirksame Wärmespeicherfähigkeit [Wh/K]

A_G Nettogrundfläche [m²]

4 Untersuchte Gebäudetypen

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Untersuchungen sind speziell ausgerichtet auf standardmäßige neu zu errichtende und energetisch sanierte Wohngebäude ohne Innendämmung sowie abgehängte oder thermisch abgedeckte Decken unter Einhaltung der Hauptanforderungen der aktuell gültigen EnEV 2016. Die Hauptanforderungen umfassen die Begrenzung des Jahres-Primärenergiebedarfs und der Transmissionswärmeverluste, was unter anderem den Einsatz von Wärmedämmung nach sich zieht.

5 Versuchskuben

Zur Untersuchung des Wärmespeicherverhaltens unterschiedlicher Baustoffe und Konstruktionen unter realen Bedingungen sowie zur Validierung von Simulationsuntersuchungen wurden insgesamt vier Versuchskuben an drei unterschiedlichen Standorten in Deutschland errichtet.

Auf dem Gelände der JUWÖ Poroton-Werke Ernst Jungk und Sohn GmbH in Wöllstein (Rheinland-Pfalz) wurde ein Versuchskubus mit Außenwänden aus Ziegel-Mauerwerk errichtet. Der Standort des Ziegel-Kubus kann der folgenden Abbildung 1 entnommen werden.



Abbildung 1: Aufstellort Ziegel-Kubus

In Emstal (Brandenburg) wurde auf dem Grundstück der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH entsprechend der nachstehenden Abbildung 2 ein Versuchskubus mit Außenwänden aus Porenbeton und ein Kubus bestehend aus Kalksandstein-Wänden mit außenseitiger Dämmung aufgebaut.



Abbildung 2: Aufstellort Porenbeton- und Kalksandstein-Kubus

Der vierte Versuchskubus mit Außenwänden aus Brettsperrholzelementen und außenseitiger Holzweichfaserdämmung wurde gemäß der nachfolgenden Abbildung 3 aufgestellt auf dem Gelände der Binderholz Deutschland GmbH in Kösching (Bayern).

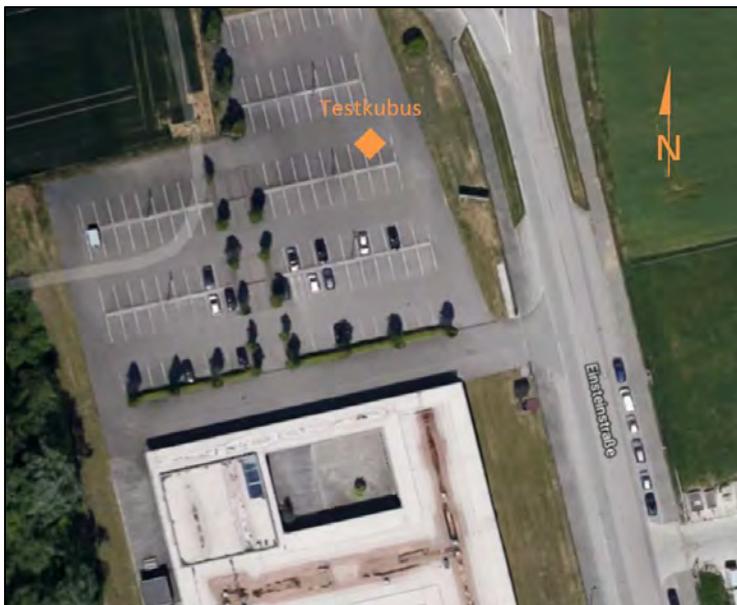


Abbildung 3: Aufstellort Brettsperrholzkubus

Die eingesetzten Außenwand-Baustoffe werden von den Projektpartnern produziert und vertrieben. Daraus ergibt sich zum einen der Vorteil, dass detaillierte Materialkennwerte vorliegen und verwendet werden konnten. Diese Daten bildeten eine gute Ausgangsbasis für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens.

Zum anderen decken die untersuchten Außenwand-Materialien einen großen Rohdichtebereich ab. Porenbeton-Mauerwerk (Plansteine) als leichtester Baustoff ist bereits ab einer Rohdichteklasse von 0,25 bei dem Projektpartner Xella verfügbar [13]. Im Gegensatz dazu wird Kalksandstein-Mauerwerk (Plansteine) als schwerstes Material bis zu einer Rohdichteklasse von 3,0 in Deutschland von Xella vertrieben [14]. Die ausgewählten Baustoffe gewährleisten es weiterhin, die leichte Bauweise (mittlere Rohdichte $< 600 \text{ kg/m}^3$), die mittelschwere Bauweise ($600 \text{ kg/m}^3 \leq$ mittlere Rohdichte $< 1600 \text{ kg/m}^3$) und die schwere Bauweise (mittlere Rohdichte $\geq 1600 \text{ kg/m}^3$) entsprechend DIN V 18599-2 [11] bzw. die leichte Bauart (flächenanteilig gemittelte Rohdichte $< 600 \text{ kg/m}^3$), die mittlere Bauart ($600 \text{ kg/m}^3 \leq$ flächenanteilig gemittelte Rohdichte $< 1600 \text{ kg/m}^3$) und die schwere Bauart (flächenanteilig gemittelte Rohdichte $\geq 1600 \text{ kg/m}^3$) entsprechend DIN 4108-2 [12] im Rahmen der Untersuchungen abzudecken.

Die entsprechend den folgenden Abbildungen 4 bis 7 errichteten Kuben werden im Detail in dem Unterkapitel 5.1 vorgestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass sich der Brettsperrholz-Kubus etwas von den übrigen Kuben unterscheidet.



Abbildung 4: Errichteter Ziegel-Kubus



Abbildung 5: Errichteter Porenbeton-Kubus



Abbildung 6: Errichteter Kalksandstein-Kubus



Abbildung 7: Errichteter Brettsperrholzkubus

5.1 Kuben-Konzept

5.1.1 Bauliche Details

Die vier Versuchskuben wurden so konzipiert und errichtet, dass alle Kuben vergleichbare Innenmaße von ca. 2,74 m x 2,74 m x 2,80 m (L x B x H) und eine vergleichbare Ausrichtung aufweisen. Auf Grund von unterschiedlichen Bauteilaufbauten variieren die Außenabmessungen. Der Wärmedurchgangskoeffizient U der opaken Außenbauteile beträgt bei allen Versuchskuben ca. $0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Jeder Kubus weist eine nach Südosten orientierte Fenstertür auf mit Rohbaumaßen von $0,885 \text{ m} \times 2,01 \text{ m}$ (B x H), einer 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, einem Gesamtenergiedurchlassgrad g von ca. 55 % und einem Wärmedurchgangskoeffizienten U_w von insgesamt ca. $1,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Es wurde sich für eine Südost-Ausrichtung entschieden, um zum einen im Winter solare Gewinne zur natürlichen Erwärmung der Kuben zu begünstigen. Zum anderen wurde durch diese Fenstertür-Orientierung eine übermäßige sommerliche Überhitzung vermieden.

Die Entwurfszeichnungen zu den Versuchs-Kuben sind im Anhang 1 hinterlegt. Die ausgeführten Wandaufbauten können den nachfolgenden Tabellen 1 bis 4 entnommen werden.

Tabelle 1: Wandaufbau Ziegel-Kubus

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Ziegel	0,365	0,090	700	1000
	3	Außenputz	0,018	0,250	1000	1000
			d = 0,393 m	U = 0,23 W/(m²K)	C_{wirk} = 21 Wh/(m²K)	

Tabelle 2: Wandaufbau Porenbeton-Kubus

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Porenbeton	0,365	0,090	325	1000
	3	Außenputz	0,018	0,250	1000	1000
			d = 0,393 m	U = 0,23 W/(m²K)	C_{wirk} = 12 Wh/(m²K)	

Tabelle 3: Wandaufbau Kalksandstein-Kubus

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Kalksandstein	0,175	1,300	2200	1000
	3	Dämmung	0,180	0,045	-	1300
	4	Außenputz	0,008	0,470	1400	1000
			d = 0,373 m	U = 0,23 W/(m²K)	C_{wirk} = 59 Wh/(m²K)	

Tabelle 4: Wandaufbau Brettsper Holz-Kubus

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Brettsper Holz	0,100	0,130	470	1600
	2	Holzweichfaser-dämmung	0,140	0,042	140	2100
	3	Außenputz	0,010	1,000	1800	1000

$d = 0,250 \text{ m}$

$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$C'_{\text{wirk}} = 21 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$

Mit $12 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$ weisen die Außenwände des Porenbeton-Kubus die niedrigste flächenbezogene wirksame Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} auf gefolgt vom Ziegel- und Brettsper Holz-Kubus mit jeweils $21 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$. Am schwersten sind die Außenwände des Kalksandstein-Kubus mit einem C'_{wirk} von $59 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$.

5.1.2 Technische Gebäudeausrüstung

Die technische Gebäudeausrüstung umfasst Komponenten zur regelbaren Beheizung, Belüftung und Beleuchtung der Versuchskuben.

Die einheitliche Beheizung wird sichergestellt durch einen installierten elektrischen Rippenrohrheizkörper pro Kubus mit einer Maximalleistung von 1000 W . Ein solcher Heizkörper entsprechend der Abbildung 8 ist jeweils mittig zwischen Fenstertür und Raummitte platziert. Die Heizkörper sind jeweils gekoppelt an eine Regelungsbox, wobei die Leistung und daraus resultierend die Raumlufttemperatur auf Basis eines Pt100-Temperaturfühlers geregelt wird, der jeweils raummittig in einem Behaglichkeitsmessstand in einer Höhe von $0,60 \text{ m}$ platziert ist.



Abbildung 8: Installierter elektrischer Rippenrohrheizkörper

Zur Gewährleistung einer kontrollierbaren Belüftung sind pro Kubus jeweils die Südwest- (unterer Bereich) und die Nordost-Außenwand (oberer Bereich) mit einem einheitlichen Wanddurchbruch versehen. In diesen Außenwandöffnungen wurde jeweils ein raumseitig auskragendes Rohr eingebaut mit einer Absperrklappe und einem verbundenen Stellmotor als innenseitigen Abschluss. Zusätzlich wurde das Rohr in der Nordost-Außenwand jeweils außenseitig mit einem Ventilator verbunden (Abluftrohr). Dieser Ventilator saugt im Betrieb Luft vom Rauminnen zur Außenluft, weshalb durch die Öffnung und das Rohr in der Südwest-Außenwand Luft nachströmt (Zuluftrohr). Zur Regelung des Luftwechsels ist in dem Rohr in der Südwest-Außenwand ein Thermoanemometer u.a. zur Messung der Luftgeschwindigkeit eingebaut. Dieses Thermoanemometer sowie der Außenwand-Ventilator und

die Absperrklappen mit Stellmotor sind pro Kubus mit einer Regelungsbox verbunden. Diese steuert mit Hilfe der Luftgeschwindigkeitsmessdaten den Ventilator und die Absperrklappen und ermöglicht somit den regelbaren Luftwechsel im Kubus. Um geplante Luftwechselraten möglichst konstant realisieren zu können, wurde dauerhaft auf den Einsatz von Fensterlüftung verzichtet. Zur Veranschaulichung sollen die nachstehenden Abbildungen 9 bis 16 dienen.



Abbildung 9: Außenansicht auf Zuluftröhr



Abbildung 10: Innenansicht auf Zuluftröhr



Abbildung 11: Innenansicht auf Zuluftröhr



Abbildung 12: Ansicht auf Thermoanemometer



Abbildung 13: Außenansicht auf Abluftrohr



Abbildung 14: Innenansicht auf Abluftrohr



Abbildung 15: Innenansicht auf Abluftrohr



Abbildung 16: Innenansicht auf Abluftrohr

Um die Kuben bei Bedarf künstlich beleuchten zu können wurde entsprechend der folgenden Abbildung 17 jeweils ein LED-Leuchtmittel mit einer Leistung von 11 W mittig oberhalb der Fenstertür installiert.



Abbildung 17: Innenansicht auf Leuchtmittel

Detaillierte Informationen zu den eingesetzten Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung können dem Anhang 2 entnommen werden.

5.1.3 Messtechnik

Zur Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens der Versuchskuben wurde sowohl in den Bauteilen als auch im Raum jeweils Messtechnik installiert. Weiterhin wurden Wetterstationen zur Aufzeichnung von Klimadaten eingesetzt.

Zum einen wurde pro Kubus der Temperaturverlauf im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand mit Hilfe von NTC-Fühlern gemessen. Zu diesem Zweck wurde entsprechend den folgenden Abbildungen 18 bis 20 jeweils ein Wandbaustein vor dem Einbau präpariert und mit Messtechnik ausgestattet. In den übrigen Wänden wurde die Temperatur in der Innenputz- und Außenputzschicht ebenfalls mittels NTC-Sensoren aufgezeichnet. Auch für den unteren Gebäudeabschluss wurde jeweils unter Verwendung von NTC-Fühlern die innere und äußere Oberflächentemperatur protokolliert. Zum anderen wurde in jedem Kubus der Temperaturverlauf im Dachquerschnitt mit Hilfe von NTC-Sensoren gemessen. Die genauen Positionen der eingebauten Bauteil-Temperaturfühler können dem Anhang 3 entnommen werden.

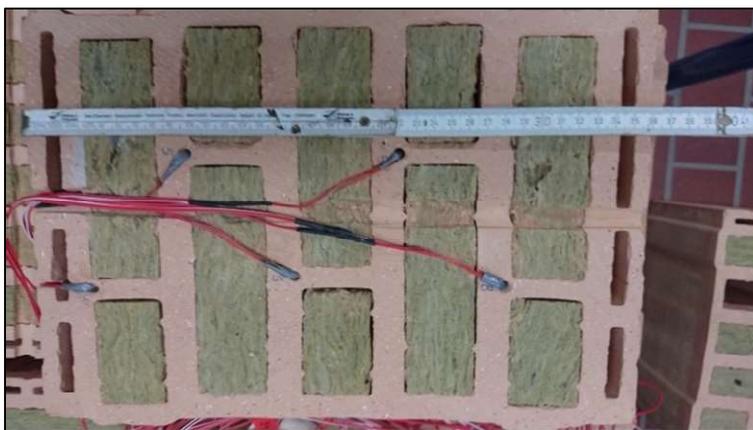


Abbildung 18: Präparierter Ziegel-Mauerstein

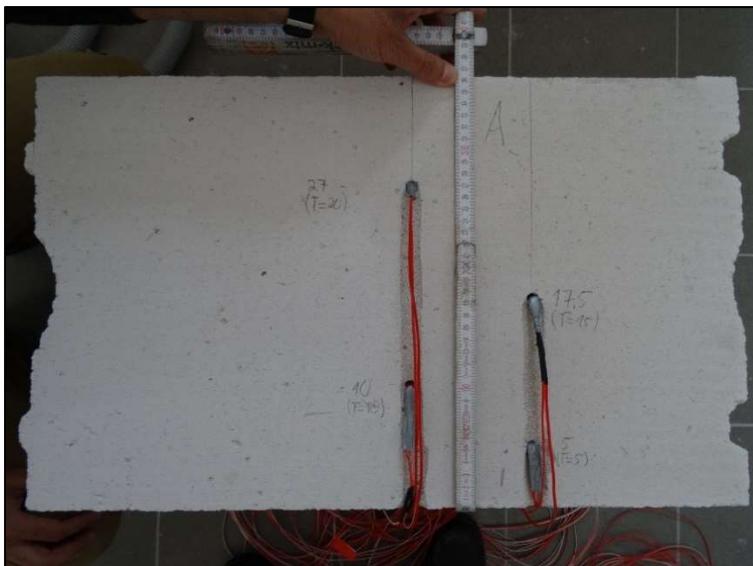


Abbildung 19: Präparierter Porenbeton-Mauerstein



Abbildung 20: Präparierter Kalksandstein-Mauerstein

Zur Aufzeichnung des Raumklimas wurde pro Kubus in der Raummitte ein Behaglichkeitsmessstand entsprechend der nachstehenden Abbildung 21 installiert mit einem Globe-Thermometer zur Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur, einem digitalen Fühler zur Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck sowie einem omnidirektionalen Thermoanemometer zur Aufzeichnung der Luftströmung. Die im Voraus aufgezählten Komponenten wurden entsprechend der DIN EN 15251 [15] in einer Höhe von 0,60 m oberhalb des Fußbodens installiert. Zusätzlich wurde im Behaglichkeitsmessstand in einer Höhe von 1,10 m ein zweiter baugleicher digitaler Fühler eingesetzt um Aussagen über eine mögliche Temperaturschichtung treffen zu können.



Abbildung 21: Behaglichkeitsmessstand

Zur Regelung der Beheizung und Belüftung wurde außerdem pro Kubus, wie im Kapitel 5.1.2 beschrieben, ein Pt100-Temperaturfühler (installiert in unterer Ebene des Behaglichkeitsmessstandes) und ein Thermoanemometer (eingebaut im Zuluft-Lüftungsrohr) eingesetzt.

Des Weiteren wurden Klimadaten in Wöllstein und Emstal gesammelt mit Hilfe der Wetterstationen entsprechend den nachfolgenden Abbildungen 22 und 23, die in unmittelbarer Umgebung der Versuchskuben (siehe Abbildungen 1 und 2) in Betrieb waren. Auch am Standort Kösching wurden ausgewählte Klimaparameter aufgezeichnet.



Abbildung 22: Wetterstation Wöllstein



Abbildung 23: Wetterstation Emstal

5.2 Auswertung von Messdaten

Seit April 2017 wurden für alle Versuchskuben Messdaten gesammelt, die im nachfolgenden im Einzelnen ausgewertet werden. Die TU Kaiserslautern war verantwortlich für den Ziegel-, den Porenbeton- und den Kalksandstein-Kubus, die TU München für den Brettsperrholz-Kubus. Insbesondere wird eingegangen auf Jahres-Temperaturverlauf, sommerliches Aufheizverhalten, winterliches Abkühlverhalten, künstliches Aufheiz- und Abkühlverhalten sowie Nachtabsenkung der Heizung. Die aufgezeigten Daten zum Raumklima der Kuben beziehen sich auf eine Höhe von 0,60 m oberhalb des Fußbodens. Für die Berechnung des vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD (detaillierte Infos siehe Kapitel 5.2.1) wurde entsprechend DIN EN ISO 7730 [16] ein Wärmedurchlasswiderstand der Bekleidung von 0,7 clo und ein Energieumsatz durch körperliche Tätigkeit von 1,2 met angesetzt.

5.2.1 Ziegel-Kubus

Die nachfolgende Abbildung 24 zeigt die gemessene Raumlufttemperatur im Ziegel-Kubus und die ermittelte Außenlufttemperatur am Standort Wöllstein im Zeitraum von April 2017 bis einschließlich Februar 2018. Während dieses Zeitraums schwankte die Außenlufttemperatur im Bereich von -9,7 °C bis 35,0 °C und die Raumlufttemperatur zwischen 15,0 °C und 30,5 °C.

Seit dem Beginn der Messungen bis in den Mai 2017 hinein wurde mit Hilfe der installierten Heizung eine mittlere Raumlufttemperatur von 19,4 °C sichergestellt. Im Zeitraum vom 13.05.17 bis zum 12.09.17 war die Heizung begünstigt durch das Außenklima überwiegend nicht mehr im Betrieb. Bedingt durch das Außenklima kam es zum zeitweiligen Aufheizen und Abkühlen der Raumluft. Danach war der Einsatz der Heizung wieder erforderlich, um eine anvisierte Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C zu erreichen. Zeitweise wurde zwischen 23 Uhr und 6 Uhr eine Nachtabsenkung der Raumlufttemperatur auf 16,0 °C umgesetzt.

Vom 11.12.17 bis zum Jahreswechsel wurde ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Bei ausgeschalteter Lüftungsanlage wurde der Kubus zunächst bis zu einer Soll-Raumlufttemperatur von 30,0 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.17 konstant gehalten. Daraufaufgehend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Ab dem 01.01.18 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C und zeitweiliger Nachtabsenkung (zwischen 23 Uhr und 6 Uhr) auf 16,0 °C.

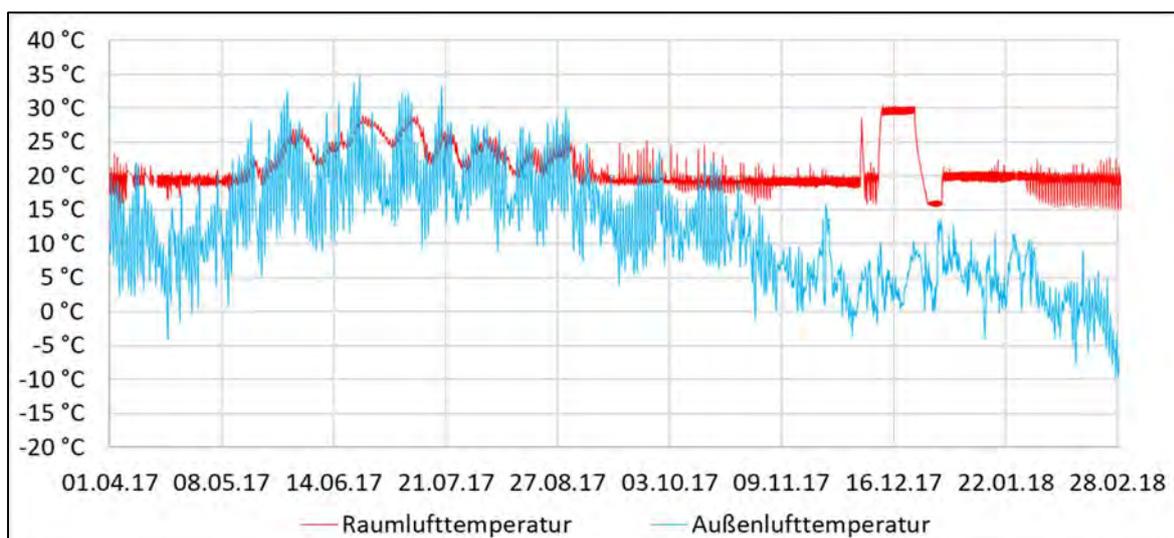


Abbildung 24: Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

Die folgenden Abbildungen 25 und 26 weisen das sommerliche Aufheizverhalten des Ziegel-Kubus in Abhängigkeit vom Außenklima in Wöllstein aus.

Zur Auswertung der sommerlichen Überhitzung in Anlehnung an DIN 4108-2 [12] kann die Abbildung 25 herangezogen werden. Diese Norm regelt die Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz entsprechend den Vorgaben der EnEV 2016 [10]. Soll alternativ zum Sonneneintragskennwerte-Verfahren (Beschreibung siehe Kapitel 3) der Nachweis der Einhaltung der Anforderungen mit Hilfe von thermischen Gebäudesimulationen erbracht werden, ist die Erfüllung eines Übertemperaturgradstunden-Anforderungswertes erforderlich. Die Übertemperaturgradstunden eines Raumes lassen sich unter Verwendung von Formel (9) aus der positiven Temperaturdifferenz zwischen einem vorgegebenen Bezugswert und der operativen Raumtemperatur sowie der Wirkungsdauer berechnen [17].

$$Gh_{\text{Bezugswert}} = \sum_{i=1}^{h/a} (t_0 - \text{Bezugswert})|_{\text{pos.}} \cdot 1 h \quad (9)$$

Legende

$Gh_{\text{Bezugswert}}$	Übertemperaturgradstunden bezogen auf eine vorgegebene operative Raumtemperatur [Kh/a]
t_0	operative Raumtemperatur [°C]

Der Bezugswert der operativen Raumtemperatur ist abhängig von der Sommerklimaregion entsprechend DIN 4108-2 [12]. Der Aufstellort des Ziegel-Kubus – Wöllstein – liegt in der Klimaregion C mit einem Grenzwert der operativen Raumtemperatur von 27 °C. Dieser ist in der nachstehenden Abbildung 25 markiert. Außerdem ist in dem Diagramm der sommerliche Verlauf der ermittelten operativen Raumtemperatur und der gemessenen Außenlufttemperatur zu finden. Es ist ersichtlich, dass die operative Raumtemperatur indirekt beeinflusst wird durch das Außenklima. Nimmt über mehrere aufeinanderfolgende Tage die Außenlufttemperatur zu, steigt zeitlich versetzt auch die operative Raumtemperatur. Der Grenzwert für eine sommerliche Überhitzung von 27 °C wird insgesamt an 19 Tagen zeitweise überschritten. Während der aufgezeigten Sommerperiode des Jahres 2017 sind insgesamt 247 Kh (Übertemperaturgradstunden) zu verzeichnen. Zulässig sind maximal 1200 Kh/a entsprechend DIN 4108-2 [12].

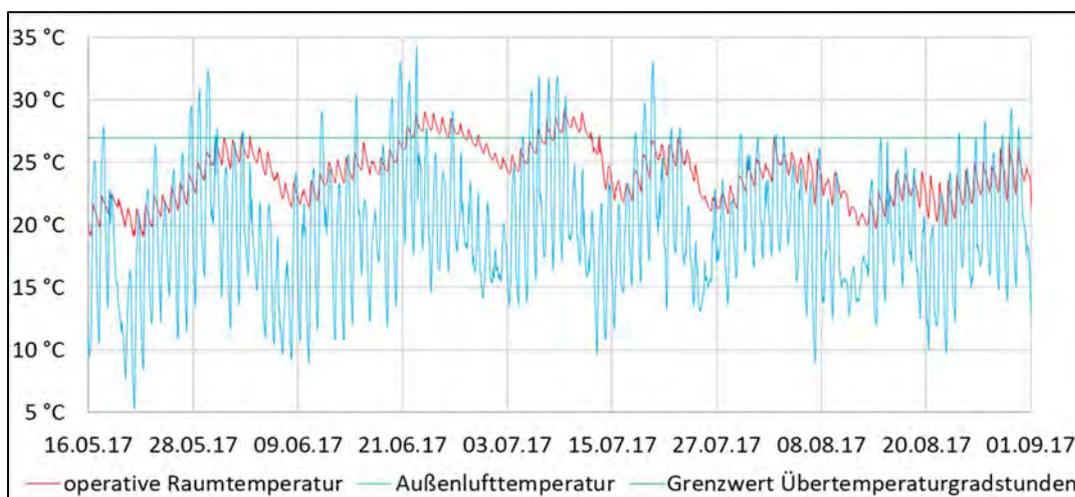


Abbildung 25: Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Ziegel-Kubus

Um Aussagen zur thermischen Behaglichkeit in den Kuben treffen zu können, wurde für ausgewählte Zeiträume auch der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD ausgewertet. Um die Leserverständlichkeit zu stärken, werden nachfolgend diese Größe sowie das vorausgesagte mittlere Votum PMV vorgestellt.

Die Grundlage für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit eines Raumklimas bildet die DIN EN ISO 7730 [16]. Als Kenngrößen können u.a. das vorausgesagte mittlere Votum PMV (im Englischen: predicted mean vote) und der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD (im Englischen: predicted percentage of dissatisfied) herangezogen werden. Beide Größen sind auf Versuchsreihen aufbauende empirische Größen basierend auf den Ergebnissen der Arbeit von P. O. Fanger [18] und beschreiben die zu erwartende Raumklimabewertung durch eine imaginäre Personengruppe. [8]

Das PMV kann entsprechend einer 7-stufigen Bewertungsskala die Werte -3 (kalt), -2 (kühl), -1 (etwas kühl), 0 (neutral), +1 (etwas warm), +2 (warm) und +3 (zu warm) annehmen. Man spricht auch vom PMV-Index. Dieser ist zum einen abhängig vom Energieumsatz und der Bekleidung der angesetzten Personengruppe. Zum anderen wird er beeinflusst von den Raumklimaparametern Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte. Der Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung des PMV-Index kann der DIN EN ISO 7730 [16] entnommen werden. Auf Grund der Komplexität ist eine computergestützte Berechnung sinnvoll. [8]

Aus dem PMV kann man rechnerisch den vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen PPD ermitteln. Der PPD kann Werte zwischen 0 % und 100 % annehmen. Ein niedriger PPD-Wert ist gleichbedeutend mit einer zu erwartenden hohen Nutzerzufriedenheit bzgl. des thermischen Raumklimas. Ein hoher PPD-Wert bedeutet, dass für eine große Personenzahl ein zu warmes oder zu kaltes Raumklima erwartet wird. Ein PPD-Wert von 0 % entspricht also einer größtmöglichen zu erwartenden Nutzerzufriedenheit, währenddessen 100 % gleichbedeutend mit einer völligen Nutzerunzufriedenheit sind. [8]

Die nachfolgende Abbildung 26 zeigt die Verläufe der gemessenen Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie des berechneten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD an mehreren aufeinanderfolgenden Sommertagen mit teilweise steigender maximaler Außenlufttemperatur.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Außenlufttemperatur auch die Raumlufttemperatur zunimmt. Allerdings sind die täglichen Höchsttemperaturen der Raumluft mittags zu verzeichnen, währenddessen der Maximalwert der Außenlufttemperatur nachmittags auftritt. Die Ursache für dieses Verhalten ist die Ausrichtung der Fenstertür des Ziegel-Kubus. Diese ist nach Süd-Osten orientiert, wodurch täglich nur am Vormittag die Sonne direkt in den Raum hereinscheinen kann.

Der PPD ist rechnerisch u.a. direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur. Steigt bzw. fällt diese, ändert sich auch der PPD. Zum Beginn des dargestellten Sommerzeitraums am 18.06.17 um 0 Uhr betrug der PPD 7 %. Es wurde also von einer imaginären Personengruppe erwartet, dass zu diesem Zeitpunkt nur 7 % der Nutzer unzufrieden mit dem vorherrschenden Raumklima im Ziegel-Kubus sind wegen einer geringfügig zu hohen Raumlufttemperatur. Während der fünf folgenden Tage mit teilweise steigender maximaler Außenlufttemperatur verhielt sich der PPD sehr ähnlich im Vergleich zur Raumlufttemperatur. Bis zur Mittagszeit (ca. 13 Uhr) stieg der PPD auf das Tagesmaximum an. Danach fiel er wieder bis zum nächsten Morgen (ca. 6 Uhr) ab. Insgesamt war, wie auch für die Raumlufttemperatur, ein aufschaukeln des PPD und somit eine Abnahme der zu erwartenden thermischen Behaglichkeit zu verzeichnen. Von 13 % als Maximalwert am ersten Tag (18.06.17), über 20 % (19.06.17), 29 % (20.06.17) und 43 % (21.06.17) stieg der PPD auf 60 % am fünften Tag (22.06.17). Die großen Schwankungen der PPD-Linie am 21.06.17 sind im Übrigen zurückzuführen auf eine kurzfristige Veränderung der mechanischen Belüftung. Während des dargestellten Messzeitraums wurde die Lüftung testweise nur am besagten Tag zeitweise eingeschaltet.

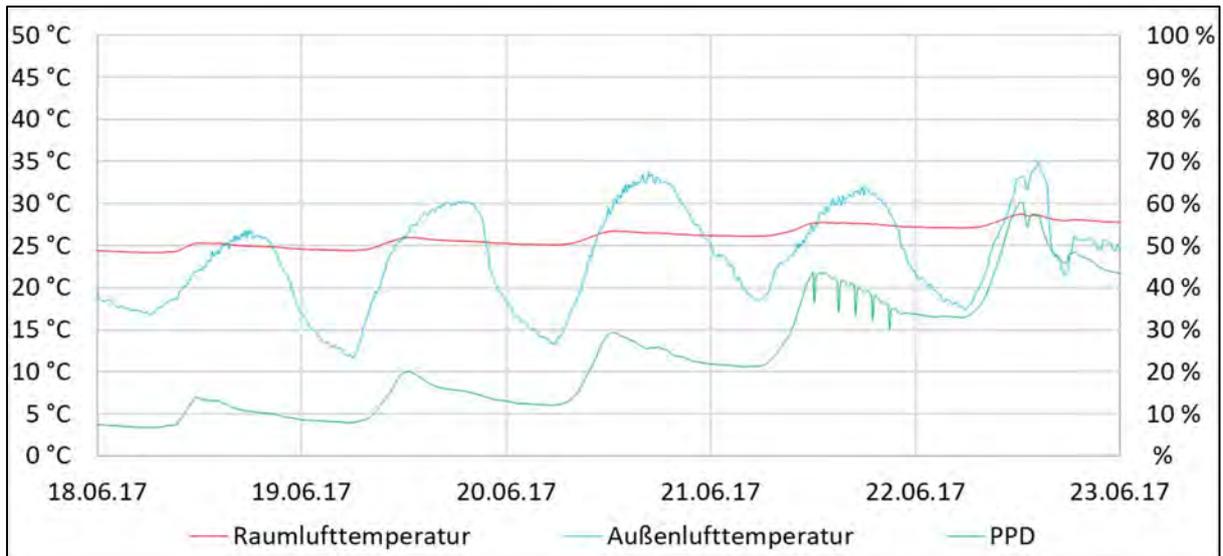


Abbildung 26: Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Ziegel-Kubus

Die im Voraus beschriebene Feststellung bzgl. der sommerlichen Aufheizung der Raumlufttemperatur bis zur Mittagszeit auf Grund von solaren Einträgen durch die Fenstertür lässt sich auch mit Hilfe der folgenden Abbildung 27 stützen. Dieses Diagramm spiegelt Temperaturverläufe durch die mit Sensoren versehene Nord-Ost-Außenwand am 20. und 21.06.17 wieder. In der Zeit von 0 Uhr bis 8 Uhr am 1. Tag betrug die Temperatur im Innenputz im Mittel 24,6 °C. Bis 14 Uhr stieg diese Temperatur begünstigt durch Sonneneinstrahlung um 1 K auf 25,6 °C. Im Zeitraum bis 8 Uhr des Folgetages stieg die raumseitige Temperatur des Wandquerschnitts noch minimal weiter auf 25,8 °C. Am 20.06.17 war im Innenputz ein maximaler Temperaturanstieg um 1,0 K (zwischen 7 Uhr und 14 Uhr) zu verzeichnen, währenddessen die Raumlufttemperatur um 1,6 K (zwischen 6 Uhr und 12 Uhr) gestiegen ist. Der Temperaturanstieg der Raumluft wurde durch die Wärmespeicherfähigkeit der Außenwandkonstruktion begrenzt.

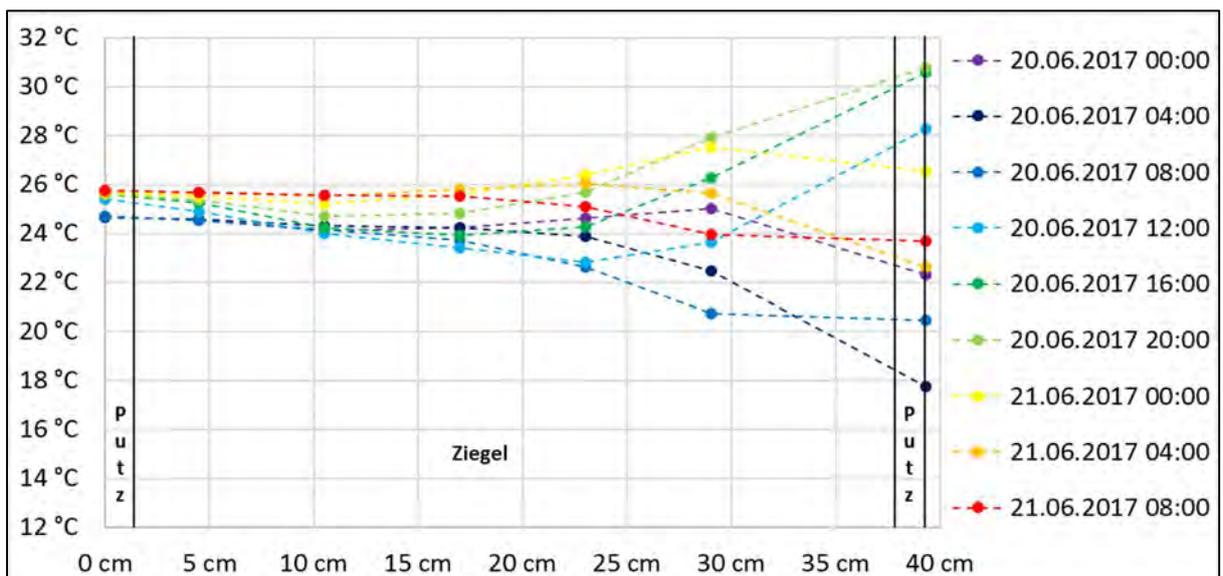


Abbildung 27: Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus

In der nachstehenden Abbildung 28 ist ein Messzeitraum zu sehen, währenddessen die Außenlufttemperatur am Kuben-Standort in Wöllstein über mehrere Tage stark abgenommen hat. Sie ist innerhalb von 60 h von 15,4 °C (23.11.17 um 15 Uhr) um 13,3 K auf 2,1 °C gesunken (26.11.17 um 3 Uhr). Währenddessen betrug die Raumlufttemperatur auf Grund des Betriebes der Heizungsanlage im Mittel 19,2 °C. Das Schwanken des Temperaturverlaufs um diesen Mittelwert resultiert aus der thermischen Trägheit des eingesetzten Rippenrohrheizkörpers. Wird die vorgegebene Soll-Raumlufttemperatur unterschritten, schaltet sich der Heizkörper an und der Ziegel-Kubus wird aufgeheizt. Wird die vorgegebene Raumlufttemperatur erreicht, wird die Heizung automatisiert wieder abgestellt. Der Rippenrohrheizkörper gibt jedoch im Rahmen seiner Auskühlung weiterhin Wärme an den Raum ab, wodurch dieser zeitweise weiter aufgeheizt wird.

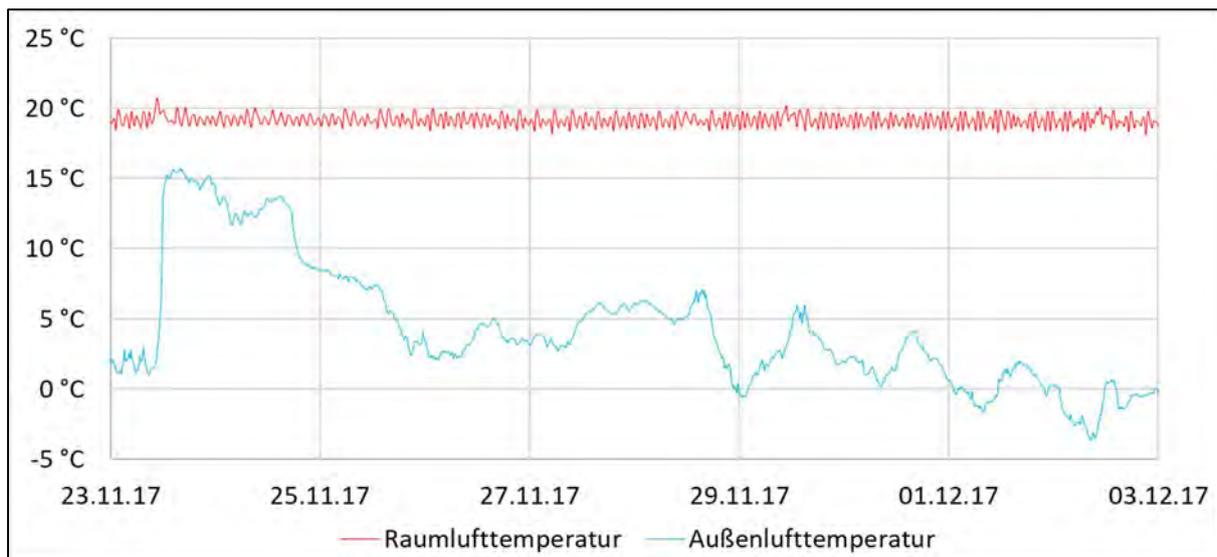


Abbildung 28: Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

Betrachtet man mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 29 den Temperaturverlauf im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus während der Zeit vom 23.11.17 um 16 Uhr bis zum 26.11.17 um 0 Uhr ist zu erkennen, dass im Innenputz nur geringe Temperaturänderungen begünstigt durch den Betrieb der Heizung zu verzeichnen waren. Auf Grund des Temperaturabfalls der Außenluft um 13,0 K sank die Außenputztemperatur ebenfalls deutlich um 9,3 K. Unter anderem wegen der Wärmespeicherfähigkeit des untersuchten Wandquerschnitts war die Temperatursenkung im Außenputz geringer im Vergleich zur Außenluft. Außerdem ist mit Hilfe des Diagrammes zu erkennen, dass der Temperaturabfall von der Raum- bzw. Innenseite ausgehend im Bereich der ersten 4,5 cm flacher verläuft im Vergleich zum Mittelteil des Wandquerschnitts. Das lässt sich damit erklären, dass der eingesetzte Ziegel-Querschnitt (siehe Abbildung 18) in den Randbereichen jeweils einen großen Scherbenanteil mit erhöhter wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ aufweist, währenddessen im Mittelteil ein überwiegender Dämmanteil mit niedrigerer wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ zu finden ist.

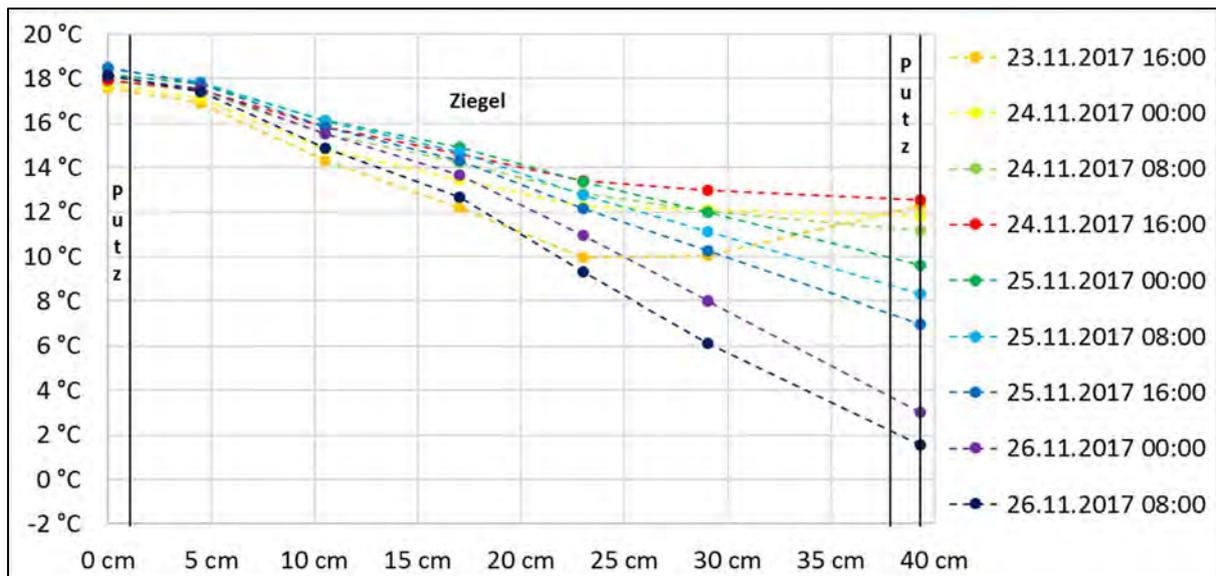


Abbildung 29: Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus

Um das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Ziegel-Kubus besser verstehen zu können, wurde wie bereits zum Anfang dieses Kapitels beschrieben während des Zeitraums vom 11.12.17 bis zum Jahreswechsel ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Entsprechend der folgenden Abbildung 30, mit dargestellter gemessener Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie berechnetem vorausgesagtem Prozentsatz an Unzufriedenen PPD, wurde der Kubus zunächst bei dauerhaft ausgeschalteter Lüftungsanlage bis zu einer Raumlufttemperatur von 30,0 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.17 konstant gehalten. Darauf folgend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Während dieses Zeitabschnittes war die Außenlufttemperatur im Bereich von 0,0 °C bis 13,7 °C bei einer mittleren Temperatur von 5,1 °C und es war nur eine geringe solare Einstrahlung zu verzeichnen. Ab dem 01.01.18 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C.

Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD dient der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas und ist rechnerisch u.a. direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur. Steigt bzw. fällt diese, ändert sich auch der PPD. Gemäß der nachstehenden Abbildung 30 betrug der PPD direkt vor der Aufheizphase am 10.12.17 im Mittel 29 %. Es wurde also von einer imaginären Personengruppe erwartet, dass zu diesem Zeitpunkt 29 % der Nutzer unzufrieden mit dem vorherrschenden Raumklima im Ziegel-Kubus sind. Während der Aufheizphase auf eine Soll-Raumlufttemperatur von 30 °C stieg der PPD deutlich an und pendelte sich während der folgenden Periode mit relativ konstanter Raumlufttemperatur um 53 % ein. Wegen der gestiegenen Raumlufttemperatur auf 30 °C hat sich somit die thermische Behaglichkeit deutlich verschlechtert. Die kurzzeitigen großen Schwankungen der PPD-Linie sind im Übrigen zurückzuführen auf die leicht schwankende Raumlufttemperatur auf Grund der thermischen Trägheit des im Kubus eingesetzten Rippenrohrheizkörpers. Während der Abkühlphase fiel der PPD zunächst über 24 h bis auf 5 % ab, was gleichbedeutend war mit einer wesentlichen Verbesserung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas. Mit Unterschreitung einer Raumlufttemperatur von 23,4 °C stieg der PPD während der weiteren Abkühlung des Raumes wieder deutlich an wegen eines unbehaglicher gewordenen zu kalten Raumklimas und schwang sich um 78 % ein.

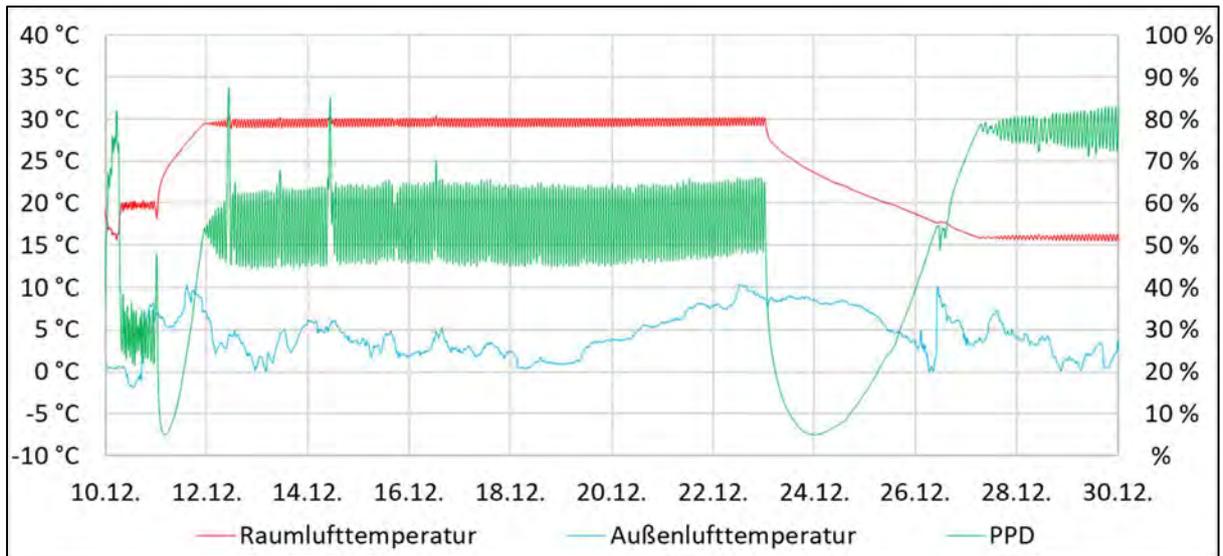


Abbildung 30: Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Ziegel-Kubus

Mit Hilfe der nachstehenden Abbildungen 31 und 32 ist ersichtlich, dass sich die künstliche Aufheizphase über einen Zeitraum von ca. 24 h erstreckt hat und dass das Abkühlen über ca. 103 h ablief. Sowohl während der Aufheiz- als auch während der Abkühlperiode veränderte sich die Raumlufttemperatur im Ziegel-Kubus anfangs schnell. Mit voranschreitender Zeit verlangsamte sich die Aufheizung bzw. Abkühlung vermehrt. Mathematisch gesehen kann man den Kurvenverlauf der Aufheizphase mit einer e-Funktion vergleichen. Die Abkühlperiode ähnelt ebenfalls einem solchen Funktionsgraph.

Vor dem Aufheizen, zwischen der Aufheiz- und Abkühlphase, als auch nach dem Abkühlen ist jeweils eine schwingende Raumlufttemperaturkurve zu sehen. Wie bereits im Voraus erläutert resultiert dieses Verhalten aus der thermischen Trägheit des eingesetzten Rippenrohrheizkörpers.

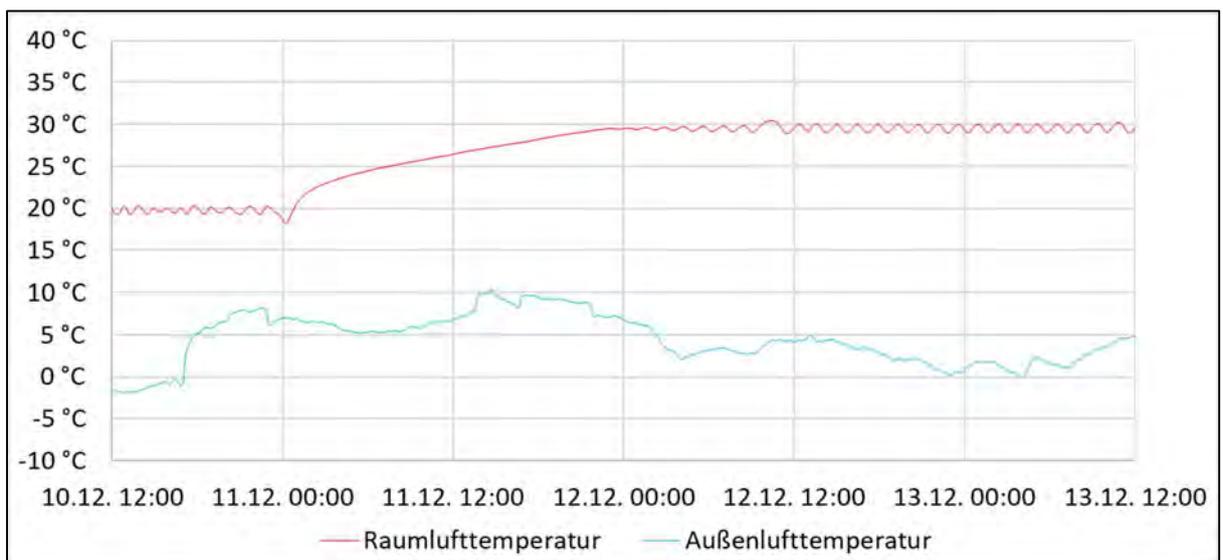


Abbildung 31: Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus



Abbildung 32: Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

Zur Auswertung der thermischen Vorgänge im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus während der künstlichen Aufheiz- bzw. Abkühlperiode können die nachfolgenden Abbildungen 33 und 34 verwendet werden.

Die Abbildung 33 zeigt den kompletten Aufheizvorgang über 24 h. Ähnlich wie die Raumluft nimmt die Temperatur im Innenputz während der ersten Stunden schnell zu. Die Aufheizung des Wandquerschnitts verlangsamte sich jedoch mit voranschreitender Zeit. Wie bereits bei der Auswertung der natürlichen winterlichen Abkühlung festgestellt werden konnte, verläuft der Temperaturanstieg von der Raum- bzw. Innenseite betrachtet im Bereich der ersten 4,5 cm flacher verglichen zum Zentrum des Querschnitts. Zusätzlich ist in diesem Diagramm zu sehen, dass auch die Temperaturerhöhung im Bereich der Außenseite des Wandquerschnitts flacher erfolgt als im Mittelteil des Ziegel-Steins. Dieses Verhalten lässt sich damit erklären, dass der eingesetzte Ziegel-Querschnitt (siehe Abbildung 18) im Randbereich jeweils einen großen Scherbenanteil mit erhöhter wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ aufweist, währenddessen im Mittelteil ein überwiegender Dämmanteil mit niedrigerer wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ zu finden ist.

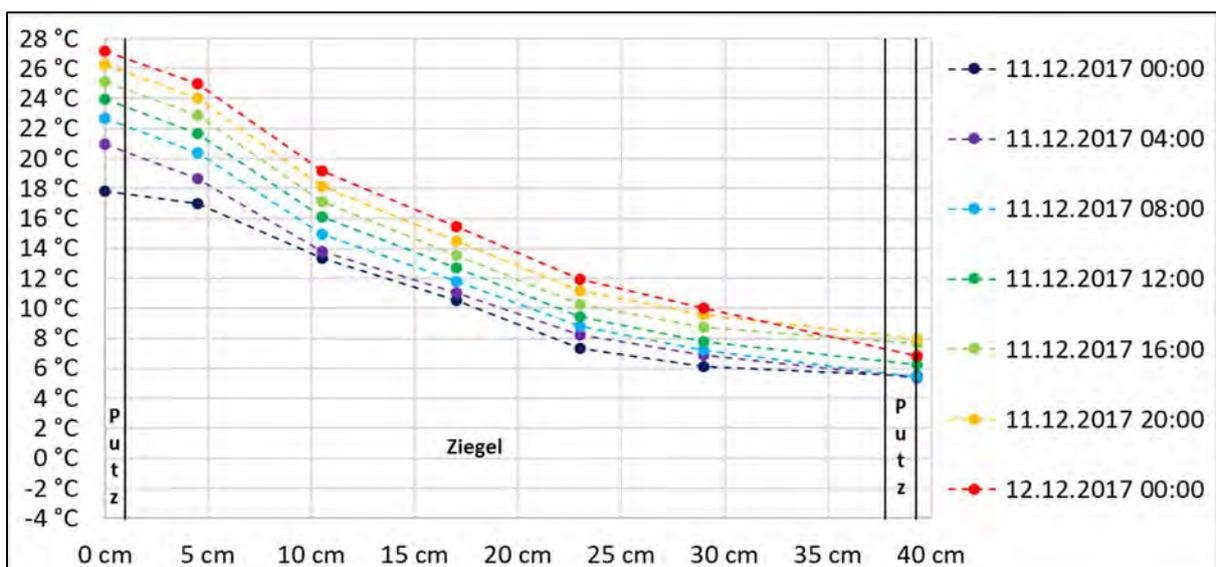


Abbildung 33: Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus

Während der Abkühlphase, die in der folgenden Abbildung 34 für die Nord-Ost-Außenwand grafisch aufbereitet ist, kam es ebenfalls zunächst zu einem schnellen Temperaturwechsel im Innenbereich des Wandquerschnitts, der sich mit voranschreitender Zeit verlangsamte. Die Temperatur nahm ab, wobei die Absenkung von der Raum- bzw. Innenseite ausgehend im Bereich der ersten 4,5 cm wieder flacher im Vergleich zum Mittelteil des Querschnitts erfolgt.

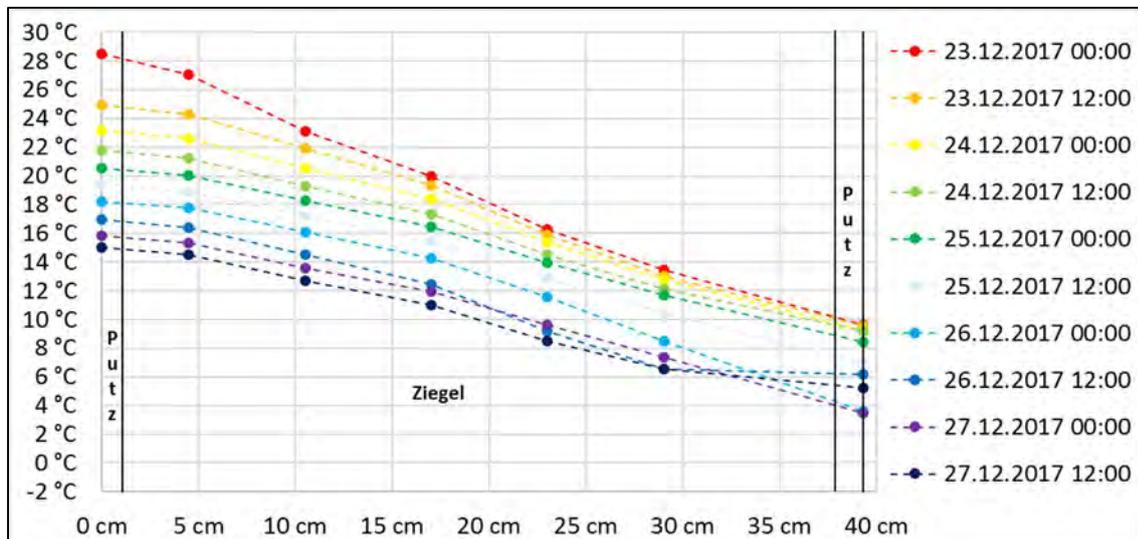


Abbildung 34: Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Nachtabsenkung der Heizung auf eine Soll-Raumlufttemperatur von 16 °C im Zeitraum zwischen 23 Uhr und 6 Uhr wurden die Messdaten aus einer Woche in der Übergangszeit zwischen Sommer und Winter (25.10.17 bis 01.11.17) und zwei Wochen im Winter (28.01.18 bis 11.02.18) herangezogen.

Entsprechend der nachstehenden Abbildung 35 sank die Raumlufttemperatur nur in der Nacht vom 30.10.17 auf den 31.10.17 auf 16,0 °C ab, was den kurzzeitigen nächtlichen Betrieb der Heizung zur Folge hatte. In den übrigen Nächten war ein Abfall im Bereich von 18,0 °C bis 16,9 °C zu verzeichnen. Die Absenkung war besonders groß, wenn die Außenlufttemperatur nachts stark abfiel.

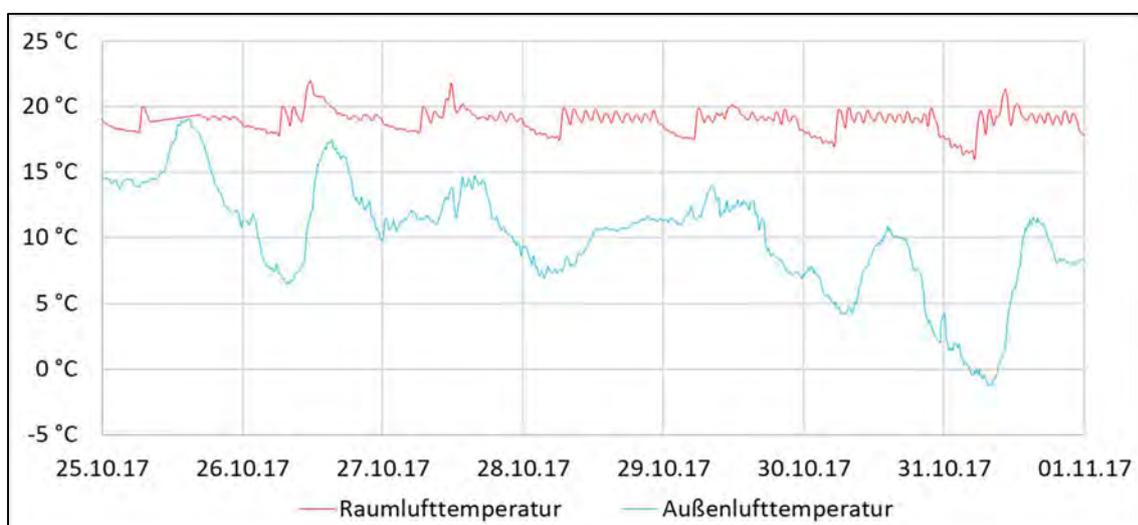


Abbildung 35: Nachtabsenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

Mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 36 ist während der betrachteten beiden Winterwochen mit Nachtabsenkung der Heizung ein Aufschaukeln des nächtlichen Raumlufttemperaturabfalls zu sehen. Während der ersten drei Nächste ist die Raumlufttemperatur begünstigt durch ein für die Jahreszeit relativ mildes Außenklima nicht bis auf 16 °C gesunken. Mit Beginn des Abfalls der Außenlufttemperatur ab 31.01.18 sank auch die nächtliche Mindest-Raumlufttemperatur während der folgenden Tage. Ab der achten Nacht musste die Heizung kurzzeitig zum Einsatz kommen, um die Soll-Raumlufttemperatur von 16 °C zu gewährleisten.

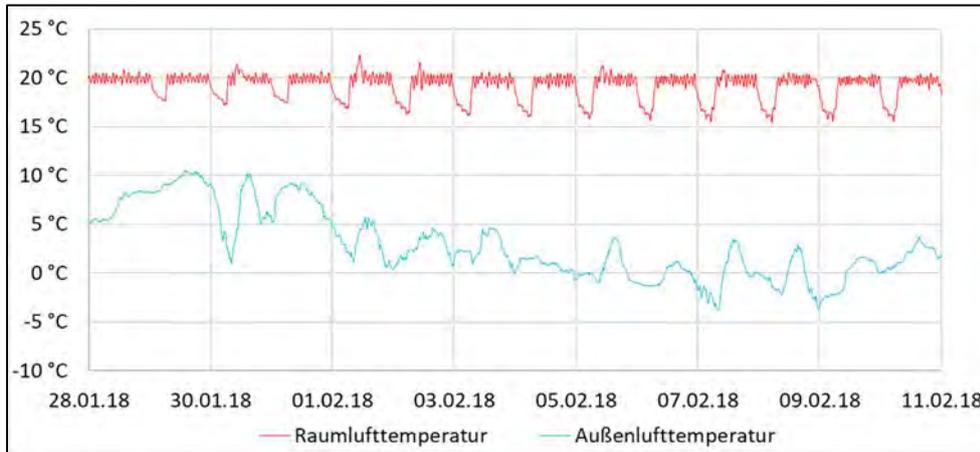


Abbildung 36: Nachtabsenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

Die folgenden Abbildungen 37 und 38 zeigen die zu den vorangegangenen Diagrammen zugehörigen Temperaturen im Wandquerschnitt der Nord-Ost-Außenwand bei Nachtabsenkung der Heizung während eines Tages in der Übergangszeit von Sommer zu Winter (29.10.17 um 12 Uhr bis 30.10.17 um 12 Uhr) und über elf Tage während der Winterzeit (29.01.18 um 6 Uhr bis 09.02.18 um 6 Uhr).

Im Verlauf der 24 Stunden vom 29.10.17 um 12 Uhr ausgehend ist die Außenlufttemperatur von 12,2 °C um maximal 8,0 K und die Raumlufttemperatur von 20,1 °C um höchstens 3,2 K gesunken (siehe Abbildung 35). Gemäß der nachstehenden Abbildung 37 ist die Temperatur im Innenputz der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus von 18,1 °C um lediglich 1,4 K gefallen, was für einen positiven Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit des Wandaufbaus spricht.

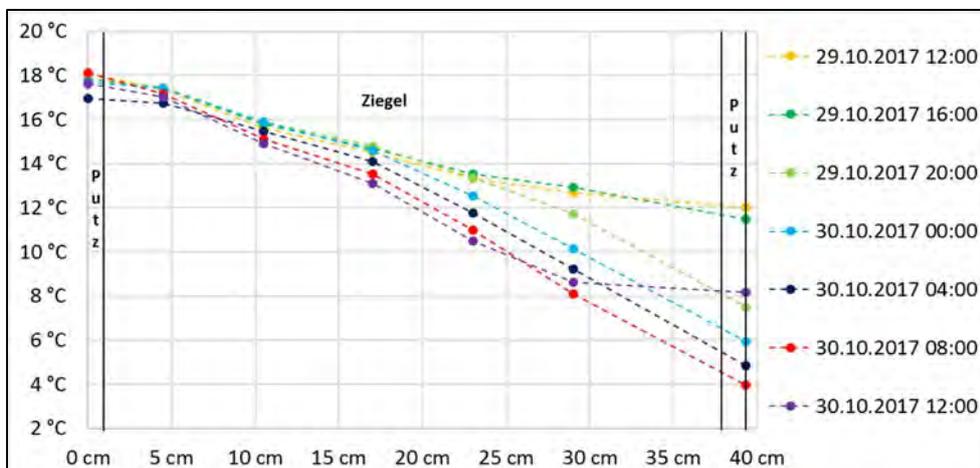


Abbildung 37: Nachtabsenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus

Im in Abbildung 38 dargestellten Winterzeitraum ist zu erkennen, dass die Temperatur im Innenputz morgens in der Regel alle 24 Stunden minimal gefallen ist. Der Unterschied zwischen dem wärmsten (17,3 °C am 29.01.18 6 Uhr) und dem kältesten Morgen (15,8 °C am 09.02.18 6 Uhr) betrug 1,5 K. Mit dem über mehrere Tage kälter gewordenen Außenklima, hat sich der Wandquerschnitt langsam ausgekühlt.

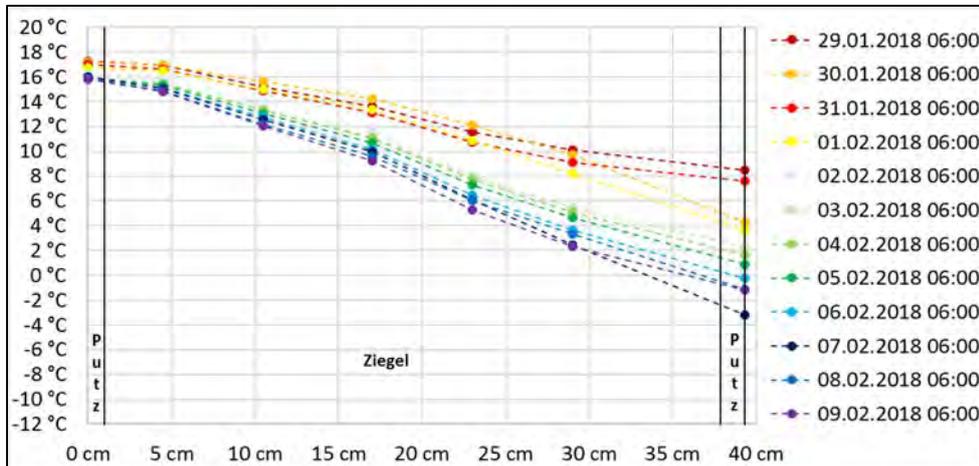


Abbildung 38: Nachtabenkung Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus

Insgesamt verläuft der Temperaturabfall in den beiden Abbildungen 37 und 38 über den gesamten Wandquerschnitt betrachtet im Bereich der ersten raumseitigen 4,5 cm auf Grund eines großen Scherbenanteils mit erhöhter wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ flacher im Vergleich zur Mitte des Ziegel-Steins mit überwiegendem Dämmanteil mit niedrigerer wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ .

Die nachstehende Abbildung 39 bildet den Energieverbrauch und die Außenlufttemperatur des Ziegel-Kubus im Zeitraum vom 20.09.17 bis zum 28.02.18 ab. Gemessen wurden während dieser Zeit alle internen Wärmeeinträge in den Kubus durch technische Geräte. Dazu zählte der Stromverbrauch des Rippenrohrheizkörpers, des Laptops, der Messtechnik, der Regelungsbox und der künstlichen Beleuchtung. Der Anstieg der orangenen Kurve spiegelt das Maß des Energieverbrauchs durch die internen Lasten wieder. Je steiler der Kurvenanstieg, umso höher war der Stromverbrauch während dieses Zeitraums.

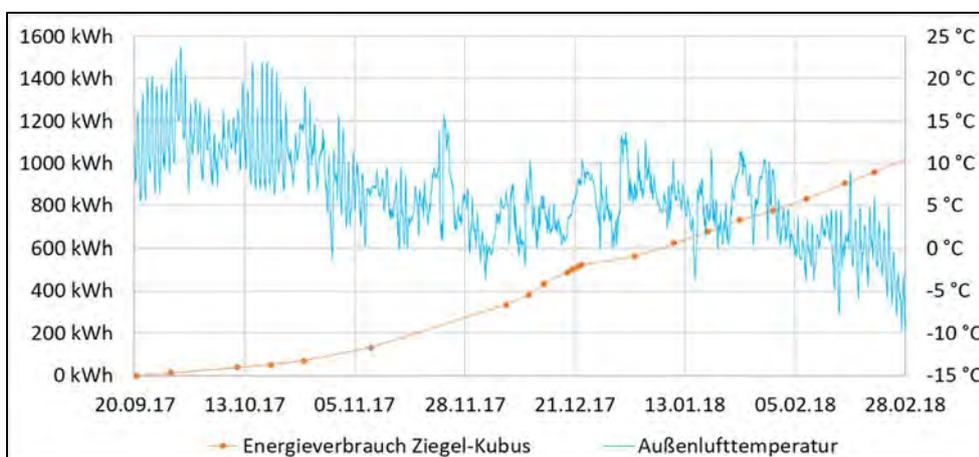


Abbildung 39: Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

In dem vorangestellten Diagramm ist zu sehen, dass bis zum Ende Oktober der Anstieg der Energieverbrauchskurve flacher im Vergleich zur Folgezeit verläuft, weil die Heizung während der Übergangszeit vom Sommer zum Winter nur temporär im Einsatz war um das Erreichen der vorgegebenen Soll-Raumlufttemperatur zu gewährleisten. Mit Ausnahme der künstlichen Aufheizung und Abkühlung des Kubus im Dezember verläuft der Anstieg ab Ende Oktober relativ konstant auf Grund der dauerhaften künstlichen Beheizung des Ziegel-Kubus. Während der künstlichen Aufheizphase im Zeitraum vom 11.12.17 bis einschließlich 22.12.17 verläuft die Kurve wie erwartet steiler durch den energieintensiveren Betrieb der Heizung zur Sicherstellung einer Raumlufttemperatur von 30 °C. Mit Beginn der künstlichen Abkühlung des Kubus auf 16 °C ab 23.12.17 flacht der Kurvenanstieg bis zum Jahreswechsel auch im Vergleich zur Folgezeit deutlich sichtbar wieder ab.

5.2.2 Porenbeton-Kubus

Die nachfolgende Abbildung 40 zeigt die gemessene Raumlufttemperatur im Porenbeton-Kubus und die ermittelte Außenlufttemperatur am Standort Emstal im Zeitraum von April 2017 bis einschließlich Februar 2018. Während dieses Zeitraums schwankte die Außenlufttemperatur im Bereich von -15,4 °C bis 33,2 °C und die Raumlufttemperatur zwischen 11,3 °C und 30,5 °C.

Seit dem Beginn der Messungen bis in den Mai 2017 hinein wurde mit Hilfe der installierten Heizung eine mittlere Raumlufttemperatur von 19,0 °C sichergestellt. Im Zeitraum vom 17.05.17 bis zum 18.10.17 war die Heizung aufgrund günstiger Außentemperaturen und eines Heizungsdefektes vom 07.08.17 bis 18.10.17 kaum in Betrieb. Bedingt durch das Außenklima kam es zum zeitweiligen Aufheizen und Abkühlen der Raumluft. Danach war der Einsatz wieder erforderlich, um eine anvisierte Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C zu erreichen. Zeitweise wurde zwischen 23 Uhr und 6 Uhr eine Nachtabsenkung der Raumlufttemperatur auf 16,0 °C umgesetzt.

Vom 11.12.17 bis zum Jahreswechsel wurde ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Bei ausgeschalteter Lüftungsanlage wurde der Kubus zunächst bis zu einer Soll-Raumlufttemperatur von 30,0 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.17 konstant gehalten. Darauffolgend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Ab dem 01.01.18 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C und zeitweiliger Nachtabsenkung (zwischen 23 Uhr und 6 Uhr) auf 16,0 °C.

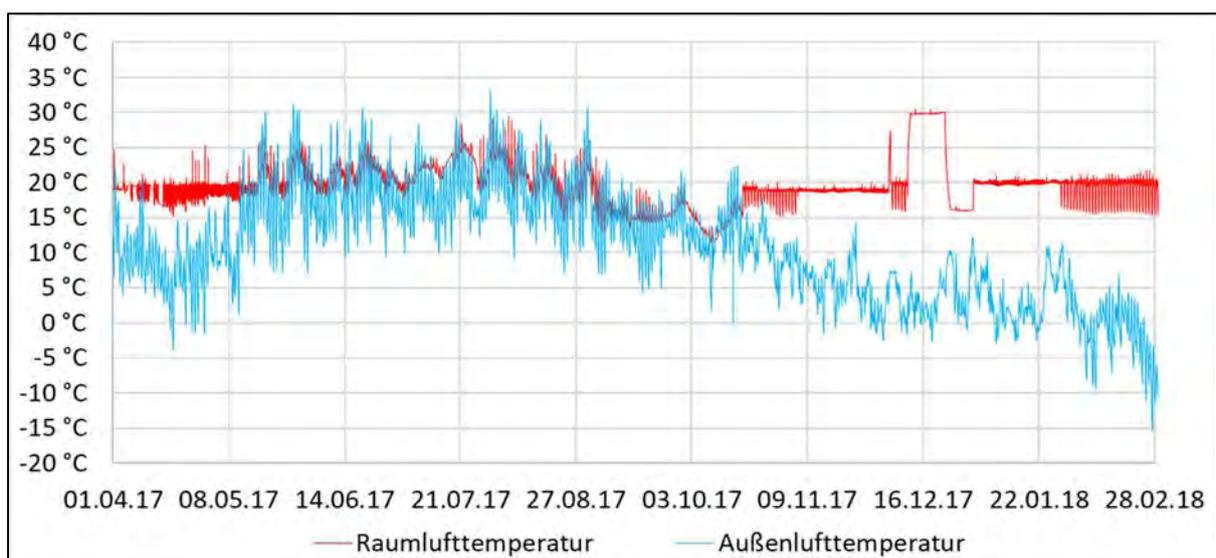


Abbildung 40: Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

Die folgenden Abbildungen 41 und 42 weisen das sommerliche Aufheizverhalten des Porenbeton-Kubus in Abhängigkeit vom Außenklima in Emstal aus.

Der Bezugswert der operativen Raumtemperatur ist abhängig von der Sommerklimaregion entsprechend DIN 4108-2 [12] (detaillierte Infos siehe Kapitel 3). Der Aufstellort des Kubus – Emstal – liegt in der Klimaregion B mit einem Grenzwert der operativen Raumtemperatur von 26 °C. Dieser ist in der nachstehenden Abbildung 41 markiert. Außerdem ist in dem Diagramm der sommerliche Verlauf der ermittelten operativen Raumtemperatur und der gemessenen Außenlufttemperatur zu finden. Es ist ersichtlich, dass die operative Raumtemperatur indirekt beeinflusst wird durch das Außenklima. Nimmt über mehrere aufeinanderfolgende Tage die Außenlufttemperatur zu, steigt zeitlich versetzt auch die operative Raumtemperatur. Der Grenzwert für eine sommerliche Überhitzung von 26 °C wird insgesamt an 15 Tagen zeitweise überschritten. Während der aufgezeigten Sommerperiode des Jahres 2017 sind insgesamt 29 Kh (Übertemperaturgradstunden) zu verzeichnen. Zulässig sind maximal 1200 Kh/a entsprechend DIN 4108-2 [12].

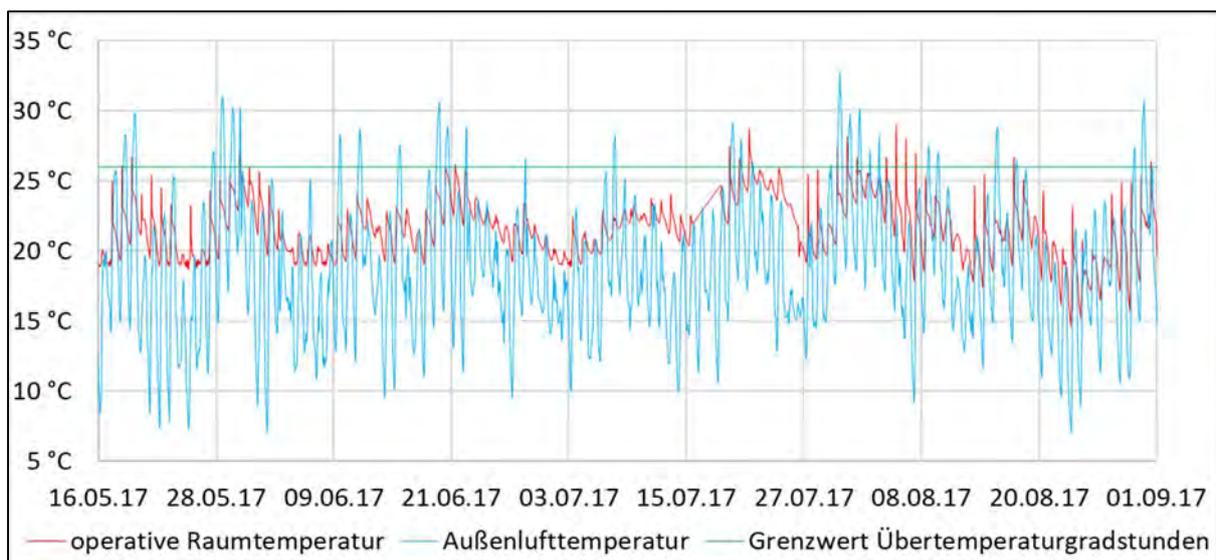


Abbildung 41: Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Porenbeton-Kubus

Die nachfolgende Abbildung 42 zeigt die Verläufe der gemessenen Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie des berechneten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD (im Englischen: predicted percentage of dissatisfied / detaillierte Infos siehe Kapitel 5.2.1) an mehreren aufeinanderfolgenden Sommertagen mit teilweise steigender maximaler Außenlufttemperatur.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Außenlufttemperatur auch die Raumlufttemperatur zunimmt. Allerdings sind die täglichen Höchsttemperaturen der Raumluft vormittags zu verzeichnen, währenddessen der Maximalwert der Außenlufttemperatur nachmittags auftritt. Die Ursache für dieses Verhalten ist die Ausrichtung der Fenstertür des Porenbeton-Kubus. Diese ist nach Süd-Osten orientiert, wodurch täglich nur am Vormittag die Sonne direkt in den Raum hereinscheinen kann.

Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD dient der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas und ist rechnerisch u.a. direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur. Steigt bzw. fällt diese, ändert sich auch der PPD. Zum Beginn des dargestellten Sommerzeitraums am 18.06.17 um 0 Uhr betrug der PPD 20 %. Es wurde also von einer imaginären Personengruppe erwartet, dass zu diesem Zeitpunkt 20 % der Nutzer unzufrieden mit dem vorherrschenden Raumklima im Porenbeton-Kubus sind wegen einer zu niedrigen Raumlufttemperatur. Bis zum 19.06.17 um ca. 9 Uhr verhielten sich die Raumlufttemperatur und der

PPD gegenläufig. Ist die Raumlufttemperatur gesunken, ist der PPD gestiegen. Hat sich die Raumlufttemperatur wieder erhöht, ist der PPD gefallen. Die Ursache lag darin, dass die Raumlufttemperatur mit einem Mindestwert von 18,4 °C während dieses Zeitraums teilweise relativ gering war. Ab dem 19.06.17 um ca. 9 Uhr verhielt sich der PPD ähnlich der Raumlufttemperatur. Bis zur Vormittagszeit (ca. 10 Uhr) stiegen beide Größen auf das Tagesmaximum an. Mit zunehmender Raumlufttemperatur nahm also der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen zu. Danach fielen die beiden Kurven wieder jeweils bis zum nächsten Morgen (ca. 6 Uhr) ab und die zu erwartende thermische Behaglichkeit des Raumklimas stieg. Insgesamt betrug die PPD-Maximalwerte 36 % (18.06.17), 17 % (19.06.17), 21 % (20.06.17), 34 % (21.06.17) bzw. 26 % (22.06.17). Die kurzzeitigen großen Schwankungen der PPD-Linie sind im Übrigen zurückzuführen auf die mechanische Belüftung des Kubus. Zur Sicherstellung des vorgegebenen Luftwechsels waren der Ventilator sowie die Lüftungsklappen 15 min pro Stunde im Betrieb. Während dieser Betriebszeiten kam es zur schnellen Änderung der thermischen Behaglichkeit auf Grund der Luftströmung im Raum vom Zuluft- zum Abluftrohr.

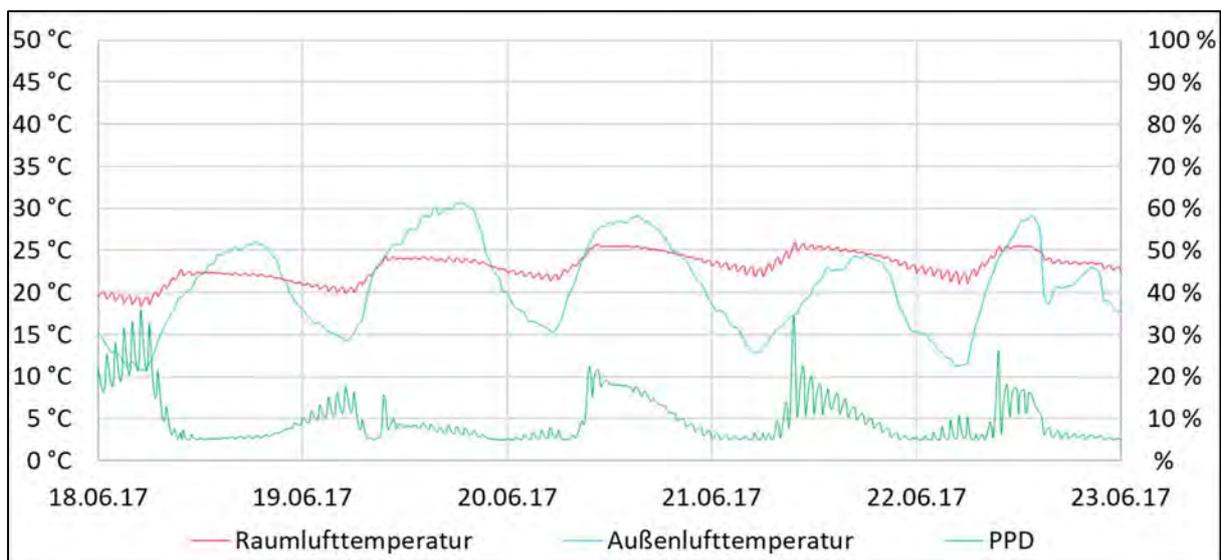


Abbildung 42: Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Porenbeton-Kubus

Die im Voraus beschriebene Feststellung bzgl. der sommerlichen Aufheizung der Raumlufttemperatur bis zur Mittagszeit auf Grund von solaren Einträgen durch die Fenstertür lässt sich auch mit Hilfe der folgenden Abbildung 43 stützen. Dieses Diagramm spiegelt Temperaturverläufe durch die mit Sensoren versehene Nord-Ost-Außenwand am 19. und 20.06.17 wieder. In der Zeit von 0 Uhr bis 4 Uhr am 1. Tag betrug die Temperatur im Innenputz mit Mittel 20,7 °C. Bis 12 Uhr stieg diese Temperatur begünstigt durch Sonneneinstrahlung um 2,3 K auf 23,0 °C. Im Zeitraum bis 4 Uhr des Folgetages sank die raumseitige Temperatur im Wandquerschnitt wieder bis auf 22,1 °C. Am 19.06.17 war im Innenputz ein maximaler Temperaturanstieg um 2,5 K (zwischen 4 Uhr und 12 Uhr) zu verzeichnen, währenddessen die Raumlufttemperatur um 4,3 K (zwischen 6 Uhr und 14 Uhr) gestiegen ist. Der Temperaturanstieg der Raumluft wurde durch die relativ geringe Wärmespeicherfähigkeit der Außenwandkonstruktion nur geringfügig begrenzt.

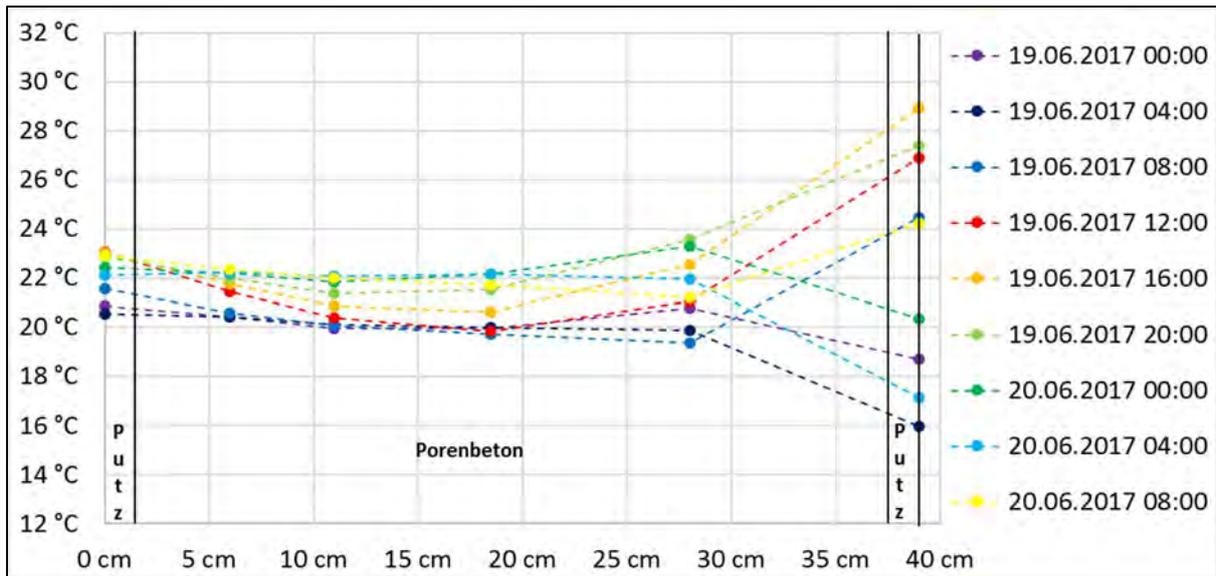


Abbildung 43: Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus

In der nachstehenden Abbildung 44 ist ein Messzeitraum zu sehen, währenddessen die Außenlufttemperatur am Kuben-Standort in Emstal über mehrere Tage stark abgenommen hat. Sie ist innerhalb von 43 h von 14,1 °C (24.11.17 um 12 Uhr) um 13,8 K auf 0,3 °C gesunken (26.11.17 um 7 Uhr). Währenddessen betrug die Raumlufttemperatur auf Grund des Betriebes der Heizungsanlage im Mittel 19,0 °C. Das Schwanken des Temperaturverlaufs um diesen Mittelwert resultiert aus der thermischen Trägheit des eingesetzten Rippenrohrheizkörpers. Wird die vorgegebene Soll-Raumlufttemperatur unterschritten, schaltet sich der Heizkörper an und der Porenbeton-Kubus wird aufgeheizt. Wird die vorgegebene Raumlufttemperatur erreicht, wird die Heizung automatisiert wieder abgestellt. Der Rippenrohrheizkörper gibt jedoch im Rahmen seiner Auskühlung weiterhin Wärme an den Raum ab, wodurch dieser zeitweise weiter aufgeheizt wird.

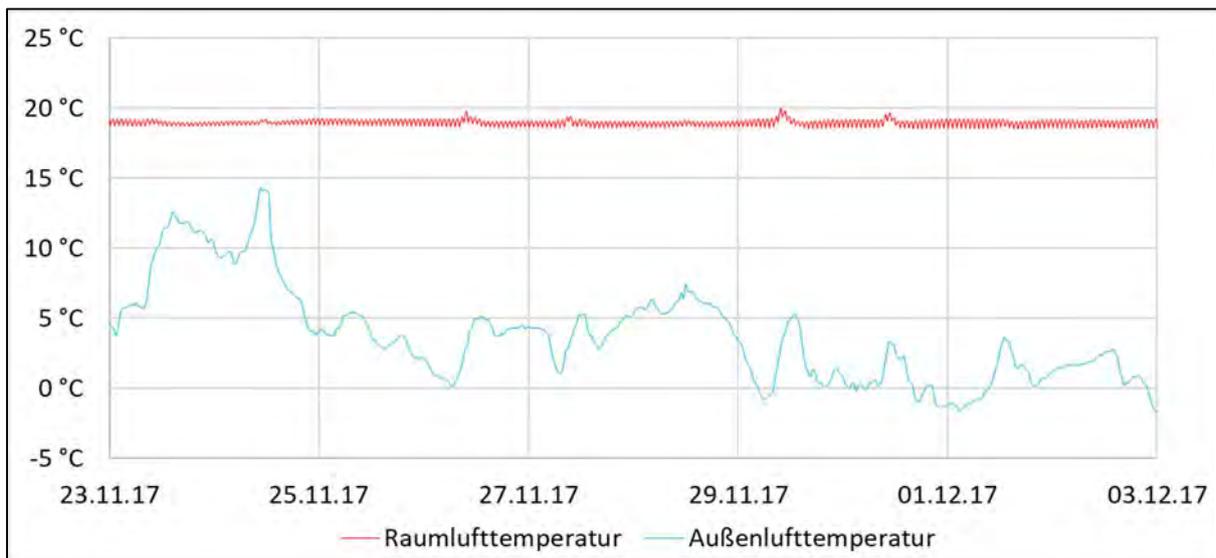


Abbildung 44: Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

Betrachtet man mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 45 den Temperaturverlauf im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus während der Zeit vom 24.11.17 um 8 Uhr bis zum 26.11.17 um 8 Uhr ist zu erkennen, dass im Innenputz nur geringe Temperaturänderungen begünstigt durch den Betrieb der Heizung zu verzeichnen waren. Auf Grund des Temperaturabfalls der Außenluft um 9,7 K sank die Außenputztemperatur deutlich um 9,4 K. Außerdem ist mit Hilfe des Diagramms zu erkennen, dass der Temperaturabfall im Wandquerschnitt mathematisch gesehen vereinfacht durch eine lineare Funktion beschrieben werden kann. Das lässt sich damit erklären, dass der eingesetzte Porenbeton-Stein (siehe Abbildung 19) einen monolithischen Querschnitt mit einheitlicher wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ aufweist.

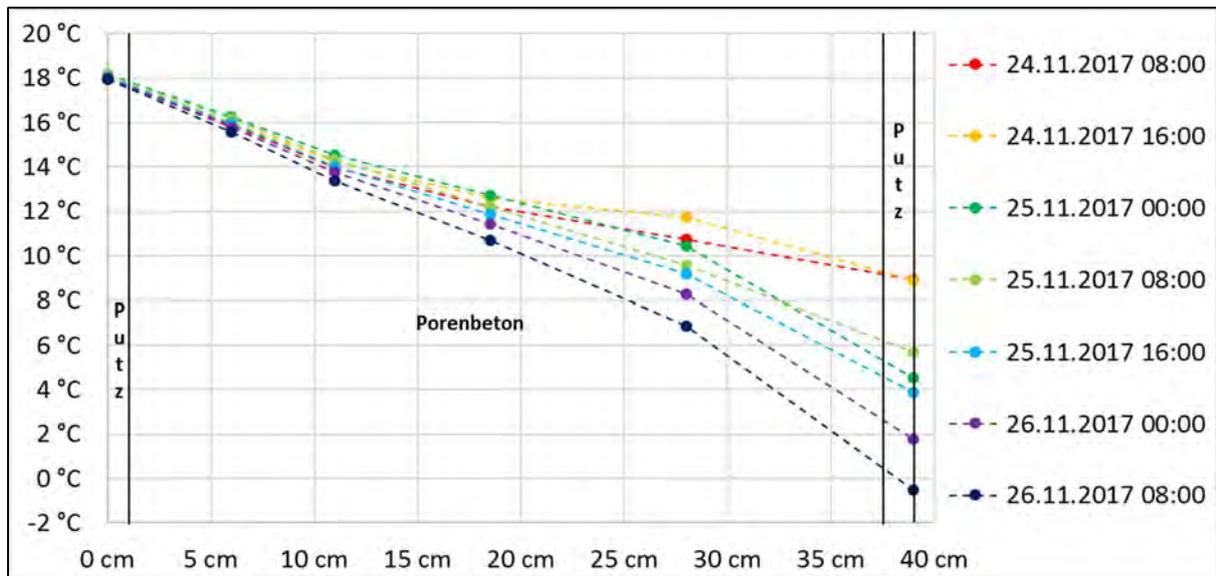


Abbildung 45: Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus

Um das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Porenbeton-Kubus besser verstehen zu können, wurde wie bereits zum Anfang dieses Kapitels beschrieben während des Zeitraums vom 11.12.17 bis zum Jahreswechsel ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Entsprechend der folgenden Abbildung 46, mit dargestellter gemessener Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie berechnetem vorausgesagtem Prozentsatz an Unzufriedenen PPD, wurde der Kubus zunächst bei dauerhaft ausgeschalteter Lüftungsanlage bis zu einer Raumlufttemperatur von 30,0 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.17 konstant gehalten. Darauf folgend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Während dieses Zeitabschnittes war die Außenlufttemperatur im Bereich von -2,8 °C bis 12,1 °C bei einer mittleren Temperatur von 3,8 °C und es war nur eine geringe solare Einstrahlung zu verzeichnen. Ab dem 01.01.18 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C.

Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD dient der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas und ist rechnerisch u.a. direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur. Steigt bzw. fällt diese, ändert sich auch der PPD. Gemäß der nachstehenden Abbildung 46 betrug der PPD direkt vor der Aufheizphase am 10.12.17 im Mittel 24 %. Es wurde also von einer imaginären Personengruppe erwartet, dass zu diesem Zeitpunkt 24 % der Nutzer unzufrieden mit dem vorherrschenden Raumklima im Porenbeton-Kubus sind. Während der Aufheizphase auf eine Soll-Raumlufttemperatur von 30 °C stieg der PPD deutlich an und pendelte sich während der folgenden Periode mit relativ konstanter Raumlufttemperatur um 68 % ein. Auf Grund der gestiegenen Raumlufttemperatur auf 30 °C hat sich somit die thermische Behaglichkeit deutlich

verschlechtert. Während der Abkühlphase fiel der PPD zunächst über 9 h bis auf 5 % ab, was gleichbedeutend war mit einer wesentlichen Verbesserung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas. Mit Unterschreitung einer Raumlufttemperatur von 22,9 °C stieg der PPD während der weiteren Abkühlung des Raumes wieder deutlich an wegen eines unbehaglicher gewordenen zu kalten Raumklimas und schwang sich um 71 % ein.

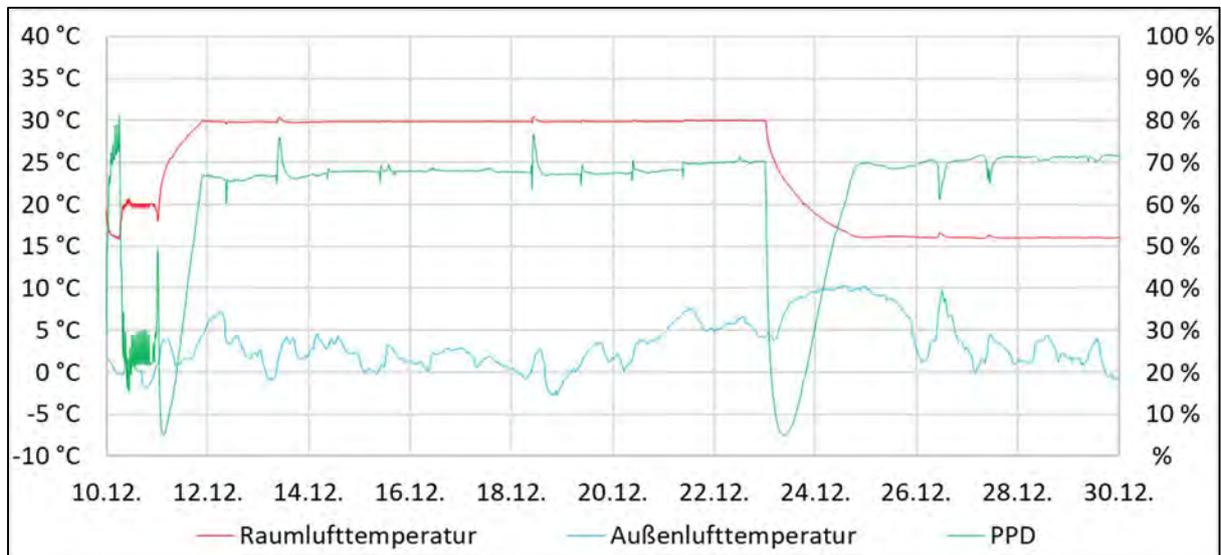


Abbildung 46: Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Porenbeton-Kubus

Mit Hilfe der nachstehenden Abbildungen 47 und 48 ist ersichtlich, dass sich die Aufheizphase über einen Zeitraum von ca. 22 h erstreckt hat und dass das Abkühlen während ca. 44 h ablief. Sowohl während der Aufheiz- als auch während der Abkühlperiode veränderte sich die Raumlufttemperatur im Porenbeton-Kubus anfangs schnell. Mit voranschreitender Zeit verlangsamte sich die Aufheizung bzw. Abkühlung vermehrt. Mathematisch gesehen kann man den Kurvenverlauf der Aufheizphase mit einer e-Funktion vergleichen. Die Abkühlperiode ähnelt ebenfalls einem solchen Funktionsgraph.

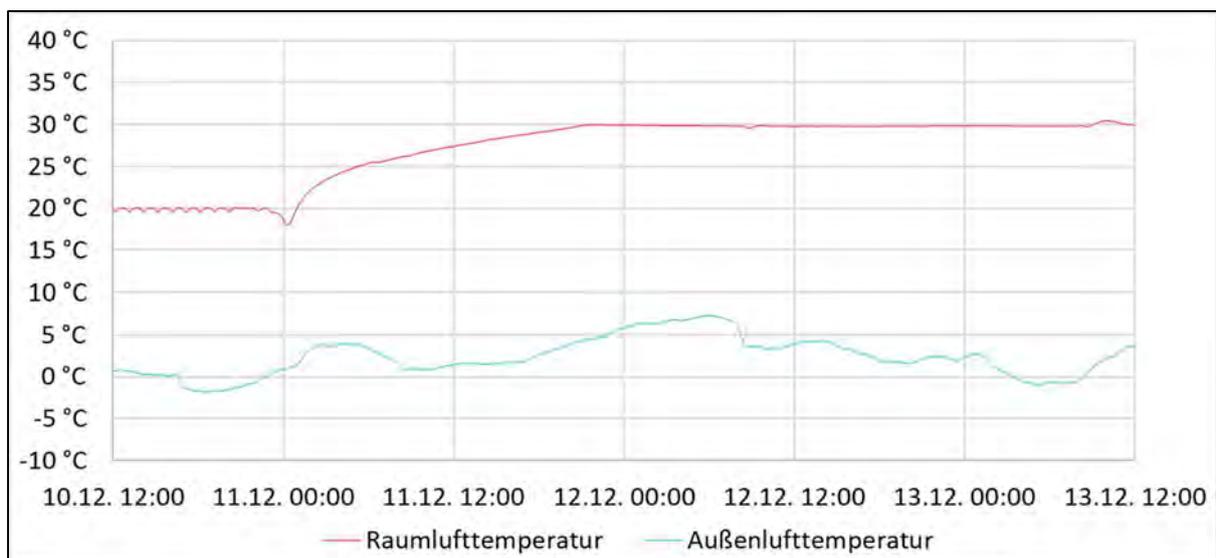


Abbildung 47: Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

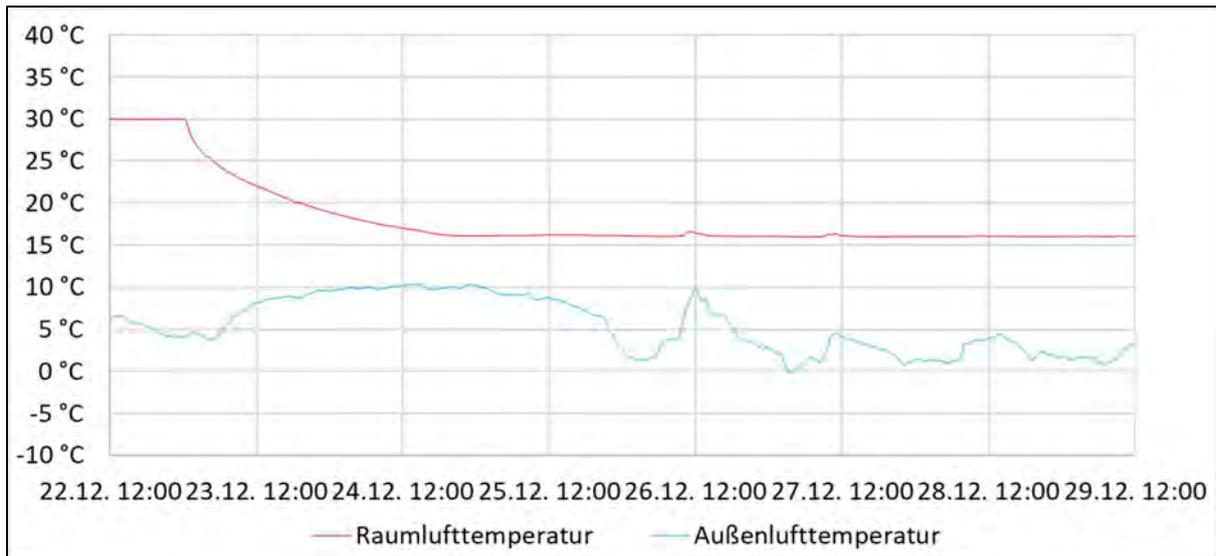


Abbildung 48: Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

Zur Auswertung der thermischen Vorgänge im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus während der künstlichen Aufheiz- bzw. Abkühlphase können die nachfolgenden Abbildungen 49 und 50 verwendet werden.

Die Abbildung 49 zeigt den kompletten Aufheizvorgang über 24 h. Ähnlich wie die Raumluft nahm die Temperatur insbesondere in den ersten raumseitigen 11 cm des Wandquerschnitts anfangs schnell zu. Die Aufheizung der Außenwand verlangsamte sich jedoch mit voranschreitender Zeit. Der Temperaturanstieg verläuft von der Innenseite betrachtet im Bereich der ersten 11 cm steiler verglichen zum restlichen Teil des Querschnitts.

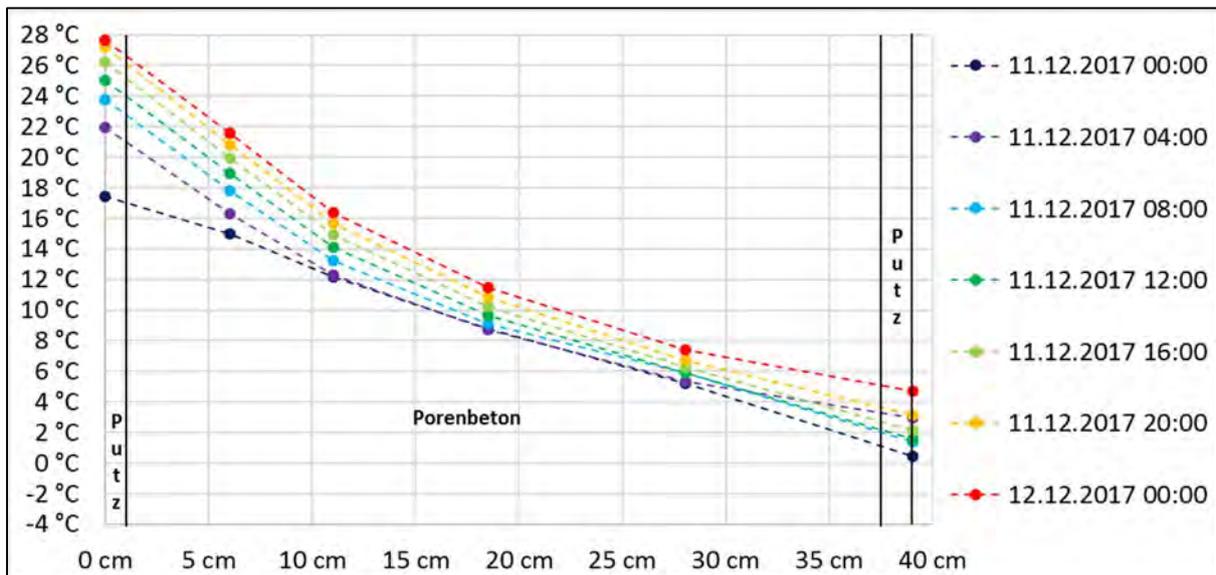


Abbildung 49: Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus

Während der Abkühlphase, die in der folgenden Abbildung 50 für die Nord-Ost-Außenwand grafisch aufbereitet ist, kam es ebenfalls zunächst zu einem schnellen Temperaturwechsel im Innenbereich des Wandquerschnitts, der sich mit voranschreitender Zeit verlangsamte. Die Temperatur nahm ab, wobei

der Temperaturabfall in der Außenwand anders als in der Aufheizphase mathematisch gesehen vereinfacht durch eine lineare Funktion beschrieben werden kann.

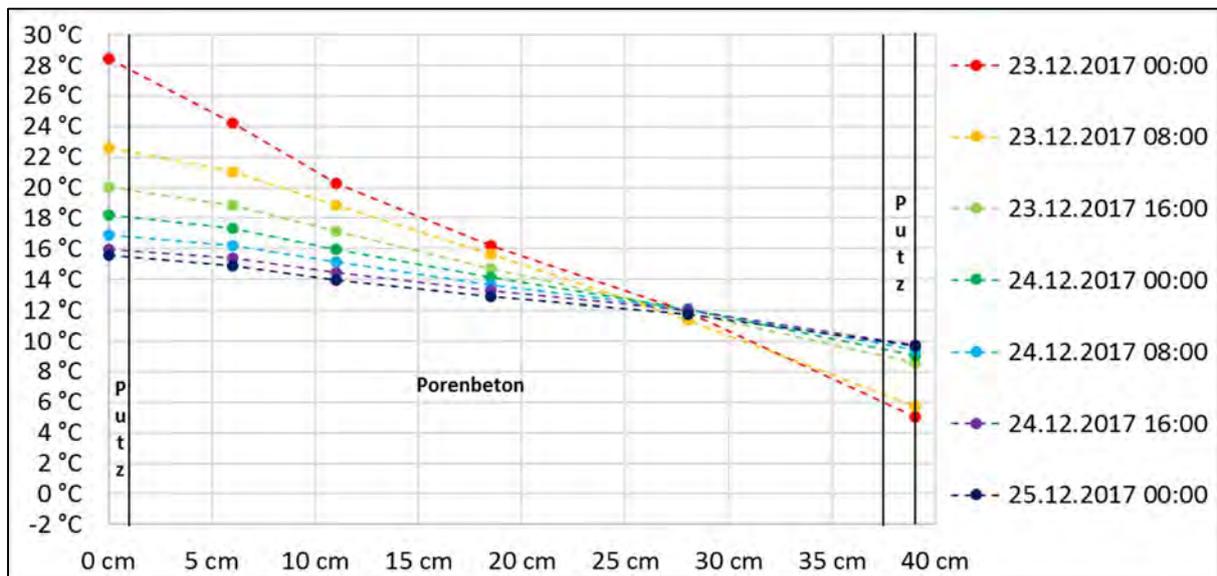


Abbildung 50: Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Nachtabenkung der Heizung auf eine Soll-Raumlufttemperatur von 16 °C im Zeitraum zwischen 23 Uhr und 6 Uhr wurden die Messdaten aus einer Woche in der Übergangszeit zwischen Sommer und Winter (25.10.17 bis 01.11.17) und zwei Wochen im Winter (28.01.18 bis 11.02.18) herangezogen.

Entsprechend der nachstehenden Abbildung 51 sank die Raumlufttemperatur nur in den Nächten vom 29.10.17 auf den 30.10.17 bzw. 30.10.17 auf den 31.10.17 auf unter 16,0 °C ab, was den kurzzeitigen nächtlichen Betrieb der Heizung zur Folge hatte. In den übrigen Nächten war ein Abfall im Bereich von 17,1 °C bis 16,4 °C zu verzeichnen. Die Absenkung war besonders groß, wenn die Außenlufttemperatur nachts stark abgefallen ist.



Abbildung 51: Nachtabenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

Mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 52 ist während der betrachteten beiden Winterwochen mit Nachtabenkung der Heizung ein Aufschaukeln des nächtlichen Raumlufttemperaturabfalls zu sehen. Während der ersten sechs Nächste ist die Raumlufttemperatur nicht bis unter 16 °C gesunken. Mit dem Abfall der Außenlufttemperatur sank auch die nächtliche Mindest-Raumlufttemperatur. Ab der siebten Nacht musste die Heizung in den Morgenstunden zum Einsatz kommen, um die Soll-Raumlufttemperatur von 16 °C zu gewährleisten.

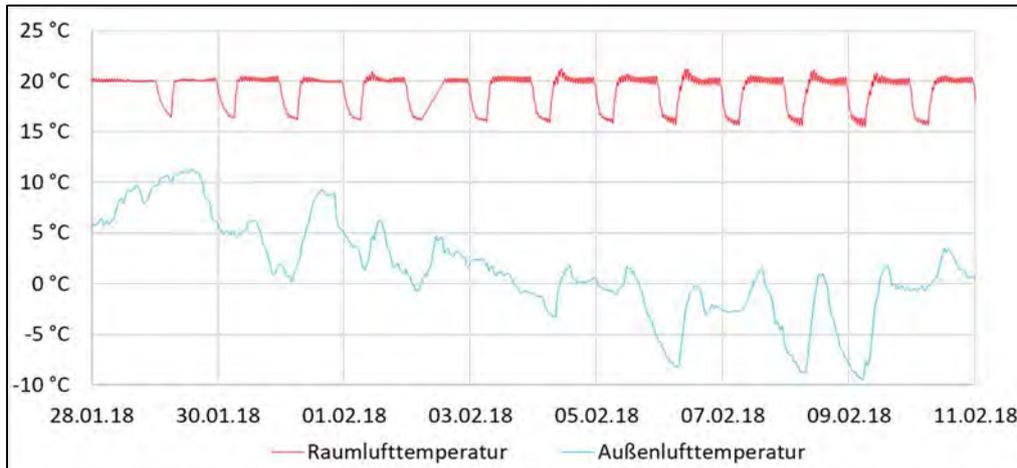


Abbildung 52: Nachtabenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

Die folgenden Abbildungen 53 und 54 zeigen die zu den vorangegangenen Diagrammen zugehörigen Temperaturen im Wandquerschnitt der Nord-Ost-Außenwand bei Nachtabenkung der Heizung während eines Tages in der Übergangszeit von Sommer zu Winter (29.10.17 um 12 Uhr bis 30.10.17 um 12 Uhr) und über elf Tage während der Winterzeit (29.01.18 um 6 Uhr bis 09.02.18 um 6 Uhr).

Im Verlauf der 24 Stunden vom 29.10.17 um 12 Uhr ausgehend ist die Außenlufttemperatur von 7,7 °C um maximal 3,8 K und die Raumlufttemperatur von 19,0 °C um höchstens 3,6 K gesunken (siehe Abbildung 51). Gemäß der nachstehenden Abbildung 53 ist die Temperatur im Innenputz der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus von 18,0 °C um lediglich 2,7 K gefallen, was für einen geringfügig positiven Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit des Wandaufbaus spricht.

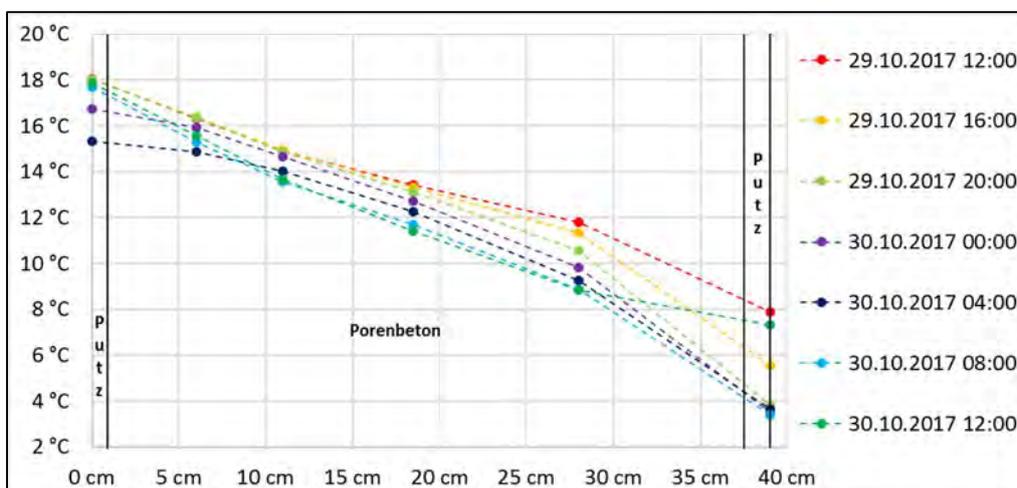


Abbildung 53: Nachtabenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus

Im in Abbildung 54 dargestellten Winterzeitraum ist zu erkennen, dass die Temperatur im Innenputz morgens in der Regel alle 24 Stunden minimal gefallen ist. Der Unterschied zwischen dem wärmsten (16,1 °C am 29.01.18 um 6 Uhr) und dem kältesten Morgen (14,8 °C am 09.02.18 um 6 Uhr) betrug 1,3 K. Mit dem über mehrere Tage kälter gewordenen Außenklima, hat sich der Wandquerschnitt langsam ausgekühlt.

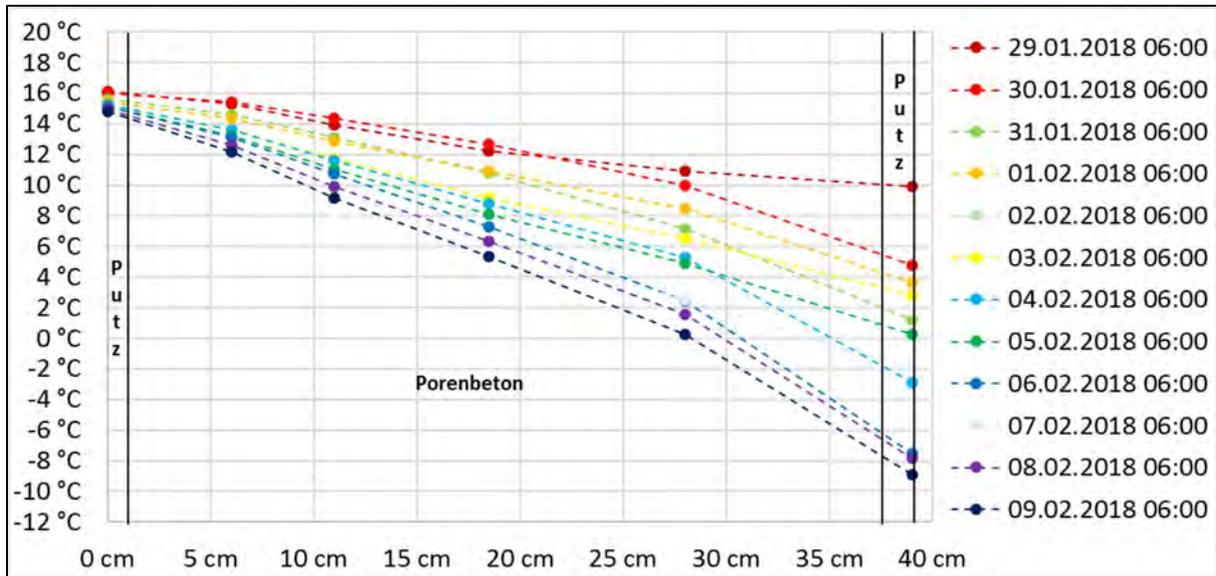


Abbildung 54: Nachtabsenkung Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus

Die folgende Abbildung 55 bildet den Energieverbrauch und die Außenlufttemperatur des Porenbeton-Kubus im Zeitraum vom 20.09.17 bis zum 28.02.18 ab. Gemessen wurden während dieser Zeit alle internen Wärmeeinträge in den Kubus durch technische Geräte. Dazu zählte der Stromverbrauch des Rippenrohrheizkörpers, des Laptops, der Messtechnik, der Regelungsbox, der künstlichen Beleuchtung und eines WLAN-Routers. Der Anstieg der orangenen Kurve spiegelt das Maß des Energieverbrauchs durch die internen Lasten wieder. Je steiler der Kurvenanstieg, umso höher war der Stromverbrauch während dieses Zeitraums.



Abbildung 55: Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

In dem vorangestellten Diagramm ist zu sehen, dass bis zum Anfang November der Anstieg der Energieverbrauchskurve flacher im Vergleich zur Folgezeit verläuft, weil die Heizung während der Übergangszeit vom Sommer zum Winter nur temporär im Einsatz war um das Erreichen der vorgegebenen Soll-Raumlufttemperatur zu gewährleisten. Bis zum 18.10.17 war die Heizung aufgrund günstiger Außentemperaturen und eines Heizungsdefektes nicht in Betrieb. Deshalb ist am Anfang des Kurvenverlaufs ein sehr geringer Anstieg im Diagramm zu erkennen. Mit Ausnahme der künstlichen Aufheizung und Abkühlung des Kubus im Dezember verläuft der Anstieg ab Anfang November relativ konstant auf Grund der dauerhaften künstlichen Beheizung des Porenbeton-Kubus. Während der künstlichen Aufheizphase im Zeitraum vom 11.12.17 bis einschließlich 22.12.17 verläuft die Kurve wie erwartet etwas steiler durch den energieintensiveren Betrieb der Heizung zur Sicherstellung einer Raumlufttemperatur von 30 °C. Mit Beginn der künstlichen Abkühlung des Kubus auf 16 °C ab 23.12.17 flacht der Kurvenanstieg bis zum Jahreswechsel auch im Vergleich zur Folgezeit deutlich sichtbar wieder ab.

5.2.3 Kalksandstein-Kubus

Die nachfolgende Abbildung 56 zeigt die gemessene Raumlufttemperatur im Kalksandstein-Kubus und die ermittelte Außenlufttemperatur am Standort Emstal im Zeitraum von April 2017 bis einschließlich Februar 2018. Während dieses Zeitraums schwankte die Außenlufttemperatur im Bereich von -15,4 °C bis 33,2 °C und die Raumlufttemperatur zwischen 15,6 °C und 31,3 °C.

Seit dem Beginn der Messungen bis in den Mai 2017 hinein wurde mit Hilfe der installierten Heizung eine mittlere Raumlufttemperatur von 19,1 °C sichergestellt. Im Zeitraum vom 17.05.17 bis zum 23.09.17 war die Heizung begünstigt durch das Außenklima überwiegend nicht mehr im Betrieb. Bedingt durch das Außenklima kam es zum zeitweiligen Aufheizen und Abkühlen der Raumluft. Danach war der Einsatz der Heizung wieder erforderlich, um eine anvisierte Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C zu erreichen. Zeitweise wurde zwischen 23 Uhr und 6 Uhr eine Nachtabsenkung der Raumlufttemperatur auf 16,0 °C umgesetzt.

Vom 11.12.17 bis zum Jahreswechsel wurde ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Bei ausgeschalteter Lüftungsanlage wurde der Kubus zunächst bis zu einer Soll-Raumlufttemperatur von 30,0 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.17 konstant gehalten. Daraufaufend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Ab dem 01.01.18 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C und zeitweiliger Nachtabsenkung (zwischen 23 Uhr und 6 Uhr) auf 16,0 °C.

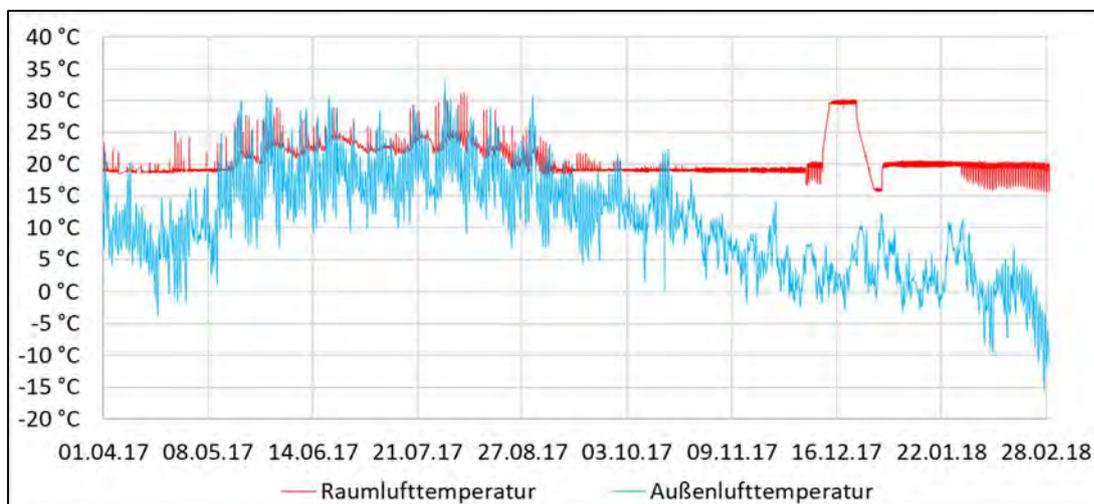


Abbildung 56: Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

Die folgenden Abbildungen 57 und 58 weisen das sommerliche Aufheizverhalten des Kalksandstein-Kubus in Abhängigkeit vom Außenklima in Emstal aus.

Der Bezugswert der operativen Raumtemperatur ist abhängig von der Sommerklimaregion entsprechend DIN 4108-2 [12] (detaillierte Infos siehe Kapitel 3). Der Aufstellort des Kubus – Emstal – liegt in der Klimaregion B mit einem Grenzwert der operativen Raumtemperatur von 26 °C. Dieser ist in der nachstehenden Abbildung 57 markiert. Außerdem ist in dem Diagramm der sommerliche Verlauf der ermittelten operativen Raumtemperatur und der gemessenen Außenlufttemperatur zu finden. Es ist ersichtlich, dass die operative Raumtemperatur indirekt beeinflusst wird durch das Außenklima. Nimmt über mehrere aufeinanderfolgende Tage die Außenlufttemperatur zu, steigt zeitlich versetzt auch die operative Raumtemperatur. Der Grenzwert für eine sommerliche Überhitzung von 26 °C wird insgesamt an 33 Tagen zeitweise überschritten. Während der aufgezeigten Sommerperiode des Jahres 2017 sind insgesamt 62 Kh (Übertemperaturgradstunden) zu verzeichnen. Zulässig sind maximal 1200 Kh/a entsprechend DIN 4108-2 [12].

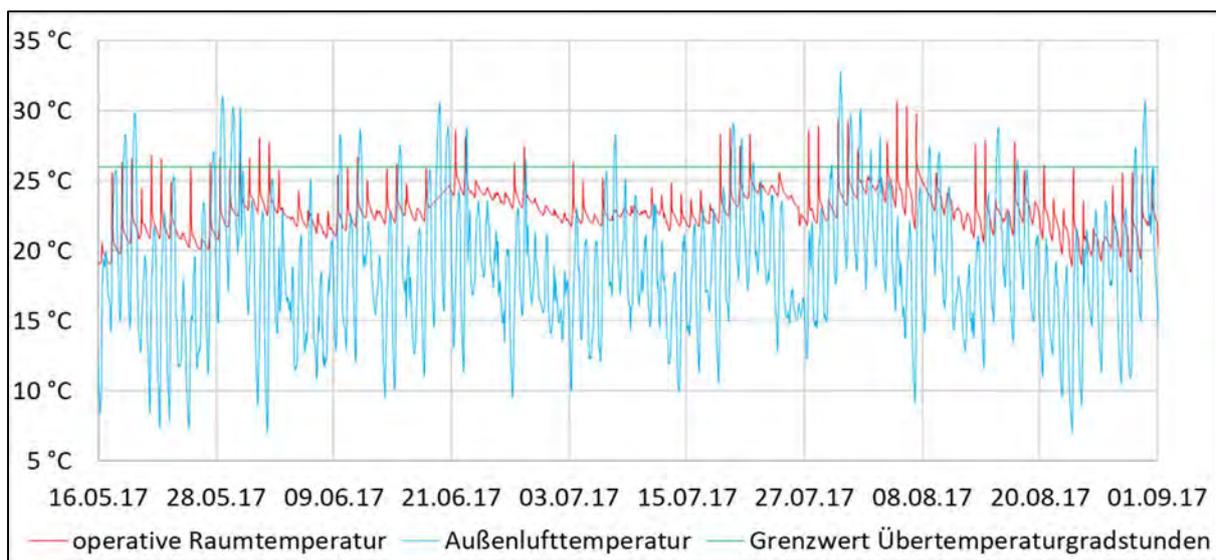


Abbildung 57: Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Kalksandstein-Kubus

Die nachfolgende Abbildung 58 zeigt die Verläufe der gemessenen Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie des berechneten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD (im Englischen: predicted percentage of dissatisfied / detaillierte Infos siehe Kapitel 5.2.1) an mehreren aufeinanderfolgenden Sommertagen mit teilweise steigender maximaler Außenlufttemperatur.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Außenlufttemperatur auch die Raumlufttemperatur zunimmt. Allerdings sind die täglichen Höchsttemperaturen der Raumluft vormittags zu verzeichnen, währenddessen der Maximalwert der Außenlufttemperatur nachmittags auftritt. Die Ursache für dieses Verhalten ist die Ausrichtung der Fenstertür des Kalksandstein-Kubus. Diese ist nach Süd-Osten orientiert, wodurch täglich nur am Vormittag die Sonne direkt in den Raum hereinscheinen kann.

Auffällig ist der sehr schnelle Anstieg und Abfall der Raumlufttemperatur am Vormittag durch direkte Sonneneinstrahlung auf den Messsensor auf Grund eines nicht optimal platzierten Strahlungsschutzschirmes.

Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD dient der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas und ist rechnerisch u.a. direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur. Steigt bzw. fällt diese, ändert sich auch der PPD. Zum Beginn des dargestellten Sommerzeitraums am 17.07.17 um 0 Uhr betrug der PPD 6 %. Es wurde also von einer imaginären

Personengruppe erwartet, dass zu diesem Zeitpunkt nur 6 % der Nutzer unzufrieden mit dem vorherrschenden Raumklima im Kalksandstein-Kubus sind. Während der fünf folgenden Tage mit teilweise steigender maximaler Außenlufttemperatur verhielt sich der PPD sehr ähnlich im Vergleich zur Raumlufttemperatur. Während der Vormittagsstunden mit direkter Sonneneinstrahlung in den Kubus stieg der PPD auf das Tagesmaximum an. Die thermische Behaglichkeit verschlechterte sich also auf Grund der Aufheizung der Raumluft. Danach fiel er wieder bis zum nächsten Morgen (ca. 6 Uhr) ab und somit verbesserte sich wieder die zu erwartende Nutzerzufriedenheit mit dem Raumklima.

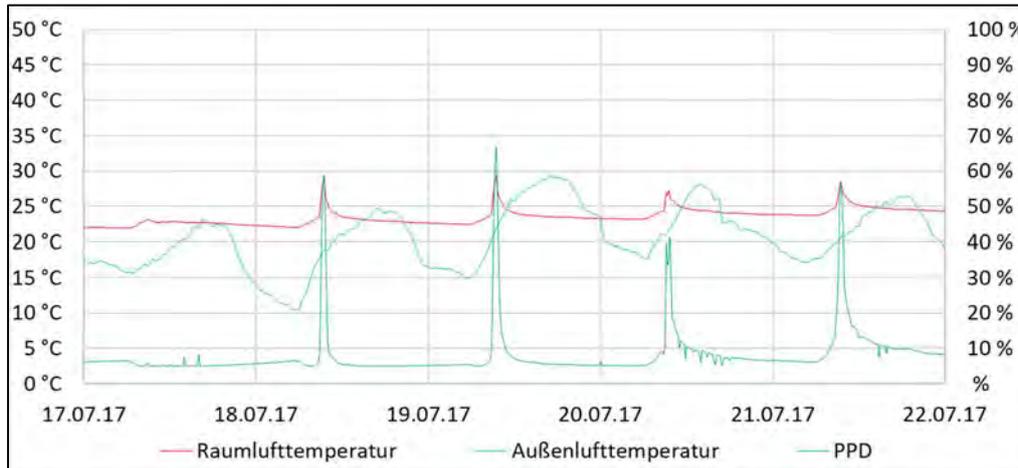


Abbildung 58: Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumlufth- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Kalksandstein-Kubus

Die folgende Abbildung 59 spiegelt Temperaturverläufe durch die mit Sensoren versehene Nord-Ost-Außenwand am 19. und 20.07.17 wieder. Während des gesamten dargestellten Zeitraums variieren die Temperaturen im Innenputz sowie im Kalksandstein nur gering. In der außenseitigen Dämmebene sind hingegen abhängig vom Außenklima große Temperaturschwankungen zu erkennen. Die Ursache liegt darin, dass die Dämmung im Vergleich zum raumseitigen Kalksandstein eine niedrige Wärmeleitfähigkeit λ und wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} hat. Durch eine hohe wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ reagiert der Kalksandstein hingegen träge auf thermische Einflüsse und ist somit in der Lage die Auswirkungen von schwankenden Temperatureinflüssen abzupuffern.

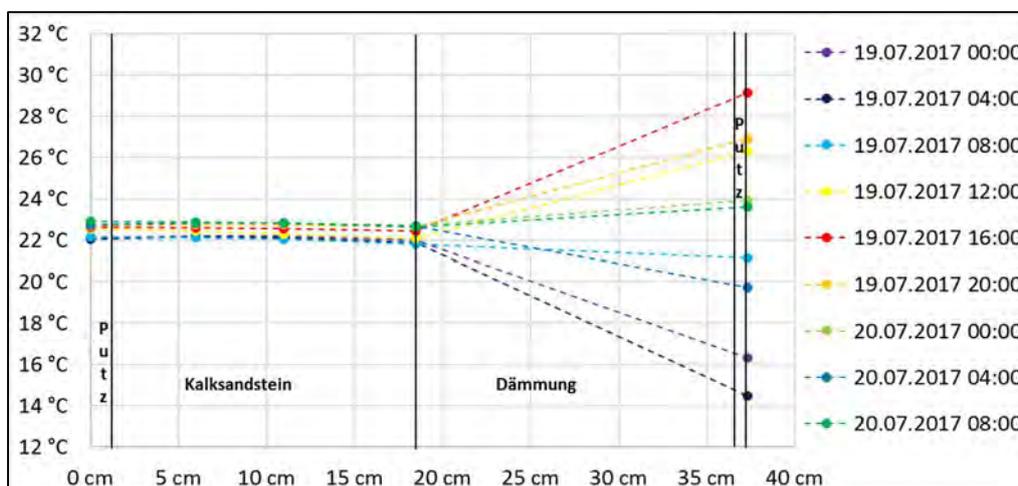


Abbildung 59: Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus

In der nachstehenden Abbildung 60 ist ein Messzeitraum zu sehen, währenddessen die Außenlufttemperatur am Kuben-Standort Emstal über mehrere Tage stark abgenommen hat. Sie ist innerhalb von 43 h von 14,1 °C (24.11.17 um 12 Uhr) um 13,8 K auf 0,3 °C (26.11.17 um 7 Uhr) gesunken. Währenddessen betrug die Raumlufttemperatur auf Grund des Betriebes der Heizungsanlage im Mittel 19,1 °C. Das Schwanken des Temperaturverlaufs um diesen Mittelwert resultiert aus der thermischen Trägheit des eingesetzten Rippenrohrheizkörpers. Wird die vorgegebene Soll-Raumlufttemperatur unterschritten, schaltet sich der Heizkörper an und der Kalksandstein-Kubus wird aufgeheizt. Wird die vorgegebene Raumlufttemperatur erreicht, wird die Heizung automatisiert wieder abgestellt. Der Rippenrohrheizkörper gibt jedoch im Rahmen seiner Auskühlung weiterhin Wärme an den Raum ab, wodurch dieser zeitweise weiter aufgeheizt wird.

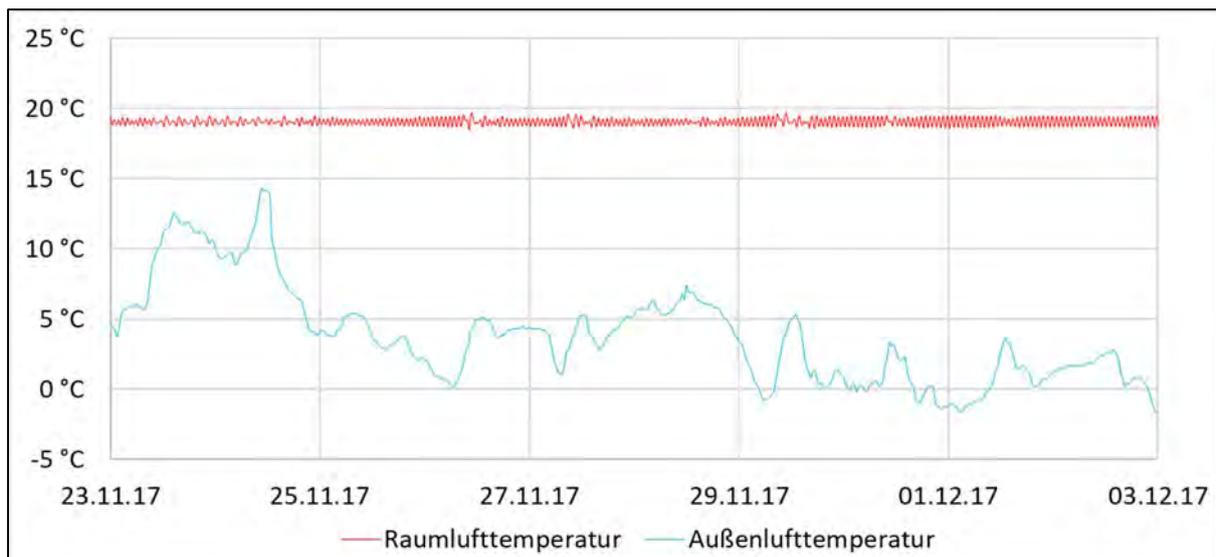


Abbildung 60: Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

Betrachtet man mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 61 den Temperaturverlauf im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus während der Zeit vom 24.11.17 um 8 Uhr bis zum 26.11.17 um 8 Uhr ist zu erkennen, dass im Innenputz sowie im Kalksandstein nur geringe Temperaturänderungen begünstigt durch den Betrieb der Heizung und der hohen Masse des Kalksandsteins zu verzeichnen waren. In der außenseitigen Dämmebene ist hingegen abhängig vom Außenklima eine hohe Temperaturabsenkung zu sehen. Auf Grund des Temperaturabfalls der Außenluft um 9,7 K sank die Außenputztemperatur deutlich um 10,3 K. Außerdem ist mit Hilfe des Diagramms zu erkennen, dass der Temperaturabfall im Wandquerschnitt mathematisch gesehen vereinfacht durch zwei zusammengesetzte lineare Funktionen mit unterschiedlichen Anstiegen beschrieben werden kann. Ein flacher Anstieg und somit thermische Trägheit im Bereich des raumseitigen Kalksandsteins wegen hoher wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ . Hingegen ein steiler Anstieg im Abschnitt der Außendämmung mit niedriger Wärmeleitfähigkeit λ und wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} .

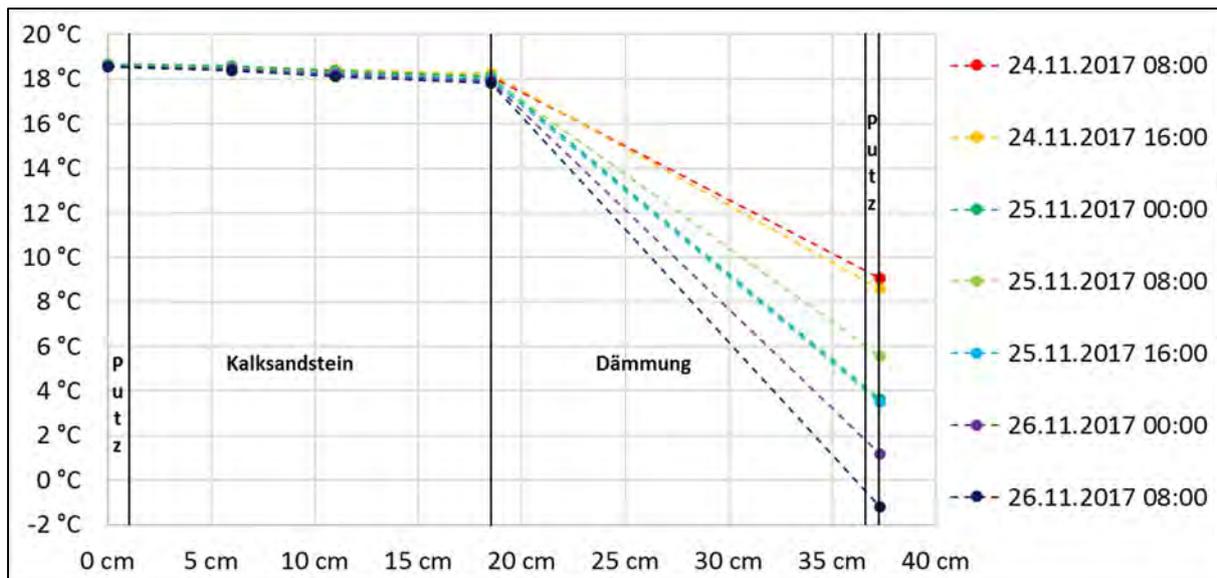


Abbildung 61: Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus

Um das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Kalksandstein-Kubus besser verstehen zu können, wurde wie bereits zum Anfang dieses Kapitels beschrieben während des Zeitraums vom 11.12.17 bis zum Jahreswechsel ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Entsprechend der folgenden Abbildung 62, mit dargestellter gemessener Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie berechnetem vorausgesagtem Prozentsatz an Unzufriedenen PPD, wurde der Kubus zunächst bei dauerhaft ausgeschalteter Lüftungsanlage bis zu einer Raumlufttemperatur von 30,0 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.17 konstant gehalten. Darauf folgend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Während dieses Zeitabschnittes war die Außenlufttemperatur im Bereich von -2,8 °C bis 12,1 °C bei einer mittleren Temperatur von 3,8 °C und es war nur eine geringe solare Einstrahlung zu verzeichnen. Ab dem 01.01.18 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C.

Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD dient der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas und ist rechnerisch u.a. direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur. Steigt bzw. fällt diese, ändert sich auch der PPD. Gemäß der nachstehenden Abbildung 62 betrug der PPD direkt vor der Aufheizphase am 10.12.17 im Mittel 28 %. Es wurde also von einer imaginären Personengruppe erwartet, dass zu diesem Zeitpunkt 28 % der Nutzer unzufrieden mit dem vorherrschenden Raumklima im Kalksandstein-Kubus sind. Während der Aufheizphase auf eine Soll-Raumlufttemperatur von 30 °C stieg der PPD deutlich an und pendelte sich während der folgenden Periode mit relativ konstanter Raumlufttemperatur um 63 % ein. Wegen der gestiegenen Raumlufttemperatur auf 30 °C hat sich somit die thermische Behaglichkeit deutlich verschlechtert. Die kurzzeitigen großen Schwankungen der PPD-Linie sind im Übrigen zurückzuführen auf die leicht schwankende Raumlufttemperatur auf Grund der thermischen Trägheit des im Kubus eingesetzten Rippenrohrheizkörpers. Während der Abkühlphase fiel der PPD zunächst über 48 h bis auf 5 % ab, was gleichbedeutend war mit einer wesentlichen Verbesserung der thermischen Behaglichkeit des Raumklimas. Mit Unterschreitung einer Raumlufttemperatur von 23,1 °C stieg der PPD während der weiteren Abkühlung des Raumes wieder deutlich an wegen eines unbehaglicher gewordenen zu kalten Raumklimas und schwang sich um 75 % ein.

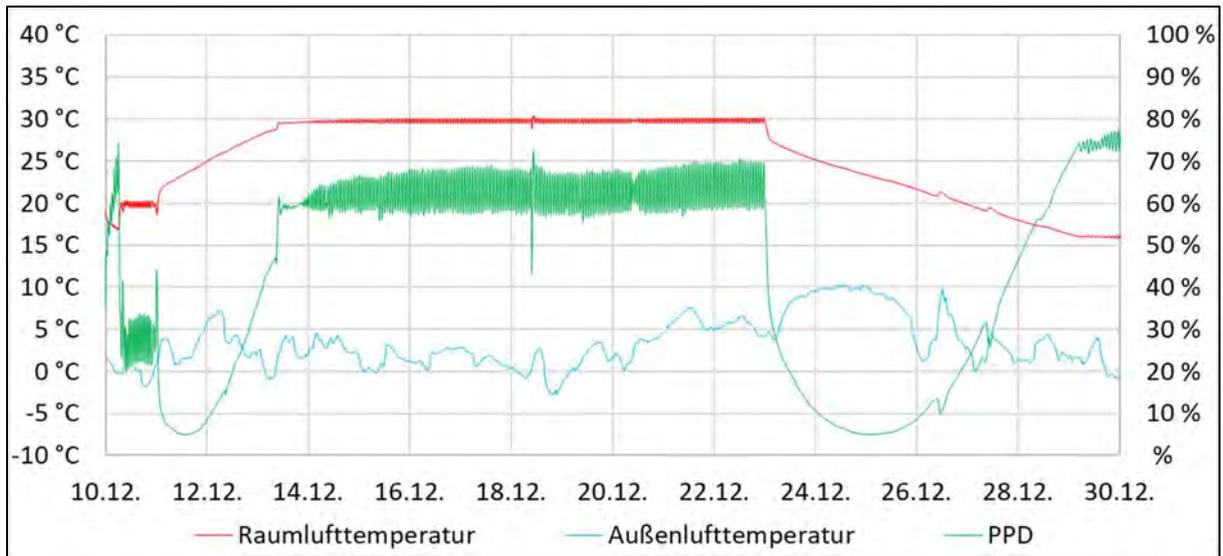


Abbildung 62: Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Kalksandstein-Kubus

Mit Hilfe der nachstehenden Abbildungen 63 und 64 ist ersichtlich, dass sich die künstliche Aufheizphase über einen Zeitraum von ca. 70 h erstreckt hat und dass das Abkühlen während ca. 149 h ablief. Sowohl während der Aufheiz- als auch während der Abkühlphase veränderte sich die Raumlufttemperatur im Kalksandstein-Kubus anfangs schnell. Mit voranschreitender Zeit verlangsamte sich die Aufheizung bzw. Abkühlung. Mathematisch gesehen kann man den Kurvenverlauf der Aufheizphase mit einer e-Funktion vergleichen. Die Abkühlperiode ähnelt ebenfalls einem solchen Funktionsgraph.

Vor dem Aufheizen, zwischen der Aufheiz- und Abkühlphase, als auch nach dem Abkühlen ist jeweils eine schwingende Raumlufttemperaturkurve zu sehen. Wie bereits im Voraus erläutert resultiert dieses Verhalten aus der thermischen Trägheit des eingesetzten Rippenrohrheizkörpers.

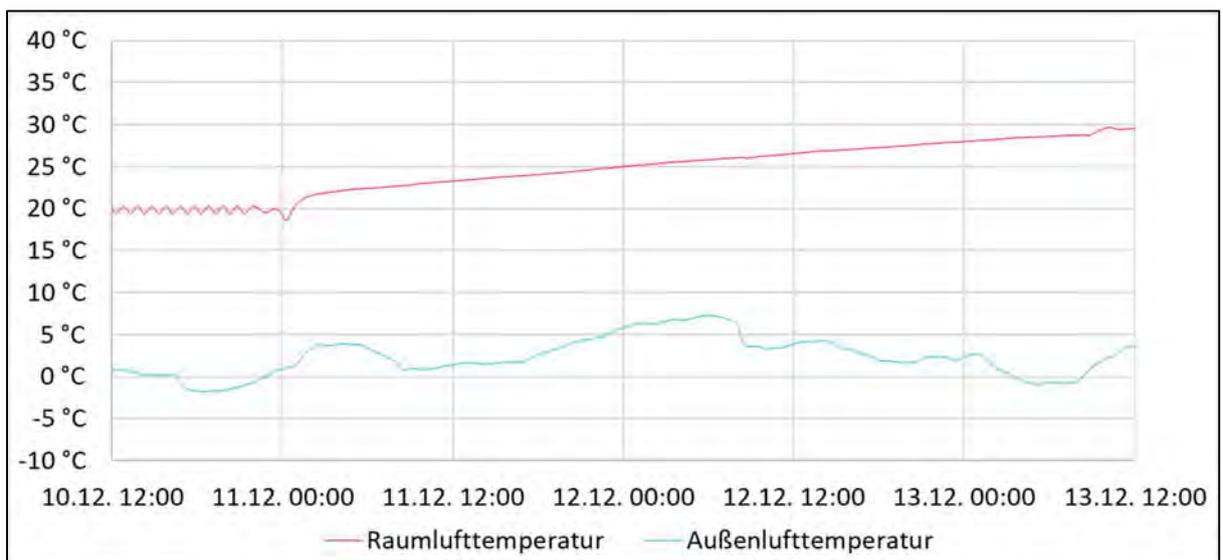


Abbildung 63: Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus



Abbildung 64: Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluf- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

Zur Auswertung der thermischen Vorgänge im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus während der künstlichen Aufheiz- bzw. Abkühlperiode können die nachfolgenden Abbildungen 65 und 66 verwendet werden.

Die Abbildung 65 zeigt den Aufheizvorgang über die ersten 64 h. Ähnlich wie die Raumluf nahm die Temperatur im Innenputz während der ersten Stunden schnell zu. Die Aufheizung des Wandquerschnitts verlangsamte sich jedoch mit voranschreitender Zeit. Wie bereits bei der Auswertung der natürlichen winterlichen Abkühlung festgestellt werden konnte, verläuft der Temperaturanstieg von der Raum- bzw. Innenseite betrachtet im Bereich des Innenputzes und des Kalksandsteins deutlich flacher verglichen zum restlichen Teil des Querschnitts bestehend aus Wärmedämmung und Außenputz. Dieses Verhalten lässt sich damit erklären, dass die Außendämmung im Vergleich zum raumseitigen Kalksandstein eine niedrige Wärmeleitfähigkeit λ und wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} hat. Auf Grund einer hohen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ reagiert der Kalksandstein hingegen träge auf thermische Einwirkungen.

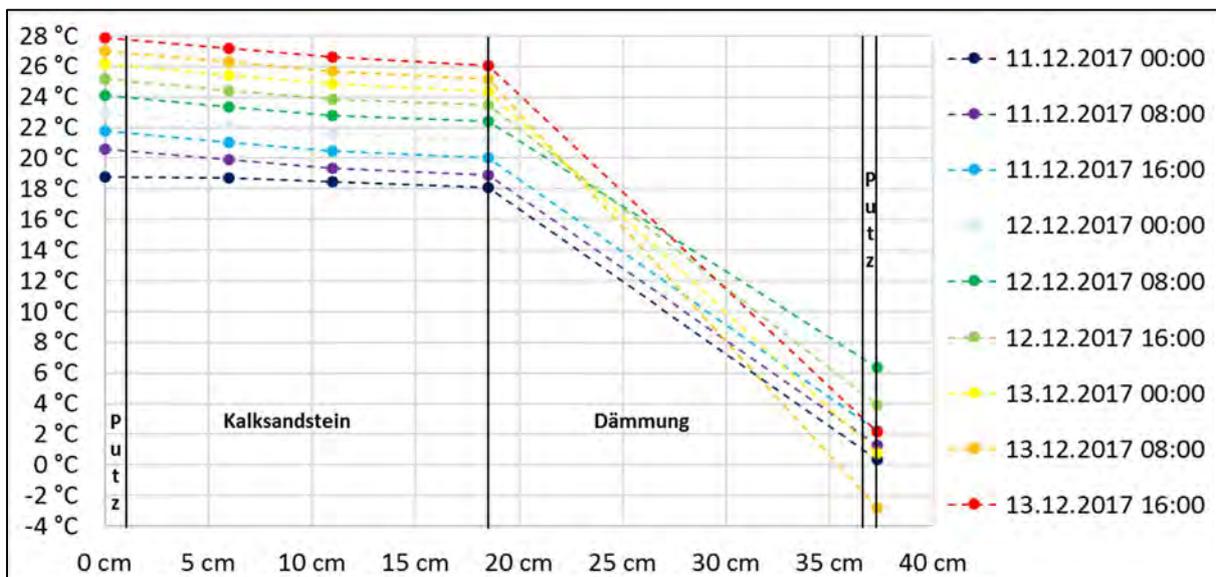


Abbildung 65: Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus

Während der Abkühlphase, die in der folgenden Abbildung 66 für die Nord-Ost-Außenwand grafisch aufbereitet ist, kam es ebenfalls zunächst zu einem schnellen Temperaturwechsel im Innenbereich des Wandquerschnitts, der sich mit voranschreitender Zeit verlangsamte. Die Temperatur nahm ab, wobei die Absenkung von der Raum- bzw. Innenseite ausgehend wieder im Bereich des Innenputzes und des Kalksandsteins wesentlich flacher im Vergleich zum Dämmabschnitt erfolgt.

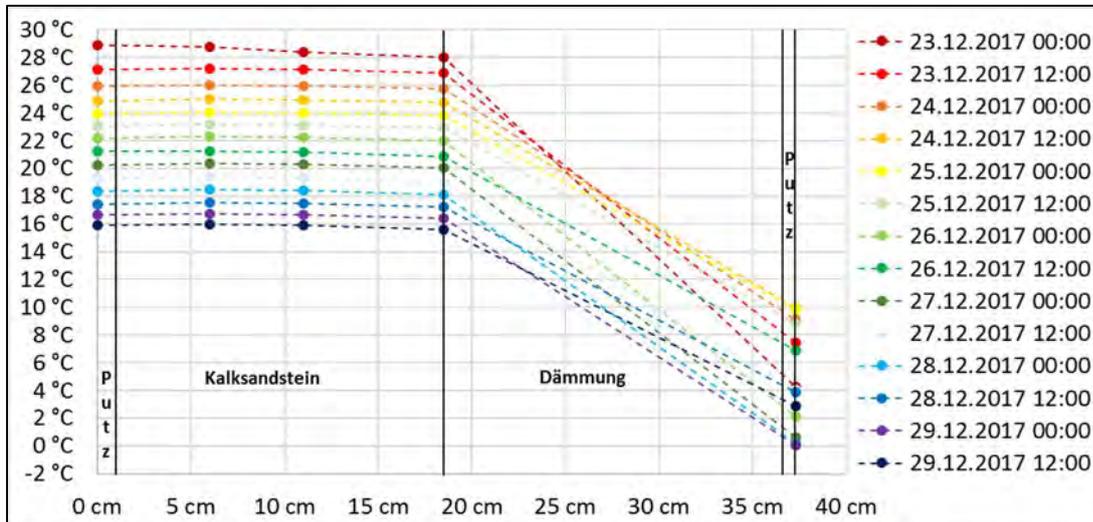


Abbildung 66: Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Nachtabsenkung der Heizung auf eine Soll-Raumlufttemperatur von 16 °C im Zeitraum zwischen 23 Uhr und 6 Uhr wurden die Messdaten aus zwei Wochen im Winter (28.01.18 bis 11.02.18) herangezogen.

Mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 67 ist während der betrachteten beiden Winterwochen mit Nachtabsenkung der Heizung ein Aufschaukeln des nächtlichen Raumlufttemperaturabfalls zu sehen. Während der ersten zehn Nächste ist die Raumlufttemperatur nicht bis unter 16 °C gesunken. Mit dem Abfall der Außenlufttemperatur sank auch die nächtliche Mindest-Raumlufttemperatur. In der elften und zwölften Nacht musste die Heizung in den Morgenstunden kurzzeitig zum Einsatz kommen, um die Soll-Raumlufttemperatur von 16 °C zu gewährleisten.

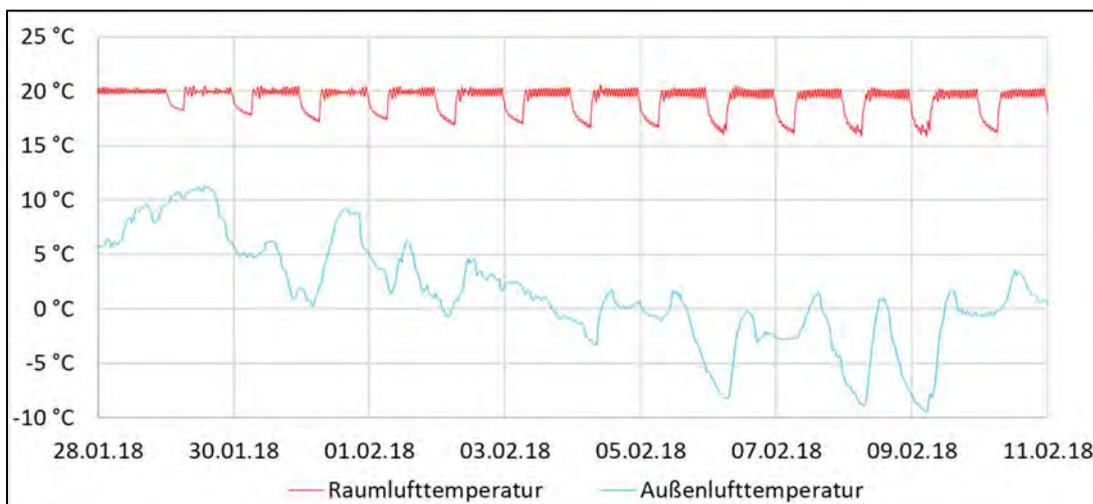


Abbildung 67: Nachtabsenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

Die folgende Abbildung 68 zeigt die zu dem vorangegangenen Diagramm zugehörigen Temperaturen im Wandquerschnitt der Nord-Ost-Außenwand bei Nachtabsenkung der Heizung über elf Tage während der Winterzeit (29.01.18 um 6 Uhr bis 09.02.18 um 6 Uhr).

Im dargestellten Winterzeitraum ist zu erkennen, dass die Temperatur im Innenputz morgens in der Regel alle 24 Stunden minimal gefallen ist. Der Unterschied zwischen dem wärmsten (18,9 °C am 29.01.18 um 6 Uhr) und dem kältesten Morgen (17,3 °C am 09.02.18 um 6 Uhr) betrug 1,6 K. Mit dem über mehrere Tage kälter gewordenen Außenklima, hat sich der Wandquerschnitt langsam ausgekühlt.

Insgesamt ist in dem Diagramm zu sehen, dass der Temperaturabfall über den gesamten Wandquerschnitt betrachtet vereinfacht durch zwei zusammengesetzte lineare Funktionen mit unterschiedlichen Anstiegen beschrieben werden kann. Ein flacher Anstieg und somit thermische Trägheit im Bereich des raumseitigen Kalksandsteins wegen hoher wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ . Hingegen ein steiler Anstieg im Abschnitt der Außendämmung mit niedriger Wärmeleitfähigkeit λ und wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} .

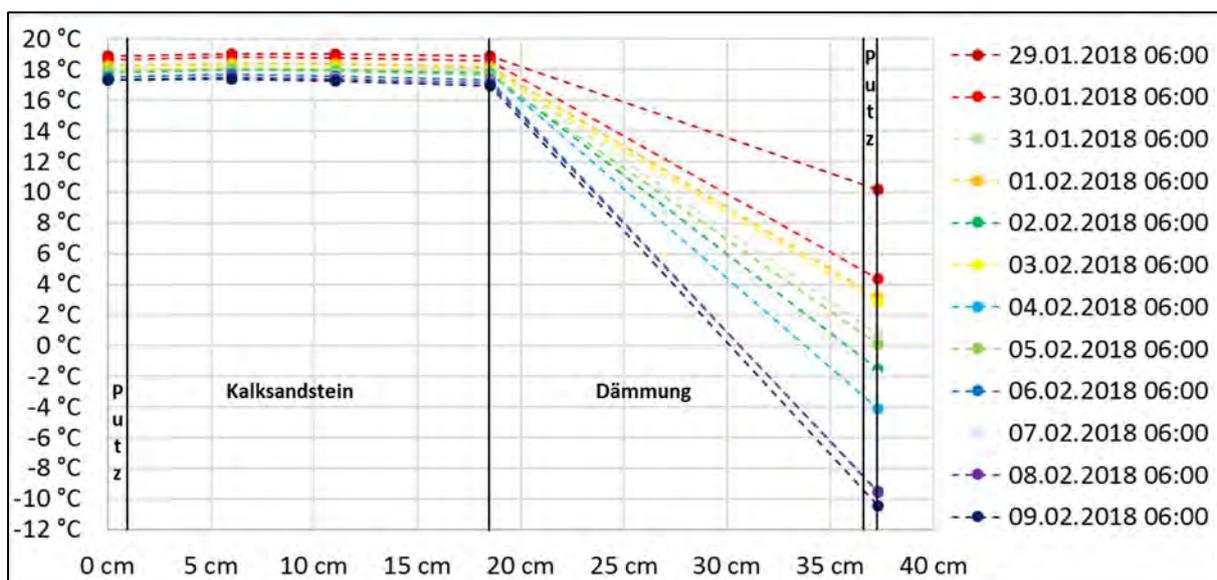


Abbildung 68: Nachtabsenkung Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus

Die nachstehende Abbildung 69 bildet den Energieverbrauch und die Außenlufttemperatur des Kalksandstein-Kubus im Zeitraum vom 20.09.17 bis zum 28.02.18 ab. Gemessen wurden während dieser Zeit alle internen Wärmeeinträge in den Kubus durch technische Geräte. Dazu zählte der Stromverbrauch des Rippenrohrheizkörpers, des Laptops, der Messtechnik, der Regelungsbox und der künstlichen Beleuchtung. Der Anstieg der orangenen Kurve spiegelt das Maß des Energieverbrauchs durch die internen Lasten wieder. Je steiler der Kurvenanstieg, umso höher war der Stromverbrauch während dieses Zeitraums.



Abbildung 69: Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

In dem vorangestellten Diagramm ist zu sehen, dass bis zum Anfang November der Anstieg der Energieverbrauchskurve flacher im Vergleich zur Folgezeit verläuft, weil die Heizung während der Übergangszeit vom Sommer zum Winter nur temporär im Einsatz war um das Erreichen der vorgegebenen Soll-Raumlufttemperatur zu gewährleisten. Mit Ausnahme der künstlichen Aufheizung und Abkühlung des Kubus im Dezember verläuft der Anstieg ab Anfang November relativ konstant auf Grund der dauerhaften künstlichen Beheizung des Kalksandstein-Kubus. Während der künstlichen Aufheizphase im Zeitraum vom 11.12.17 bis einschließlich 22.12.17 verläuft die Kurve wie erwartet steiler durch den energieintensiveren Betrieb der Heizung zur Sicherstellung einer Raumlufttemperatur von 30 °C. Mit Beginn der künstlichen Abkühlung des Kubus auf 16 °C ab 23.12.17 flacht der Kurvenanstieg bis zum Jahreswechsel auch im Vergleich zur Folgezeit deutlich sichtbar wieder ab.

5.2.4 Brettsperrholz-Kubus

Dieses Kapitel wurde von der TU München erstellt.

Die nachfolgende Abbildung 70 zeigt die gemessene Raumlufttemperatur im Brettsperrholz-Kubus und die Außenlufttemperatur am Standort Kösching im Zeitraum von April 2017 bis einschließlich Februar 2018. Während dieses Zeitraums schwankte die Außenlufttemperatur im Bereich von -12,8 °C bis 35,6 °C und die Raumlufttemperatur zwischen 13,9 °C und 31,9 °C.

Seit dem Beginn der Messungen bis in den Mai 2017 hinein wurde mit Hilfe der installierten Heizung eine mittlere Raumlufttemperatur von 29,3 °C bzw. 20,1 °C sichergestellt. Im Zeitraum vom 17.05.2017 bis zum 23.09.2017 war die Heizung überwiegend nicht mehr im Betrieb. Bedingt durch das Außenklima kam es zum zeitweiligen Aufheizen und Abkühlen der Raumluft. Danach war der Einsatz der Heizung wieder erforderlich um die anvisierte Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C zu erreichen. Zeitweise wurde zwischen 23 Uhr und 6 Uhr eine Nachtabsenkung der Raumlufttemperatur auf 16,0 °C umgesetzt. Zwischen dem 06.10. und dem 14.10.2017 war die Heizung ausgeschaltet.

Vom 11.12.2017 bis zum Jahreswechsel wurde ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Bei ausgeschalteter Lüftungsanlage wurde der Kubus zunächst bis zu einer Soll-Raumlufttemperatur von 30,0 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.2017 konstant gehalten. Darauf folgend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Ab dem 01.01.2018 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C und zeitweiliger Nachtabsenkung (zwischen 23 Uhr und 6 Uhr) auf 16,0 °C. Vom 18.08.2017 bis zum 23.08.2017 liegen auf Grund einer Störung keine Messdaten vor.

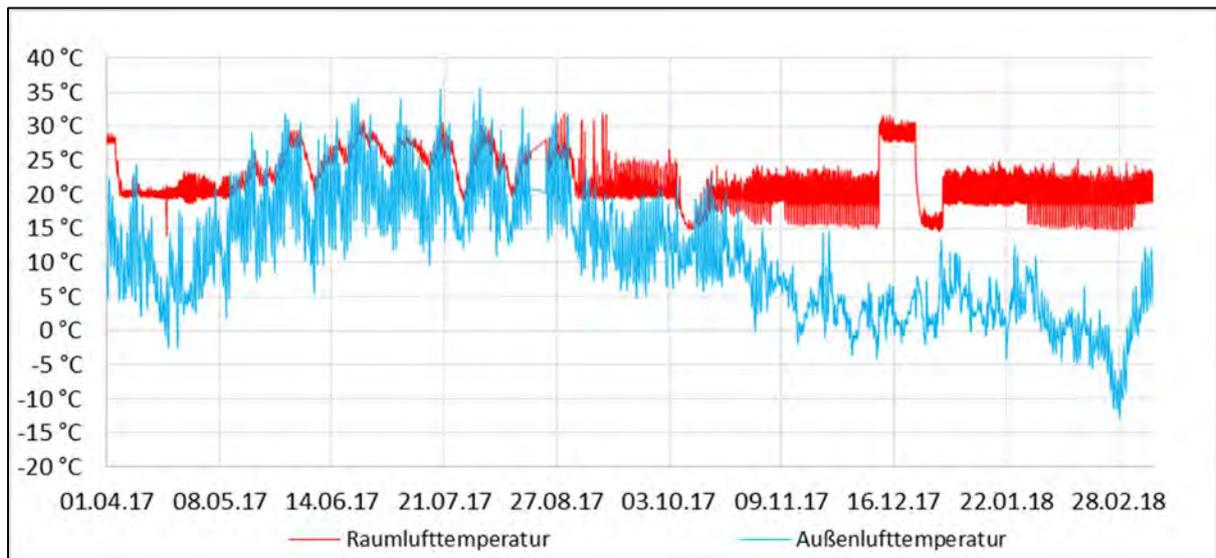


Abbildung 70: Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus

Die folgende Abbildung 71 zeigt das sommerliche Aufheizverhalten des Brettsperrholz-Kubus in Abhängigkeit vom Außenklima in Kösching.

Der Bezugswert der operativen Raumtemperatur ist abhängig von der Sommerklimaregion entsprechend DIN 4108-2 [12] (detaillierte Infos siehe Kapitel 3). Der Aufstellort des Kubus, Kösching liegt in der Klimaregion B mit einem Bezugswert der operativen Raumtemperatur von 26 °C. Dieser ist in der nachstehenden Abbildung 71 markiert. Außerdem ist in dem Diagramm der sommerliche Verlauf der ermittelten operativen Raumtemperatur und der gemessenen Außenlufttemperatur zu finden. Es ist ersichtlich, dass die operative Raumtemperatur indirekt beeinflusst wird durch das Außenklima. Nimmt über mehrere aufeinanderfolgende Tage die Außenlufttemperatur zu, steigt zeitlich versetzt auch die operative Raumtemperatur. Der Bezugswert für eine sommerliche Überhitzung von 26 °C wird insgesamt an 52 Tagen zeitweise überschritten. Aufgrund von technischen Störungen liegen für den Zeitraum vom 17.07.2017 bis zum 20.07.2017 nur eingeschränkt und vom 18.08.2017 bis zum 23.08.2017 keine Messdaten vor. Die Zählung der Übertemperaturgradstunden für den im folgenden Diagramm gezeigten Zeitraum wird daher nicht aufgeführt.

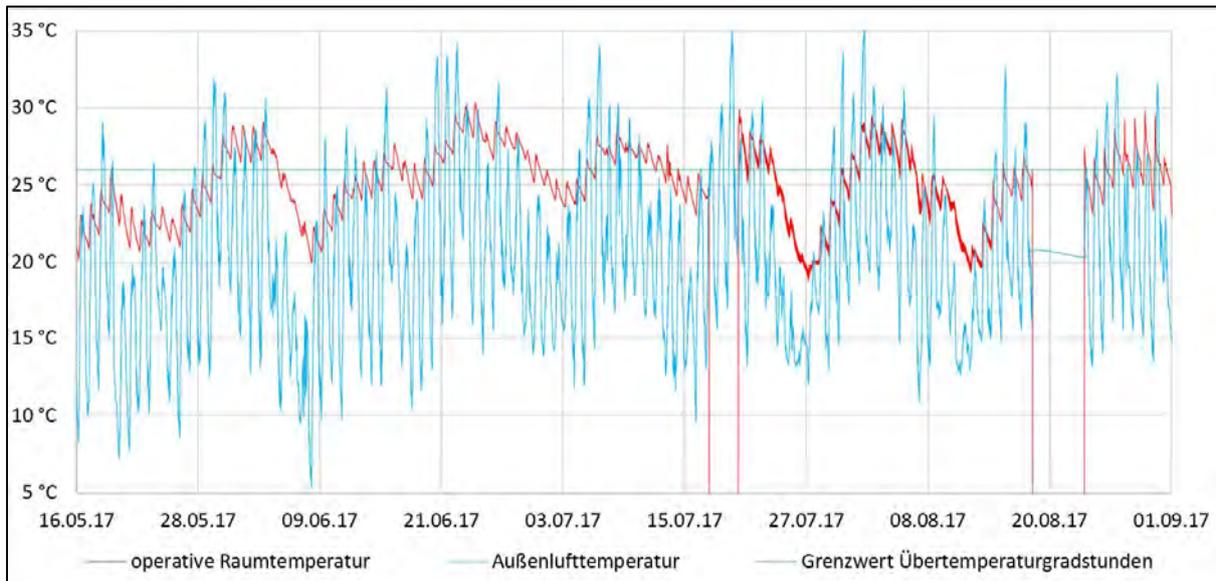


Abbildung 71: Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Brettsperrholz-Kubus

Die nachfolgende Abbildung 72 zeigt den Verlauf der gemessenen Raumlufttemperatur und des berechneten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD (im Englischen: predicted percentage of dissatisfied / detaillierte Infos siehe Kapitel 5.2.1) an mehreren aufeinanderfolgenden Sommertagen mit teilweise steigender Außenlufttemperatur auf.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Außenlufttemperatur auch die Raumlufttemperatur allmählich zunimmt. Dabei sind die täglichen Höchsttemperaturen der Raumluft vormittags zu verzeichnen, währenddessen der Maximalwert der Außenlufttemperatur nachmittags auftritt. Die Ursache für dieses Verhalten wird in der Ausrichtung der Fenstertür des Brettsperrholz-Kubus vermutet. Diese ist wie bei allen vier Kuben nach Süd-Osten orientiert, wodurch täglich nur am Vormittag die Sonne direkt in den Raum eintragen kann.

Der PPD ist rechnerisch direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur. Steigt diese, nimmt auch der PPD auf Grund der sommerlichen Aufheizung zu. Sinkt die Raumlufttemperatur insbesondere nachts wieder ab, sind weniger unzufriedene Personen zu erwarten. Dass das mittlere Niveau des PPD über mehrere Tage hinweg zunimmt, liegt neben der ansteigenden Innenraumlufttemperatur auch an der gestiegenen mittleren Strahlungstemperatur, die aus den Oberflächentemperaturen der raumumschließenden Bauteile resultiert.

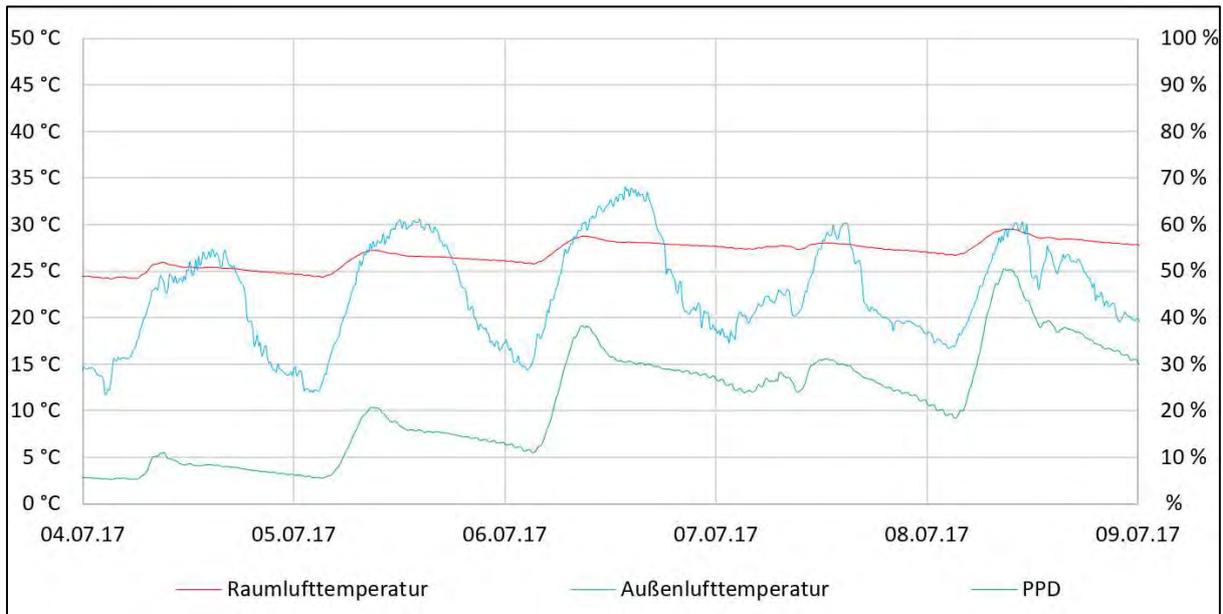


Abbildung 72: Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Brettsperrholz-Kubus

Die folgende Abbildung 73 spiegelt Temperaturverläufe durch die mit Sensoren versehene Nord-Ost-Außenwand am 05.07.17. und 06.07.17 wieder. Während des dargestellten Zeitraums variieren die Temperaturen im Brettsperrholz raumseitig um bis zu 1,52 K. In der außenseitigen Dämmebene bzw. dem Außenputz sind hingegen abhängig vom Außenklima Temperaturschwankungen bis zu 18,04 K zu erkennen. Die Ursache liegt darin, dass die Dämmung im Vergleich zum raumseitigen Brettsperrholz eine niedrige Wärmeleitfähigkeit λ und wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} hat. Durch eine höhere Wärmespeicherfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit reagiert das Brettsperrholz träge auf thermische Einflüsse und ist somit in der Lage die Auswirkungen von schwankenden Temperatureinflüssen abzdämpfen.

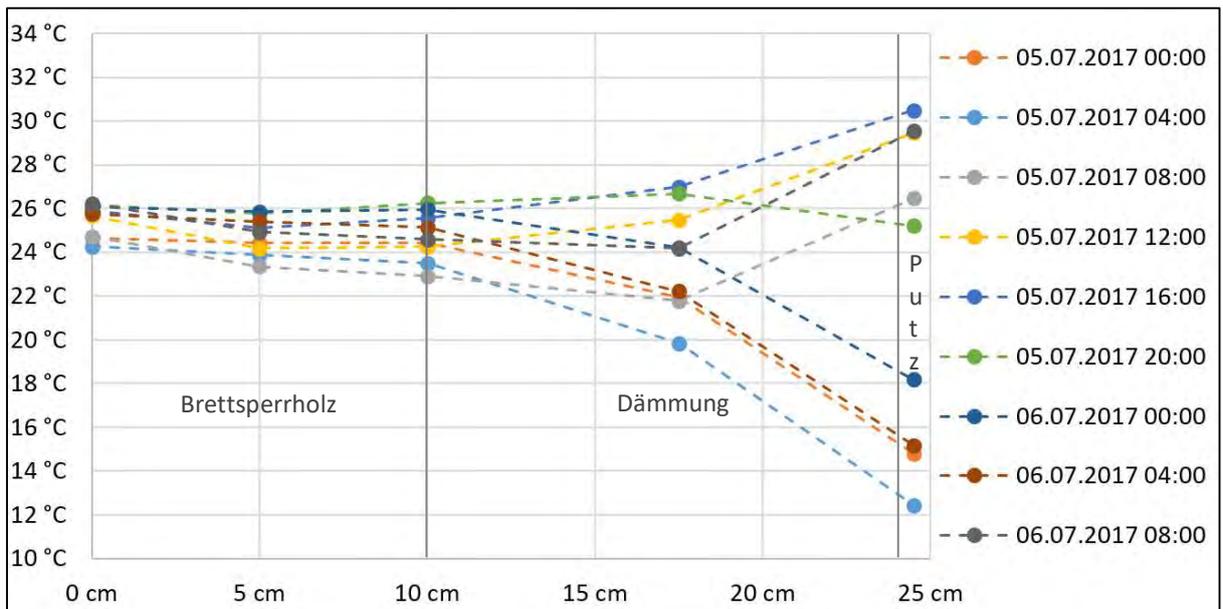


Abbildung 73: Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus

In der nachstehenden Abbildung 74 ist ein Messzeitraum zu sehen, während dem die Außenlufttemperatur am Kuben-Standort Kösching über wenige Tage stark abgenommen hat. Sie ist innerhalb von 42,5 h von 14,0 °C (24.11.17 um 13:40 Uhr) um 13,1 K auf 0,9 °C (26.11. um 08:10 Uhr) gesunken. In dieser Zeitspanne war im Brettsperrholz-Kubus im Gegensatz zu den anderen drei Kuben eine Nachtabsenkung aktiv. Die Raumlufttemperatur wurde täglich zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr auf eine Solltemperatur von 20 °C geregelt. Die tatsächliche Temperatur in dieser Zeit betrug im Mittel 20,8 °C. Die Schwankungen resultieren aus der Trägheit des zur Beheizung eingesetzten Rippenrohrradiators. Während der Nachtabsenkung, täglich zwischen 23:00 Uhr und 06:00 Uhr wurde die Raumlufttemperatur auf 16,0 °C geregelt. Die tatsächliche Temperatur in diesem Zeitraum betrug im Mittel 16,4 °C.

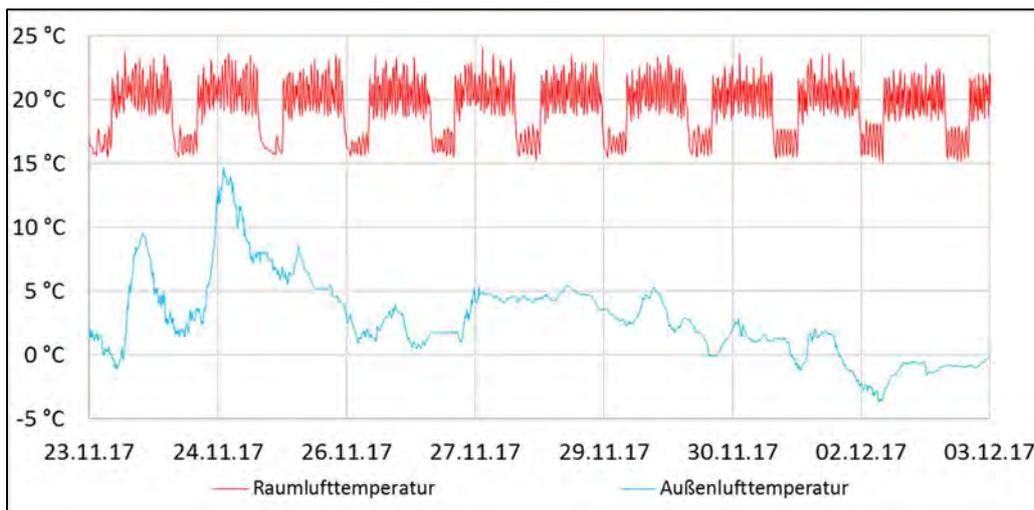


Abbildung 74: Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus

Betrachtet man mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 75 den Temperaturverlauf im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus während der Zeit vom 23.11.17 um 00:00 Uhr bis zum 25.11.17 um 16:00 Uhr ist zu erkennen, dass im Brettsperrholz der Temperaturgradient deutlich flacher verläuft als in der außenseitigen Dämmung. Es ist ein Temperaturabfall von ca. zwei Kelvin über dem Brettsperrholz erkennbar. Die von außen aufgeprägten Temperaturschwankungen werden weitgehend durch die Holzweichfaserdämmplatten abgebaut.

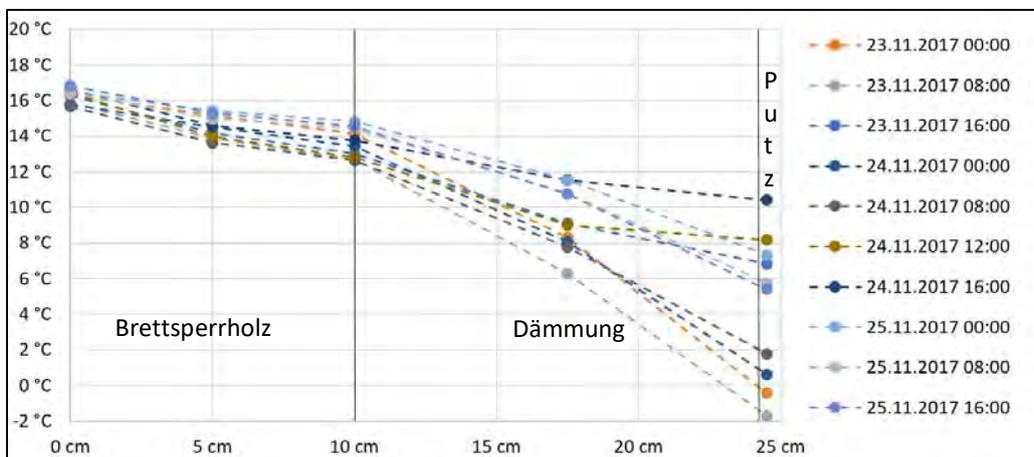


Abbildung 75: Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus

Um das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Brettsperrholz-Kubus besser beschreiben zu können, wurde wie bereits zum Anfang dieses Kapitels erwähnt im Zeitraum vom 11.12.17 bis zum Jahreswechsel ein besonderes Regelungsprogramm durchgeführt. Entsprechend der folgenden Abbildung 76 wurde der Kubus zunächst bei dauerhaft ausgeschalteter Lüftungsanlage bis zu einer Raumlufttemperatur von 29,2 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde bis einschließlich 22.12.17 konstant gehalten. Darauf folgend wurde die Heizung automatisiert ausgeschaltet bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Raumlufttemperatur 16,0 °C unterschritten hatte. Während dieses Zeitabschnittes war die Außenlufttemperatur im Bereich von -2,1 °C bis 13,3 °C bei einer mittleren Temperatur von 3,1 °C und es war nur eine geringe solare Einstrahlung zu verzeichnen. Ab dem 01.01.18 wurde wieder ein normales Regelungsprogramm der Heizung umgesetzt mit einer Soll-Raumlufttemperatur von 20,0 °C.

Der berechnete vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD ist rechnerisch direkt gekoppelt an die gemessene Raumlufttemperatur sowie an die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen. Während der Aufheizphase steigt die Lufttemperatur an und pendelt sich während der Periode mit konstanter Soll-Raumlufttemperatur von knapp 30,0 °C um 27 % ein. Während der Abkühlphase des Brettsperrholz-Kubus fällt der PPD zunächst bis auf den Minimalwert von 5 % ab. Mit Unterschreitung einer Raumlufttemperatur von 23,6 °C steigt der PPD während der verbleibenden Abkühlung des Raumes wieder an und schwingt sich um 87,4 % ein.

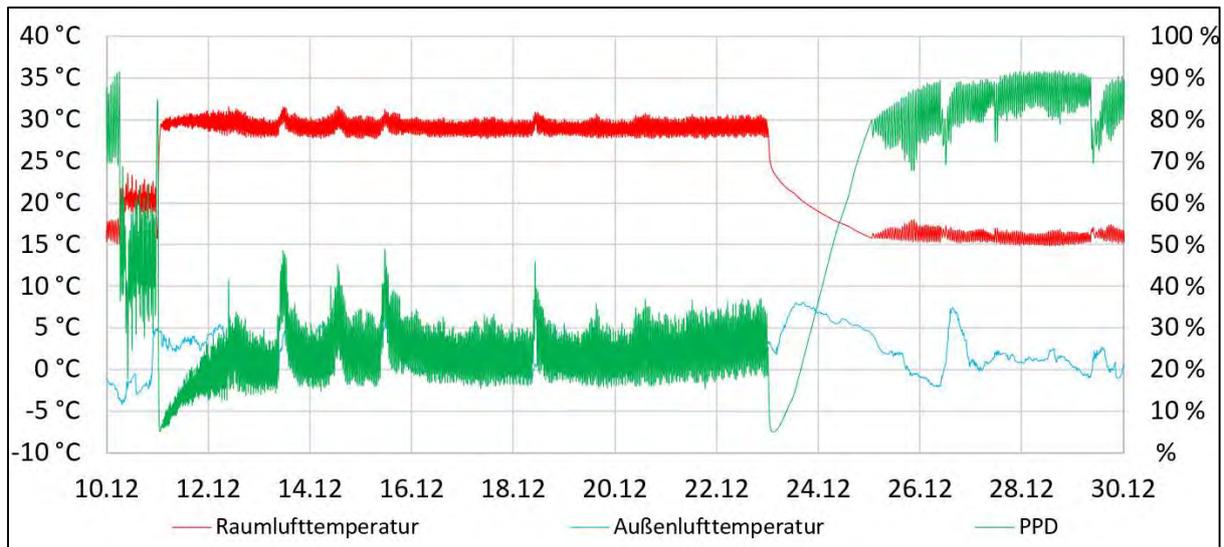


Abbildung 76: Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Brettsperrholz-Kubus

Mit Hilfe der nachstehenden Abbildungen 77 und 78 ist ersichtlich, dass sich die künstliche Aufheizphase über einen Zeitraum von nur ca. zwei Stunden erstreckt hat und dass das Abkühlen während ca. 51 h ablief. Da die Lüftungsanlage während dieses Vorgangs ausgeschaltet war und die Infiltration als sehr gering angenommen wird, wird das Abkühlverhalten maßgeblich von den Transmissionswärmeverlusten beeinflusst. Der zu Beginn stark fallende Verlauf der Raumlufttemperatur kann mit der hohen Temperaturdifferenz zwischen Innenraum- und Außenluft erklärt werden. Im weiteren Verlauf wird der Abfall der Raumlufttemperatur stark gedämpft, da zum einen die Innenraumlufttemperatur sich der Temperatur der Außenluft annähert. Zum anderen steigt die Außenlufttemperatur in diesem Zeitraum, sodass die antreibende Temperaturdifferenz und damit die Transmissionswärmeverluste stark abnehmen.

Vor dem Aufheizen, zwischen der Aufheiz- und Abkühlphase, als auch nach dem Abkühlen ist jeweils eine schwingende Raumlufttemperaturkurve zu sehen. Wie bereits im Voraus erläutert resultiert dieses Verhalten aus der thermischen Trägheit des eingesetzten Rippenrohrheizkörpers.

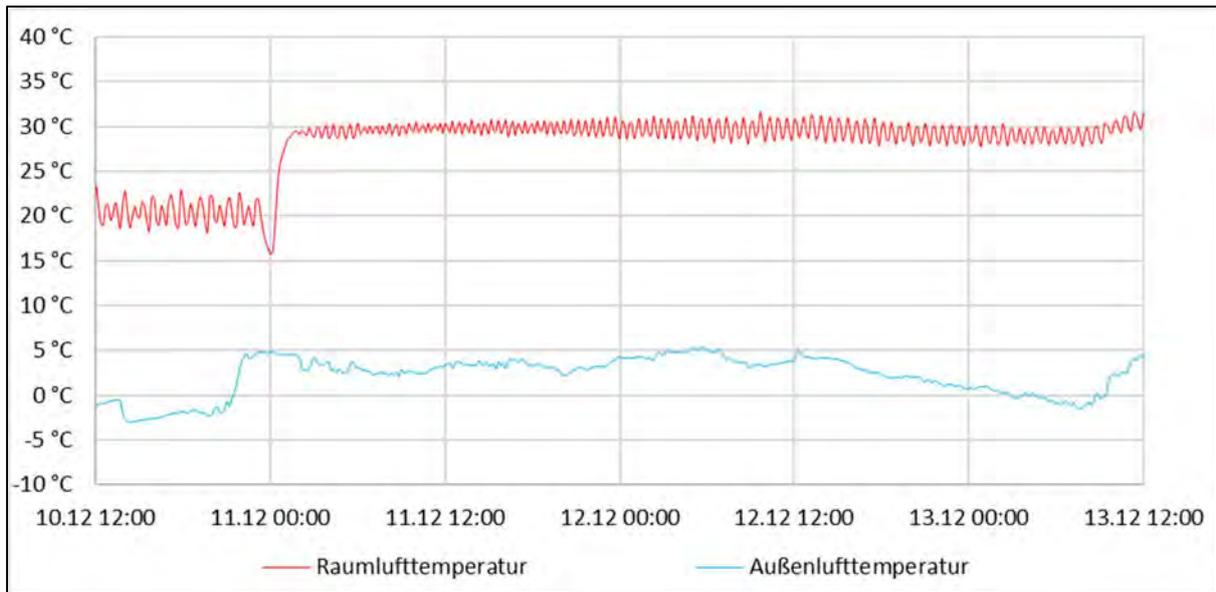


Abbildung 77: Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus

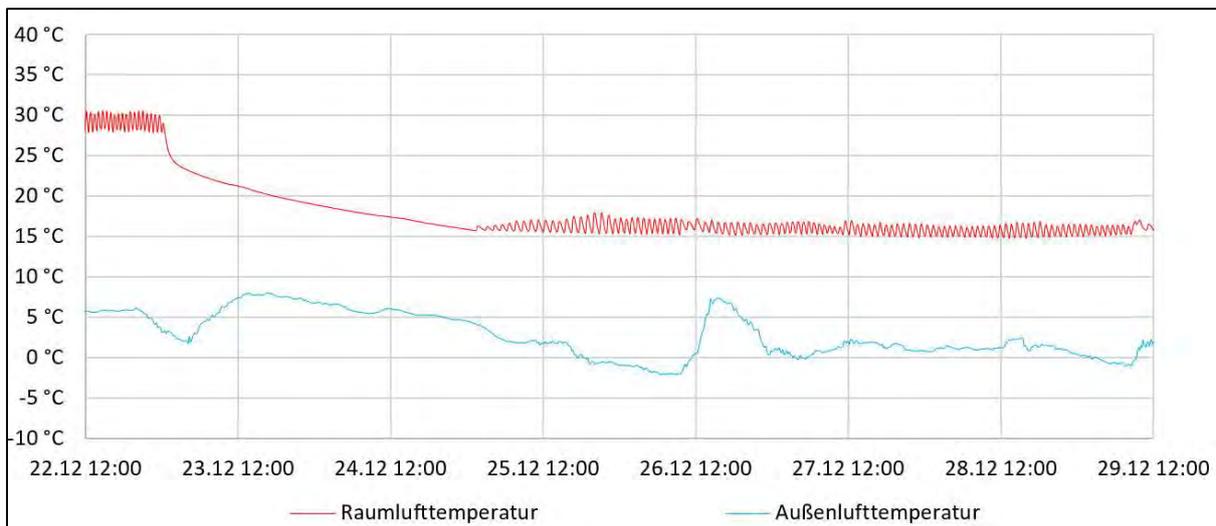


Abbildung 78: Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus

Zur Auswertung der thermischen Vorgänge im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus während der künstlichen Aufheiz- bzw. Abkühlperiode können die nachfolgenden Abbildungen 79 und 80 verwendet werden.

Die Abbildung 79 zeigt den Aufheizvorgang der Nord-Ost-Außenwand über die ersten 64 h. Ähnlich wie die Raumlufte nimmt die Temperatur der raumseitigen Oberfläche während der ersten Stunden schnell zu. Bereits nach acht Stunden hat sich die raumseitige Holzoberfläche um 5,9 K erwärmt. Die Aufheizung des Wandquerschnitts verlangsamt sich jedoch mit voranschreitender Zeit, da die antreibende Temperaturdifferenz zwischen der Raumlufte und dem Bauteil abnimmt.

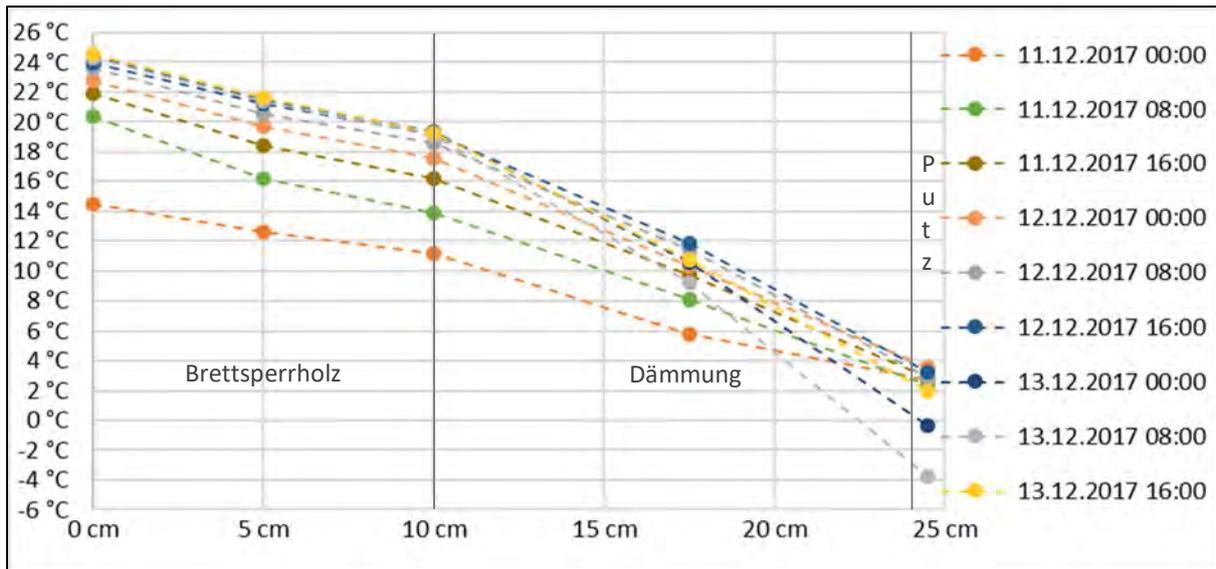


Abbildung 79: Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsper Holz-Kubus

Während der Abkühlphase, die in der folgenden Abbildung 80 für die Nord-Ost-Außenwand grafisch aufbereitet ist, kommt es ebenfalls zunächst zu einem schnellen Temperaturwechsel im Innenbereich des Wandquerschnitts, der sich mit voranschreitender Zeit verlangsamt. Die Temperatur nimmt ab, wobei die Absenkung von der Raum- bzw. Innenseite ausgehend wieder im Bereich der raumseitigen Holzoberfläche wesentlich flacher im Vergleich zur Außendämmung erfolgt.

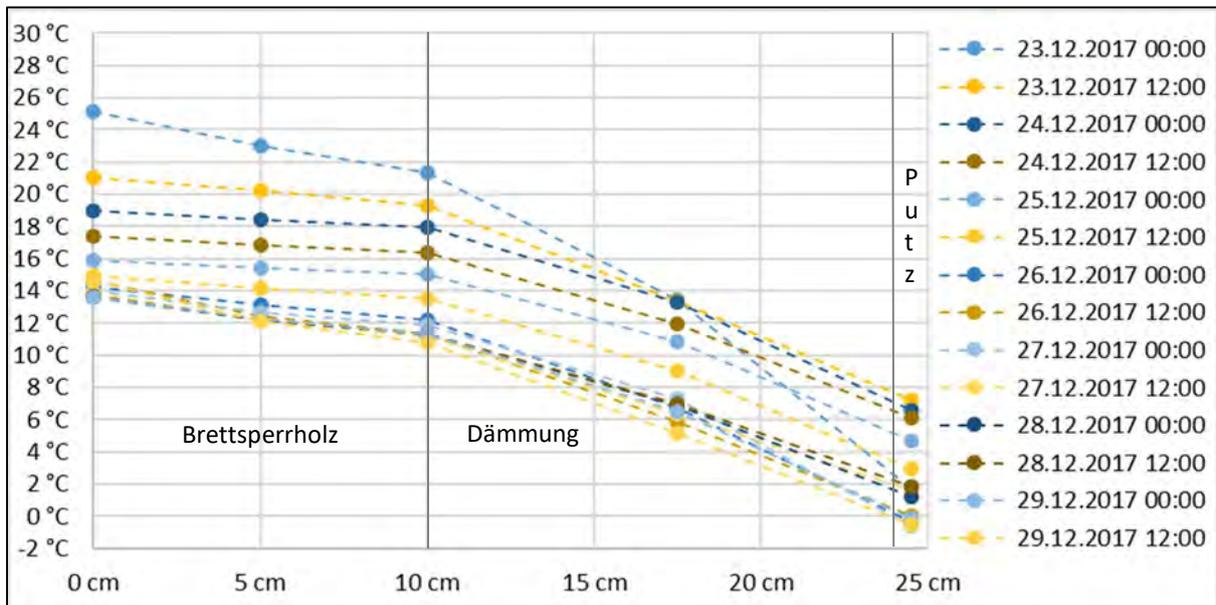


Abbildung 80: Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsper Holz-Kubus

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Nachtabenkung der Heizung auf eine Soll-Raumlufttemperatur von 16 °C im Zeitraum zwischen 23 Uhr und 6 Uhr wurden die Messdaten aus zwei Wochen im Winter (28.01.18 bis 11.02.18) herangezogen.

Mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 81 ist während der betrachteten beiden Winterwochen mit Nachtabenkung der Heizung ein Aufschaukeln des nächtlichen Raumlufttemperaturabfalls zu sehen. Aufgrund der begrenzten thermischen Speichermasse ist bei einer Nachtabenkung zwischen 23:00 h und 06:00 h im Brettsperrholzkubus in jeder Nacht des betrachteten Zeitraums eine Reaktion der Heizung zu sehen. In den beiden Nächten zwischen dem 28.01 und dem 30.01 muss aufgrund der milden Außentemperaturen erst in der zweiten Nachthälfte geheizt werden. In den darauffolgenden Nächten, sinkt die Außentemperatur unter 0 °C und es muss annähernd durchweg geheizt werden.

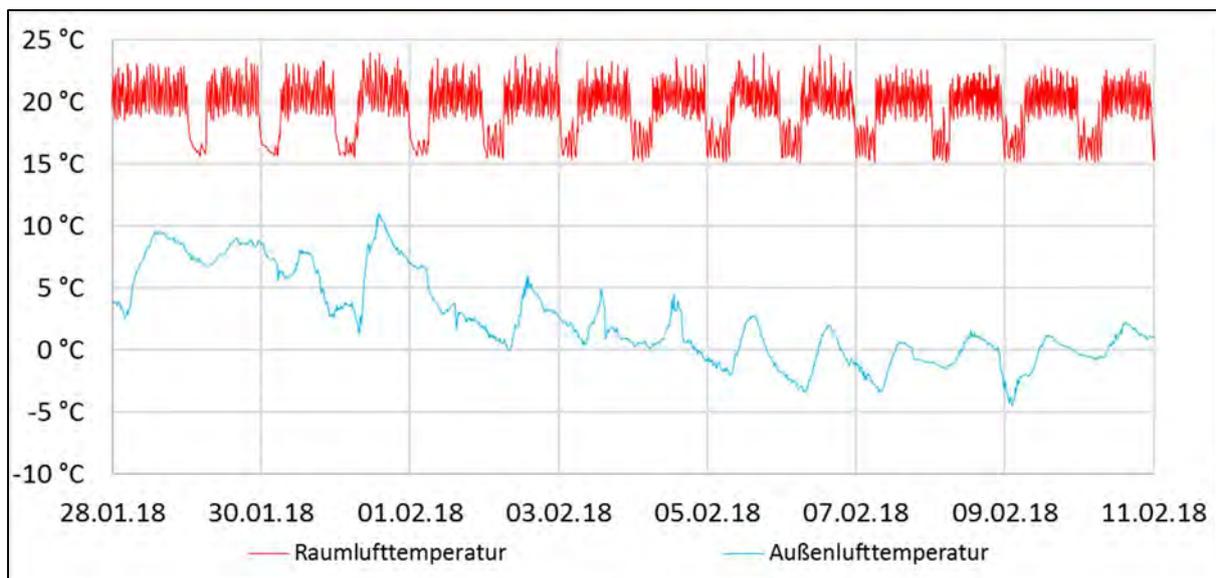


Abbildung 81: Nachtabenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus

Die folgende Abbildung 82 zeigt die zu dem vorangegangenen Diagramm zugehörigen Temperaturen im Wandquerschnitt der Nord-Ost-Außenwand bei Nachtabenkung der Heizung über elf Tage während der Winterzeit (29.01.18 6 Uhr bis 09.02.18 6 Uhr).

Im dargestellten Winterzeitraum ist zu erkennen, dass die Temperatur an der raumseitigen Holzoberfläche regelmäßig morgens um 06:00 Uhr, am Ende der Nachtabenkung, deutlich gefallen ist. Der Unterschied zwischen dem wärmsten Morgen (15,8 °C am 30.01.18) und dem kältesten Morgen (13,8 °C am 08.02.18) beträgt 2,1 K. Mit dem über mehrere Tage kälter gewordenen Außenklima, hat sich der Wandquerschnitt langsam ausgekühlt.

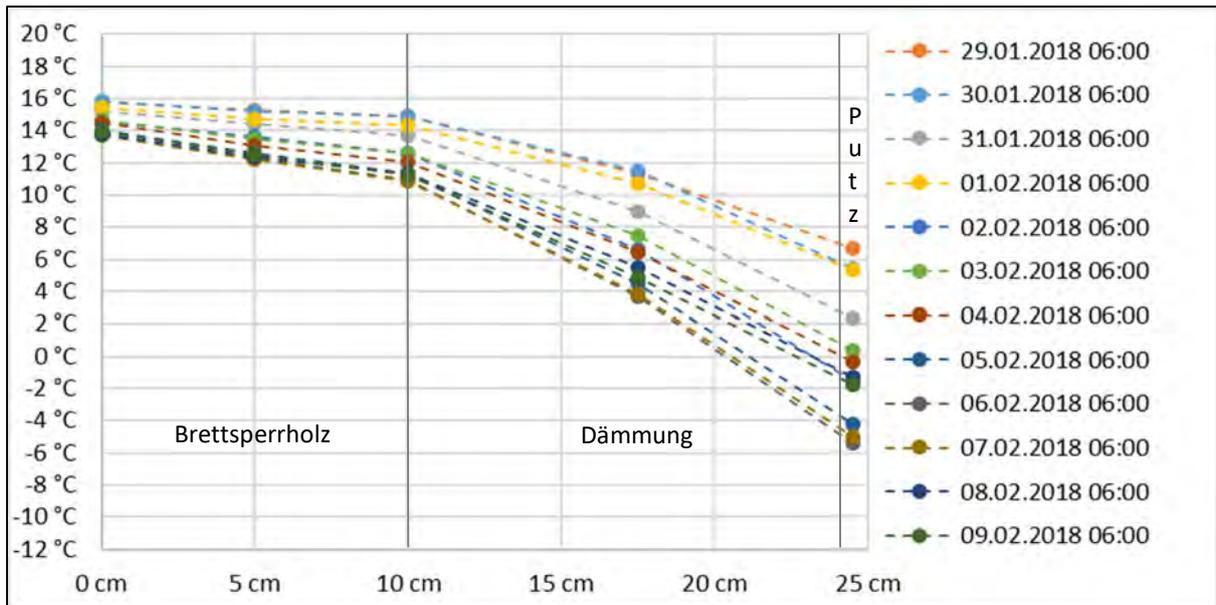


Abbildung 82: Nachtabsenkung der Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsper Holz-Kubus

Die nachstehende Abbildung 83 bildet den Energieverbrauch des Brettsper Holz-Kubus im Zeitraum vom 20.09.17 bis zum 28.02.18 ab. Gemessen wurden während dieser Zeit alle internen Wärmeeinträge in den Kubus durch technische Geräte. Dazu zählen der Stromverbrauch des Rippenrohrheizkörpers, der Messtechnik, der Regelungsbox und der künstlichen Beleuchtung. Die Steigung der Kurve entspricht der elektrischen Wirkleistung aller elektrischer Verbraucher im Kubus die zur Erwärmung des Kubus-Inneren beitragen. Einzig die Leistungsaufnahme des Außenwandabluftventilators wird nicht mitgemessen, da dessen Abwärme vollständig außerhalb der thermischen Hülle des Kubus umgesetzt wird und nicht zum Wärmehaushalt des Kubus beiträgt.

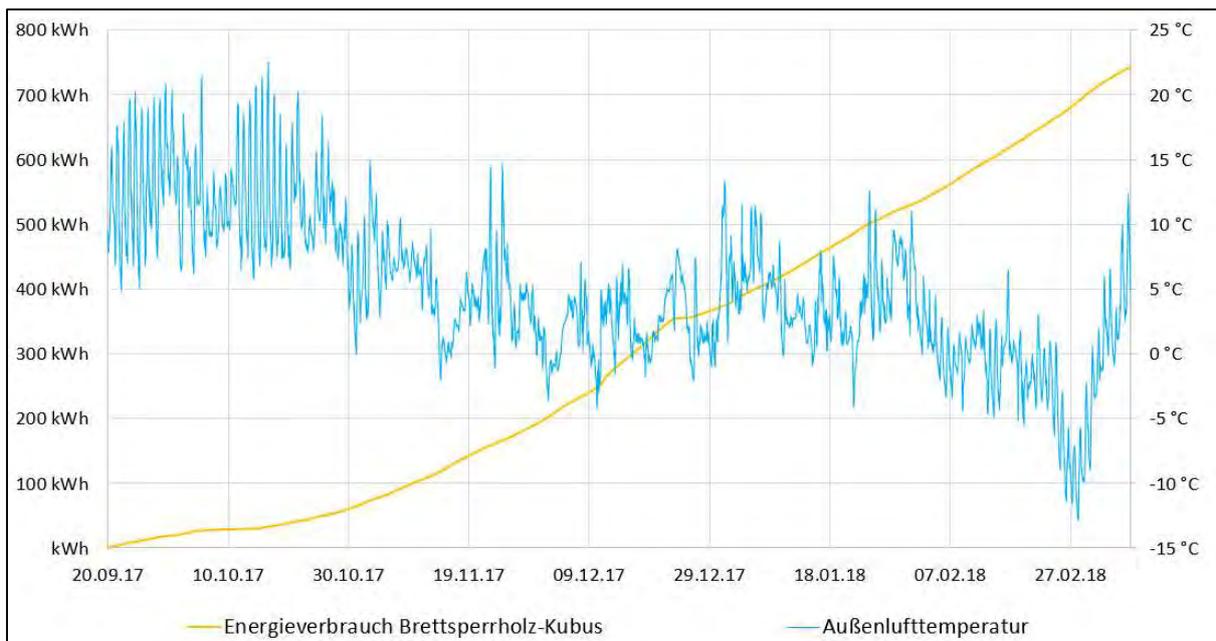


Abbildung 83: Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch des Brettsper Holz-Kubus

In dem vorangestellten Diagramm ist zu sehen, dass bis Anfang November der Anstieg der Heizenergie-Verbrauchskurve flacher im Vergleich zur Folgezeit verläuft, weil die Heizung während der Übergangszeit vom Sommer zum Winter nur temporär im Einsatz war um das Erreichen der vorgegebenen Soll-Raumlufttemperatur zu gewährleisten. Auffällig ist der steile Verlauf vom 11.12.17 bis einschließlich dem 22.12.2017. Hier wurde der Kubus bei Außenlufttemperaturen zwischen 0 °C und 5 °C auf 30 °C Raumlufttemperatur geheizt. Die anschließende Abkühlphase auf 16 °C dauerte vom 23.12.17 um 00:00 Uhr bis zum 25.12.17 um 03:00 Uhr. Während dieser Abkühlphase wurde für die Heizung keine Energie aufgewendet.

5.3 Kuben-Simulationen + Abgleich Messdaten und Simulationsergebnisse

Unter Verwendung der Software SketchUp 2017 und TRNSYS 18 wurde für den Ziegel-, den Porenbeton- und den Kalksandstein-Kubus jeweils ein Simulationsmodell erstellt.

Diese Modelle basieren auf dem TRNSYS-Type 56 (Building), wobei unter Verwendung von Type 62 (TRNSYS / Excel Coupling) die in der Realität gemessenen Raumlufttemperaturen und Luftwechsel als Soll-Werte in den Simulationen erfasst wurden. Hinsichtlich der Wetterdaten wurde auf die messtechnisch erfassten Klimaparameter sowie auf aktuelle Meteonorm-Daten speziell zur detaillierten Erfassung der Direkt- und Diffusstrahlung zurückgegriffen. Auf Grund des monolithischen Aufbaus der verbauten Porenbeton- und Kalksandstein-Mauersteine wurden diese Baustoffe im Simulationswandaufbau jeweils als eine Schicht berücksichtigt. Das eingesetzte Ziegel-Produkt (siehe Abbildung 18) wurde hingegen auf Basis der Kennwerte der bauaufsichtlichen Zulassung als 3-schichtiges Material erfasst mit erhöhter wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ in den Randbereichen wegen eines großen Scherbenanteils und niedrigerer wirksamer Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} und Wärmeleitfähigkeit λ im Mittelteil auf Grund eines überwiegenden Dämmanteils.

Das eingesetzte Simulationsprogramm TRNSYS wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach erfolgreich validiert. Das Gebäudemodell (Type 56) erfüllt beispielsweise die Anforderungen des ANSI/ASHRAE Standards 140-2001 [19]. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Software bei korrekter Nutzeranwendung aussagekräftige Ergebnisse liefert.

Die nachfolgenden Abbildungen 84 bis 95 zeigen für unterschiedliche Zeiträume für alle drei untersuchten Kuben einen Vergleich zwischen gemessener und simulierter Raumlufttemperatur.

Es ist eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulationen festzustellen. Auffällig ist der teilweise schnelle Anstieg und Abfall der gemessenen Raumlufttemperaturen an Vormittagen durch direkte Sonneneinstrahlung auf die Messsensoren auf Grund von nicht optimal platzierten Strahlungsschutzschirmen.

Quantitativ gesehen sind insbesondere im Sommer Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Raumlufttemperaturkurven zu verzeichnen (siehe Abbildung 94), deren Ursache mit Rahmen weiterer detaillierter Untersuchungen noch erforscht wird.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Simulationsmodelle zu den Kuben ausreichend gut mittels realen Messwerten verifiziert werden konnten und somit als Grundlage für eine Simulationsvariantenuntersuchung am Beispiel eines repräsentativen Mehrfamilienhauses herangezogen werden können.

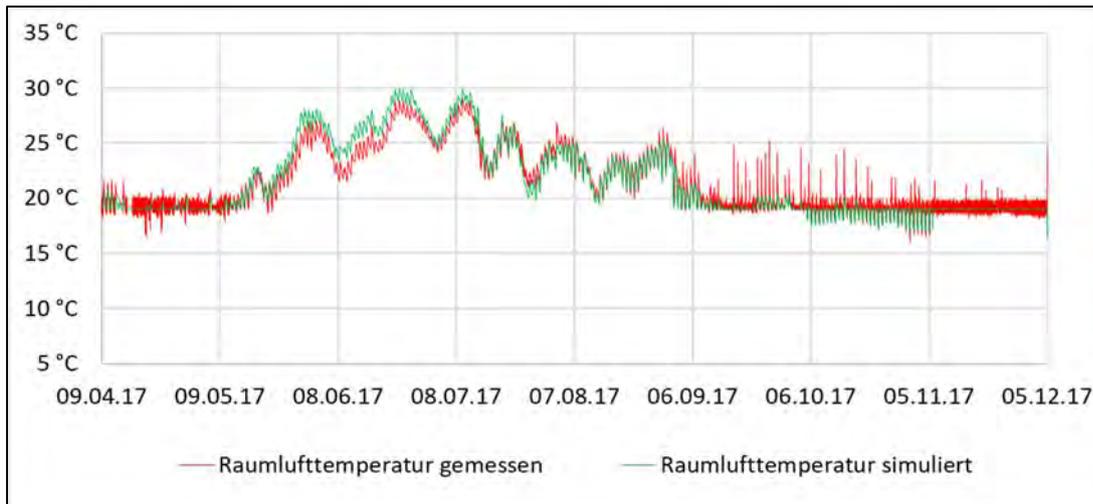


Abbildung 84: Jahresverlauf – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

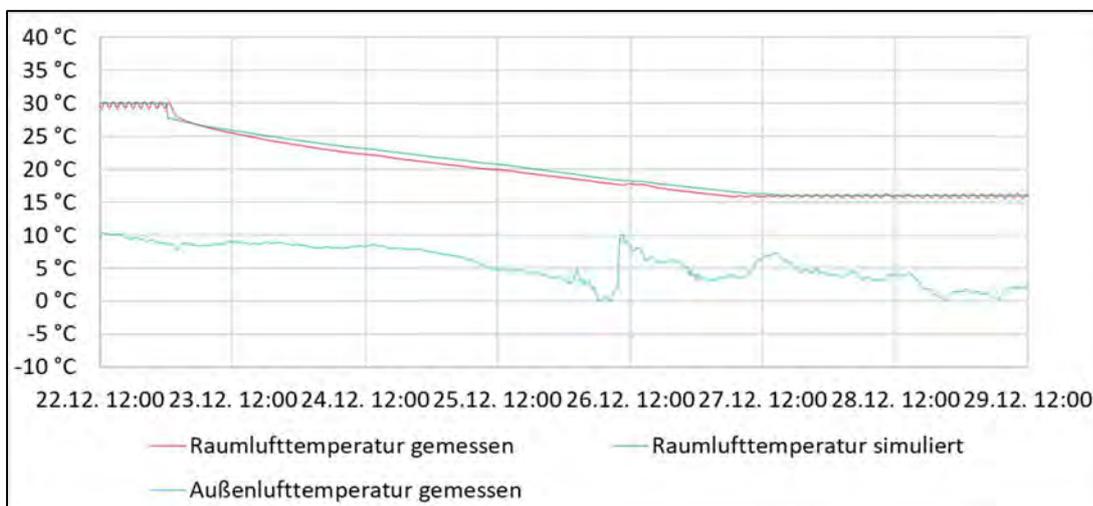


Abbildung 85: Künstliches Abkühlen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

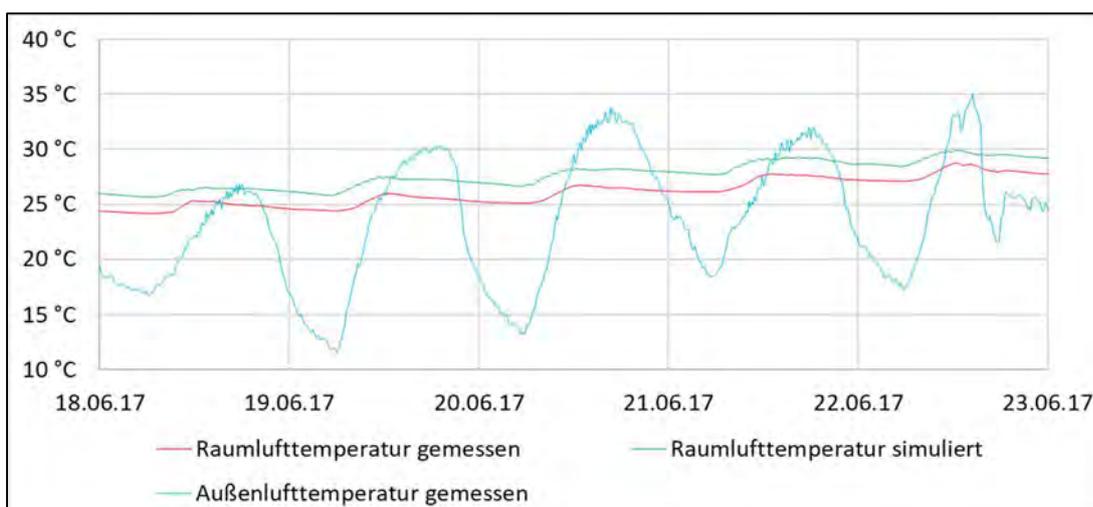


Abbildung 86: Sommerliches Aufheizen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

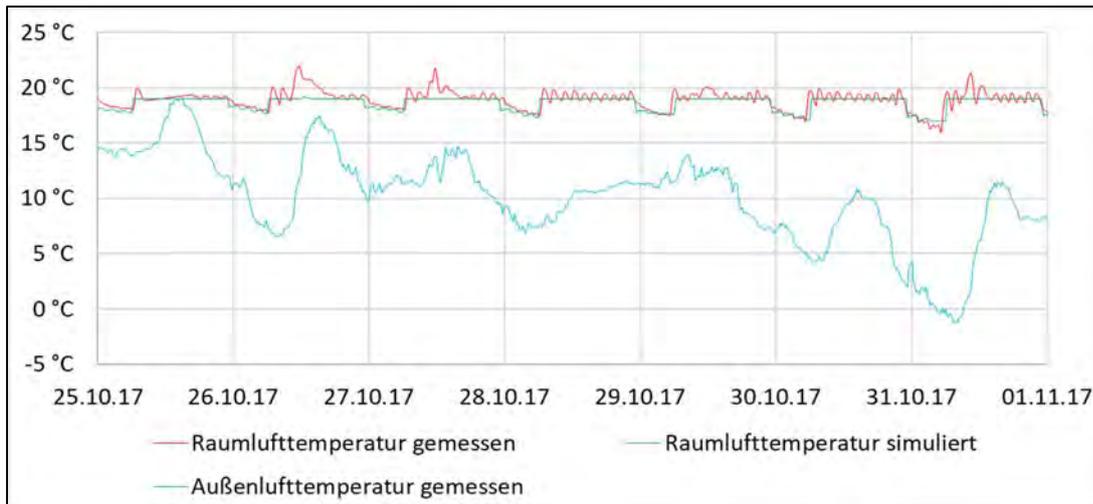


Abbildung 87: Nachtab senkung Heizung in Übergangszeit – gemessene und simulierte Raumlufthtemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus

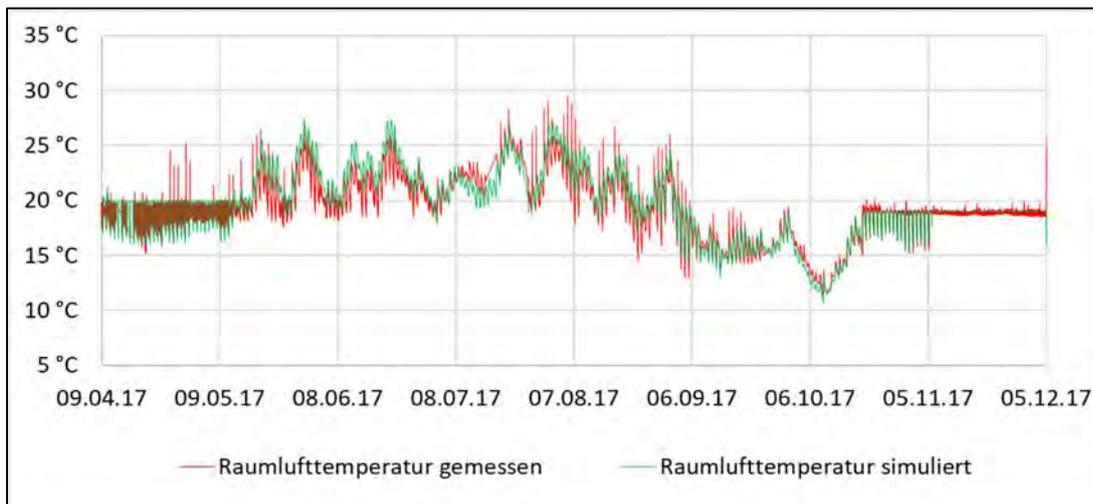


Abbildung 88: Jahresverlauf – gemessene und simulierte Raumlufthtemperatur für den Porenbeton-Kubus

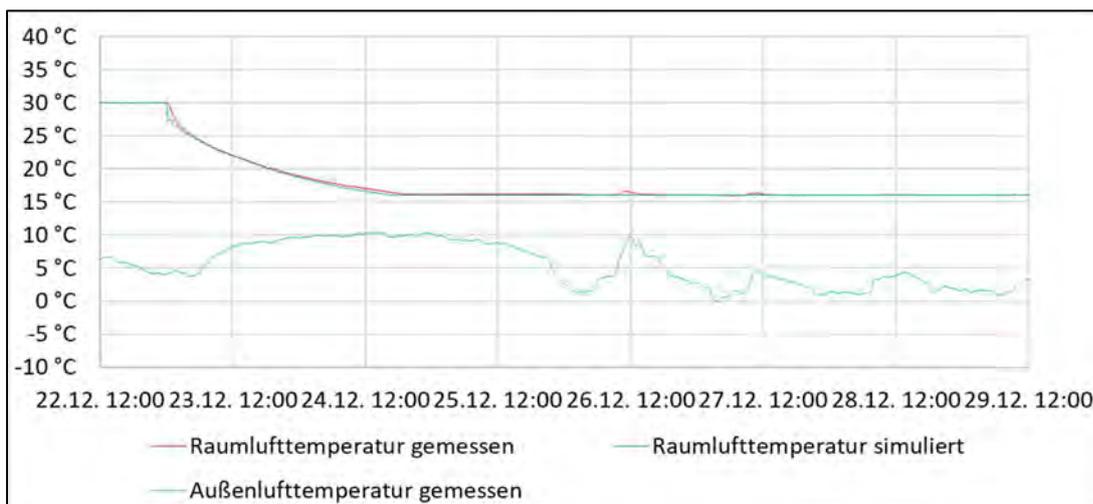


Abbildung 89: Künstliches Abkühlen – gemessene und simulierte Raumlufthtemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

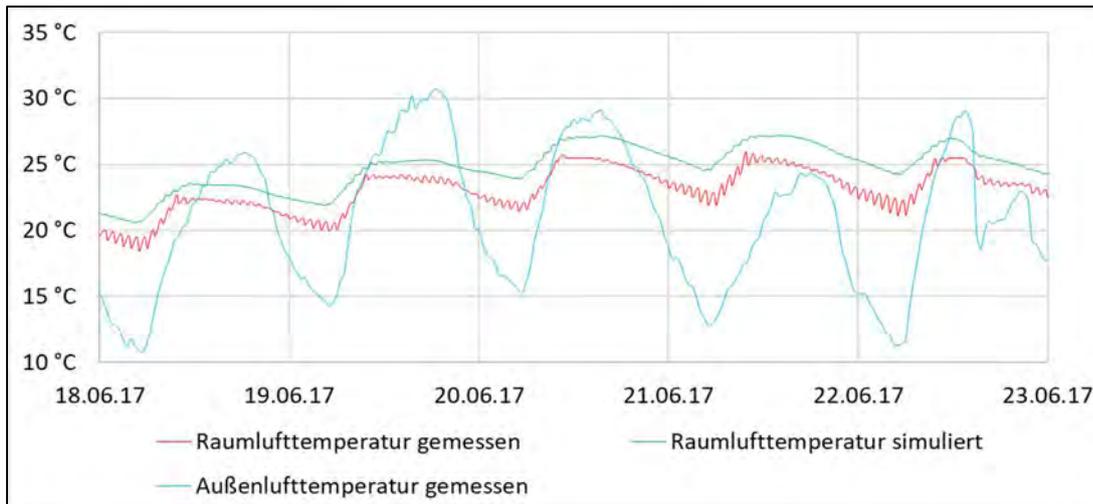


Abbildung 90: Sommerliches Aufheizen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

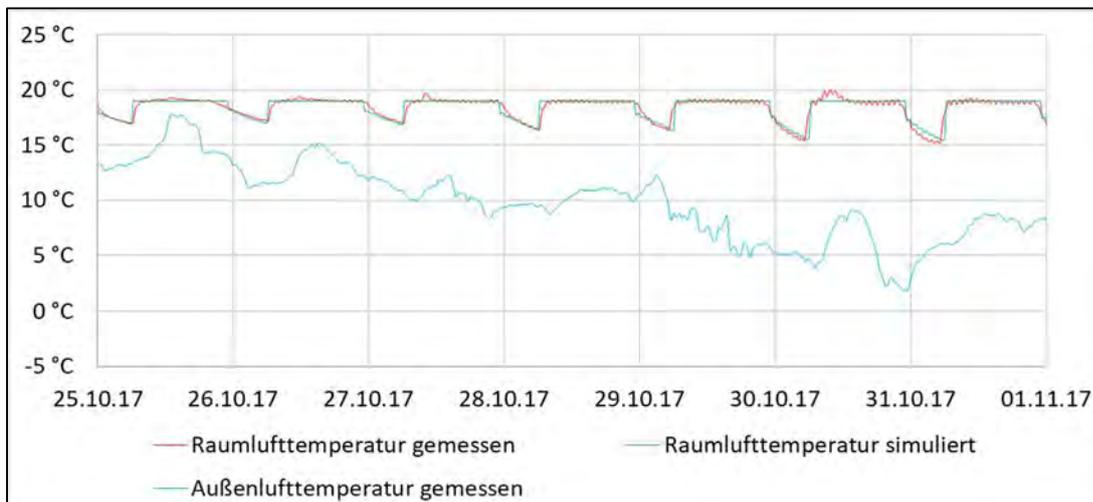


Abbildung 91: Nachtab senkung Heizung in Übergangszeit – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus

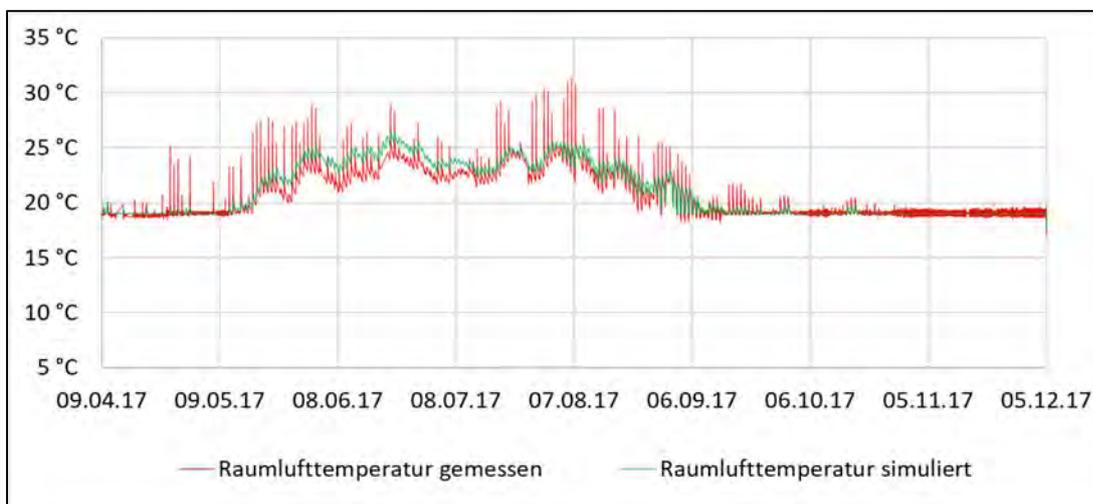


Abbildung 92: Jahresverlauf – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

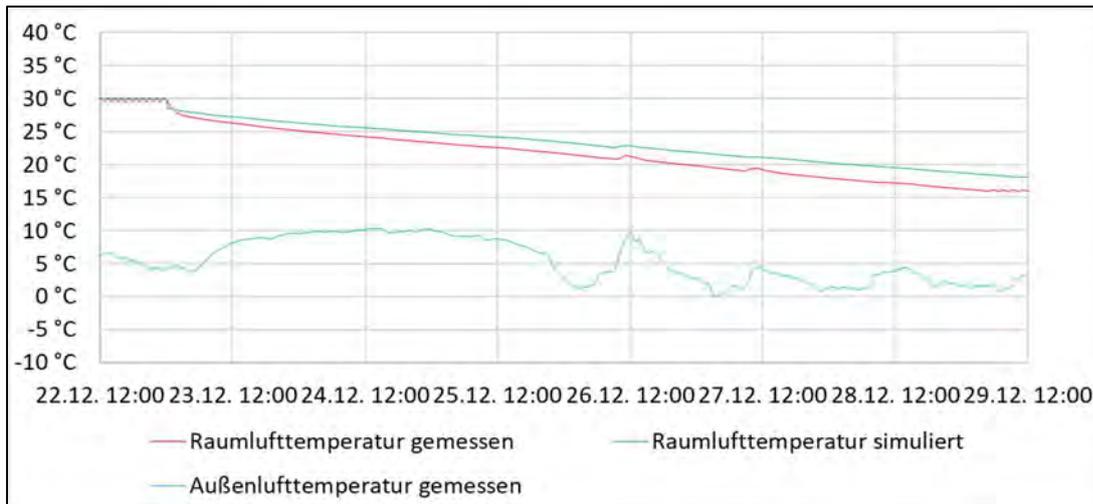


Abbildung 93: Künstliches Abkühlen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

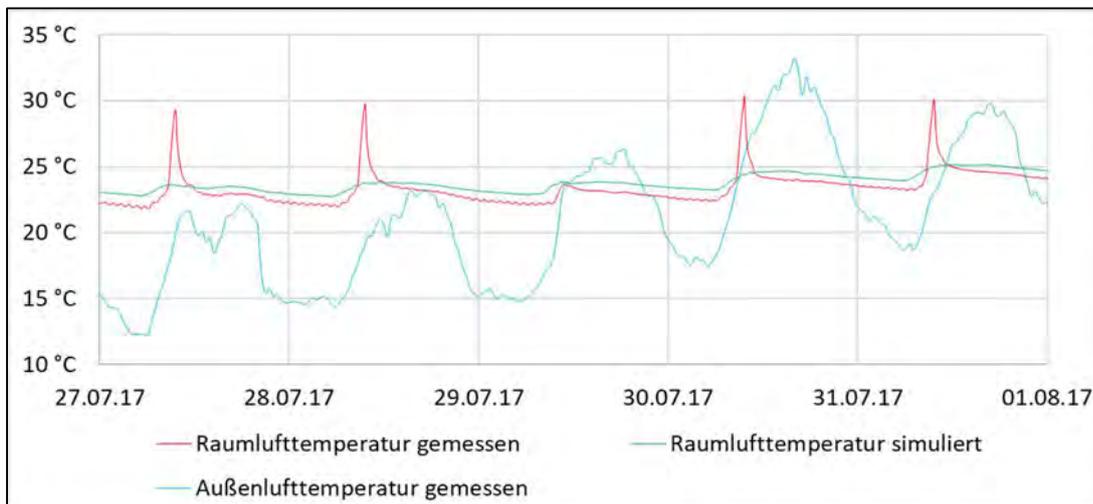


Abbildung 94: Sommerliches Aufheizen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

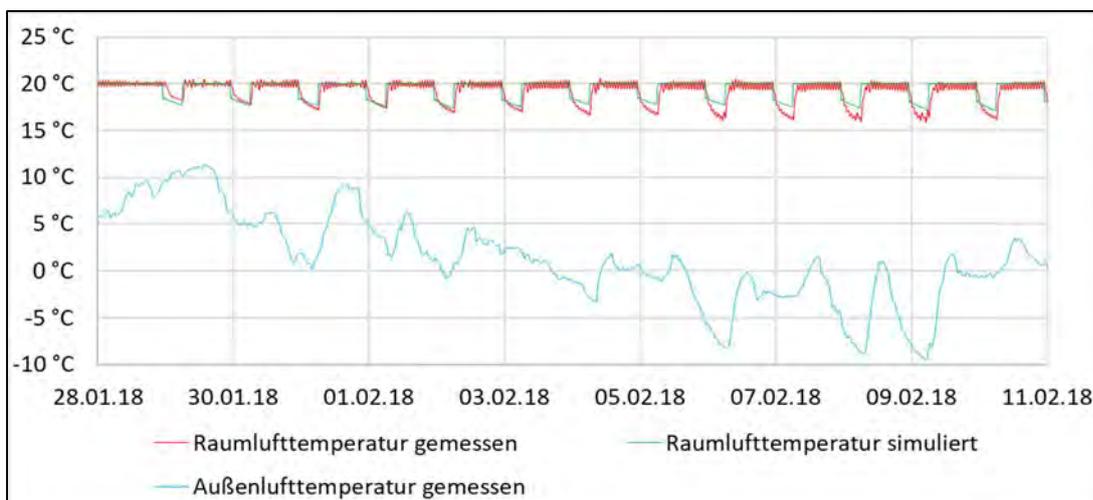


Abbildung 95: Nachtabsenkung Heizung im Winter – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus

6 Simulation eines Modellgebäudes

Zur Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex wurden thermische Simulationen für ein repräsentatives Mehrfamilienhaus erstellt. Die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE//eV) hat mit dem "Typengebäude^{MFH}" ein solches Modellgebäude entworfen, welches im Rahmen dieses Forschungsprojektes verwendet wurde. Dieses Beispielgebäude stellt das repräsentative Mittel für optimierten Mehrfamilienwohnungsbau in der aktuellen Baupraxis dar und wurde u.a. auf Basis von statistischen Auswertungen und Marktbeobachtungen erarbeitet. [20]

Entsprechend den nachfolgenden Abbildungen 96 bis 100 handelt es sich bei dem Modell-Mehrfamilienhaus um ein freistehendes 6-geschossiges Gebäude mit insgesamt 12 Wohneinheiten mit überwiegend je 3 bis 4 Wohnräumen und einer durchschnittlichen Wohnungsgröße von ca. 73 m². Das Gebäude ist unterkellert und weist ein Staffelgeschoss aus.



Abbildung 96: Ansicht Eingang (Ost) – Typengebäude^{MFH} [20]

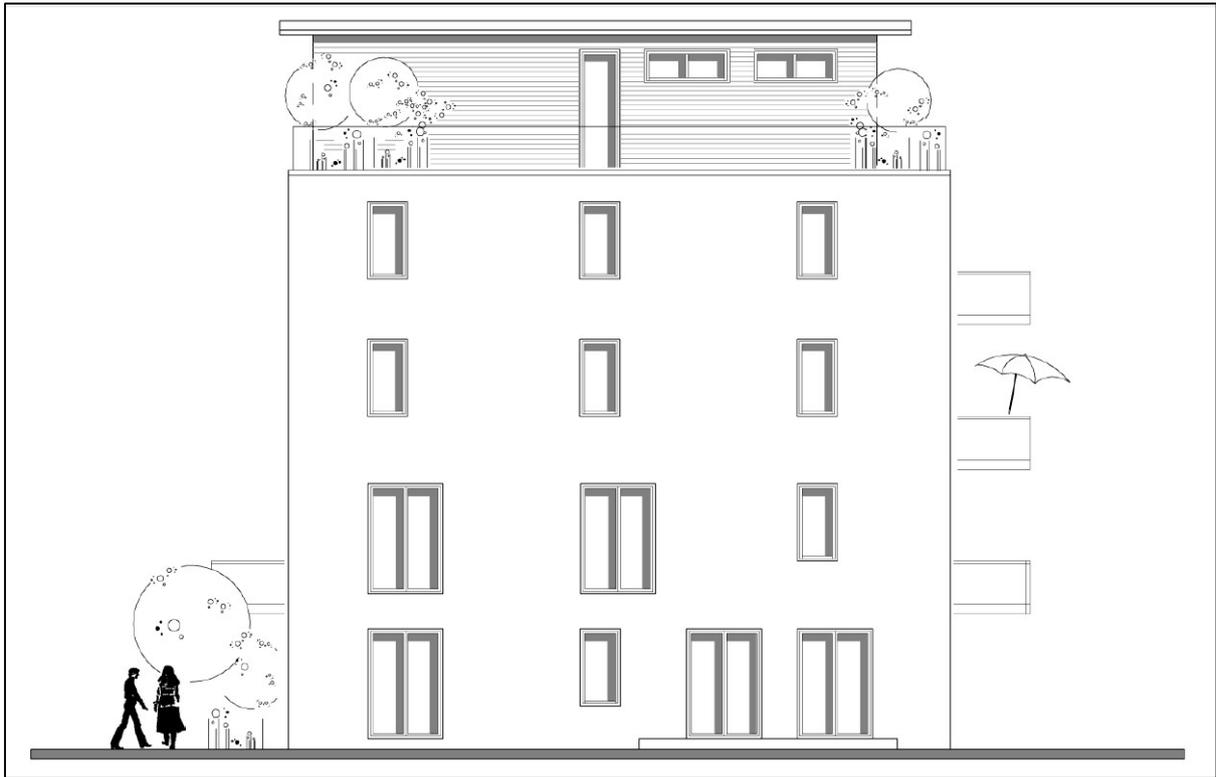


Abbildung 97: Ansicht Seite 1 (Nord) – Typengebäude^{MFH} [20]

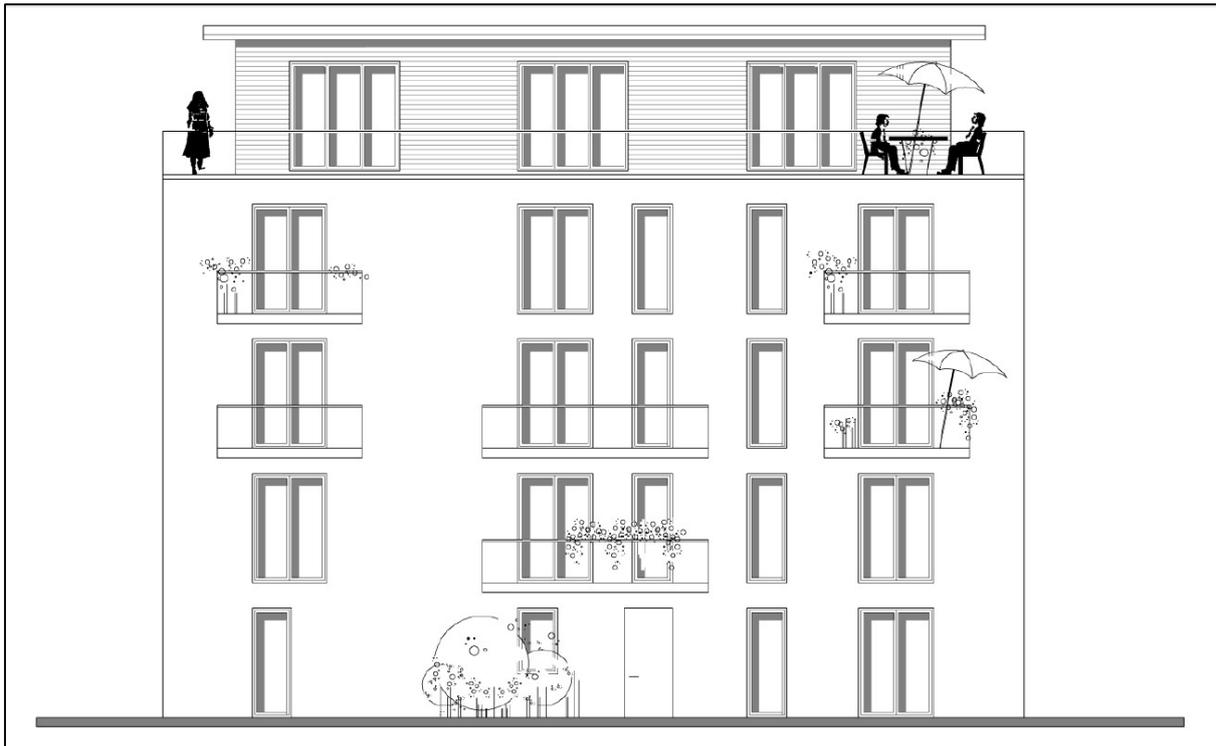


Abbildung 98: Ansicht Garten (West) – Typengebäude^{MFH} [20]

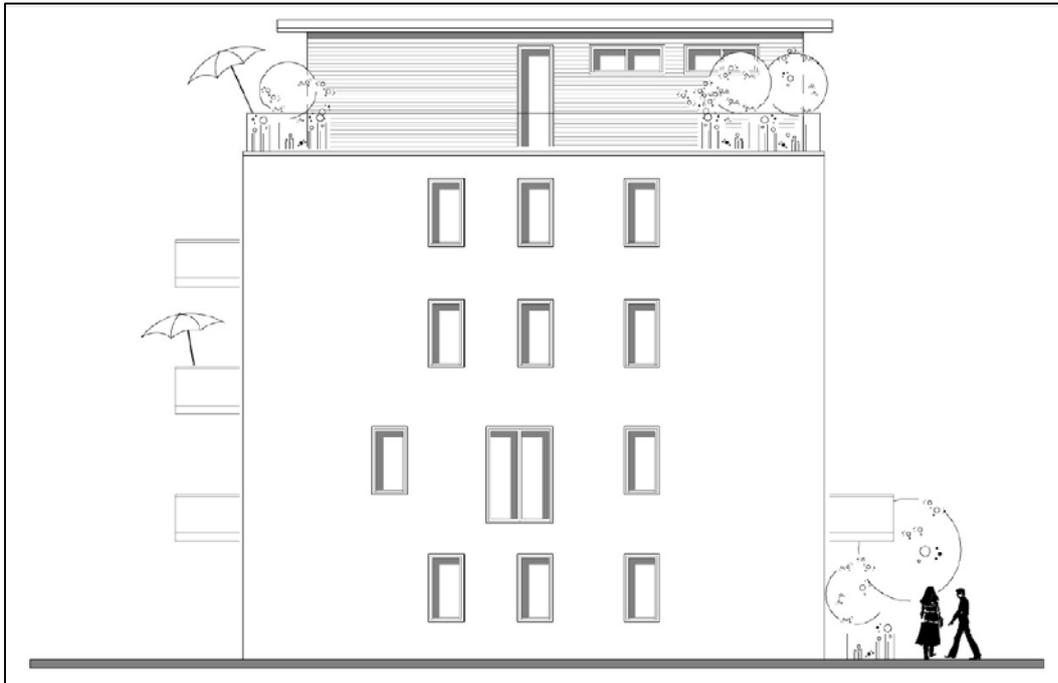


Abbildung 99: Ansicht Seite 2 (Süd) – Typengebäude^{MFH} [20]

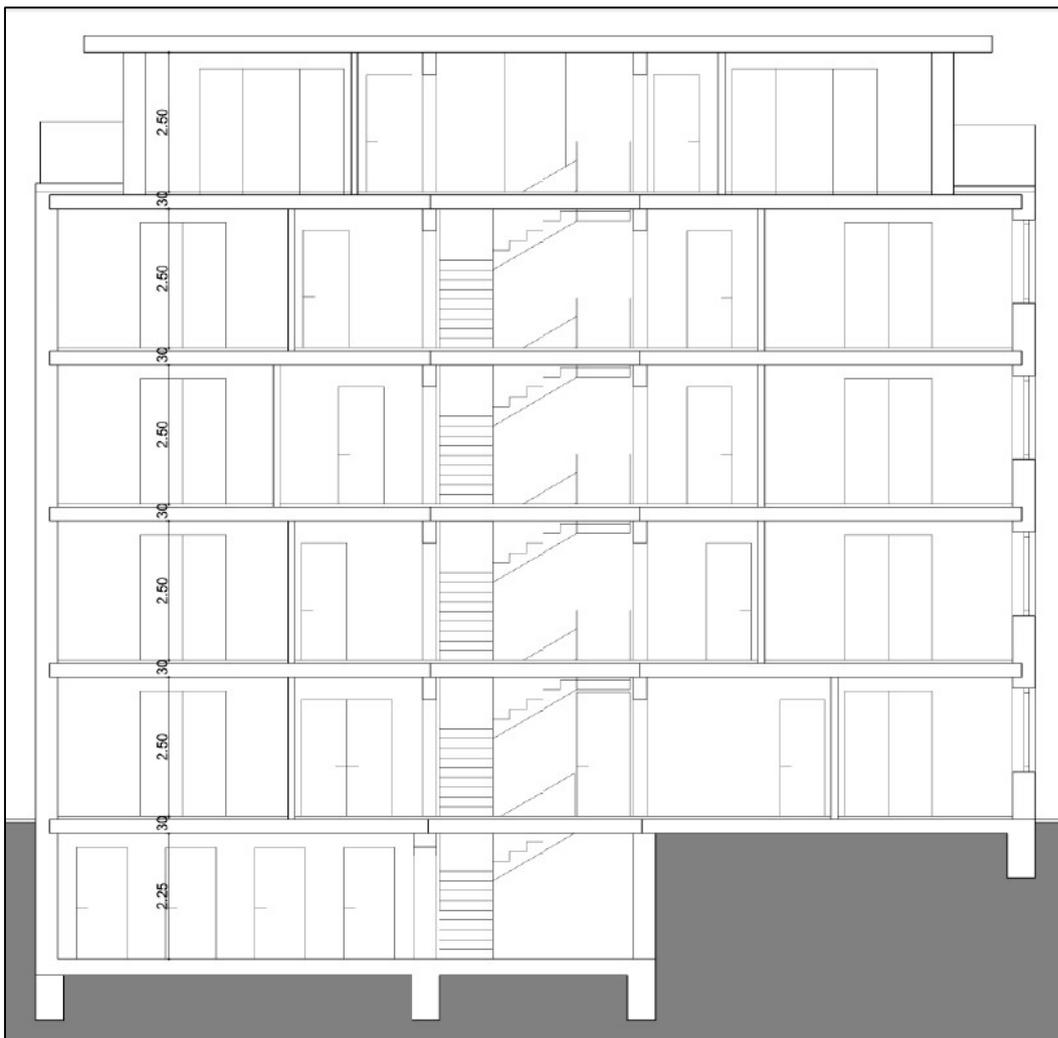


Abbildung 100: Schnitt – Typengebäude^{MFH} [20]

Unter Verwendung der Software SketchUp 2017 und TRNSYS 18 wurde ein vereinfachtes Simulationsmodell für das Beispiel-Mehrfamilienhaus erstellt. Im Vergleich zum Originalentwurf wurde entsprechend der folgenden Abbildung 101 angesetzt, dass das Gebäude nicht unterkellert ist, kein Staffelgeschoss aufweist und aus drei Vollgeschossen besteht. Hinsichtlich der Ausrichtung wurde festgelegt, dass die Eingangsfassade mit integriertem Treppenhaus nach Osten orientiert ist.

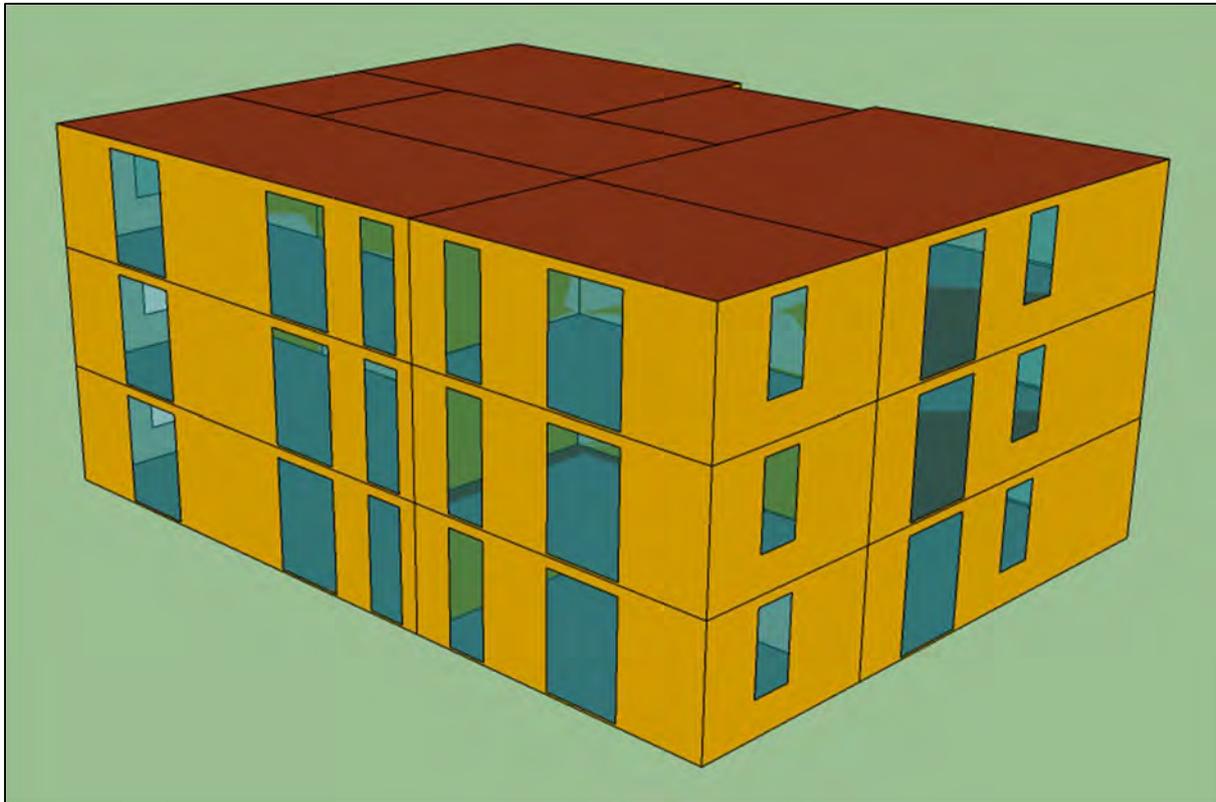


Abbildung 101: Simulationsmodell – Typengebäude^{MFH}

Bei der Festlegung der Simulationsrandbedingungen wurde sich an den Vorgaben von DIN 4108-2 [12] und DIN V 18599-10 [21] orientiert.

Da das Modellgebäude für Wohnzwecke vorgesehen ist, wurde eine tägliche Nutzungszeit von 0 Uhr bis 24 Uhr angesetzt.

Als Standort wurde Potsdam ausgewählt, da diese Stadt der Referenzort bei der Ermittlung der Energieeffizienz entsprechend der EnEV 2016 [10] ist.

Als Klimadatensatz wurde das im Jahr 2011 vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) zu Potsdam zugehörige Testreferenzjahr "Normaljahr TRY-Zone 4" hinterlegt.

Die Simulationsberechnungen wurden jeweils für ein komplettes Jahr durchgeführt mit Beginn am 1. Januar an einem Montag um 0 Uhr.

Als mittlere interne Wärmeeinträge wurden auf Grund der Nutzung des Beispielgebäudes zu Wohnzwecken $100 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ (bezogen auf die Nettogrundfläche) berücksichtigt. Diese wurden als konstante konvektive Wärmeeinträge definiert.

Die festgelegte Soll-Raumlufttemperatur für Heizzwecke beträgt $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hinsichtlich des Grundluftwechsels wurde ein im Tagesverlauf konstanter Wert in Höhe von $0,5 \text{ h}^{-1}$ angesetzt, sofern die Bedingungen für einen erhöhten Tagluftwechsel und/oder für einen erhöhten Nachtluftwechsel nicht erfüllt waren. Lag die Raumlufttemperatur über $23 \text{ }^\circ\text{C}$ und oberhalb der Außenlufttemperatur, wurde ein auf 3 h^{-1} erhöhter Tagluftwechsel zwischen 6 Uhr und 23 Uhr berücksichtigt, sofern ein Sonnenschutz aktiviert war. Betrug die Raumlufttemperatur mehr als $21 \text{ }^\circ\text{C}$ und mehr als die Außenlufttemperatur, wurde im Zeitraum von 23 Uhr bis 6 Uhr ein erhöhter Nachtluftwechsel von $2,0 \text{ h}^{-1}$ angesetzt.

Bezüglich der Steuerung des Sonnenschutzes wurde ganzjährig von einer windunabhängigen automatisch geregelten strahlungsabhängigen Betriebsweise ausgegangen. Für nordorientierte Fenster wurde eine Grenzbestrahlungsstärke von $200 \text{ W}/\text{m}^2$ definiert. Für alle anderen Fensterausrichtungen wurden $300 \text{ W}/\text{m}^2$ festgelegt. Mit dem Erreichen dieser Schwellenwerte wurde im Simulationsmodell bei Ansatz von Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz der Einsatz einer außenliegenden Sonnenschutzvorrichtung mit einem Abminderungsfaktor FC von 0,30 ausgelöst.

Für die Berechnung des vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD wurde entsprechend DIN EN ISO 7730 [16] ein Wärmedurchlasswiderstand der Bekleidung von 0,7 clo und ein Energieumsatz durch körperliche Tätigkeit von 1,2 met angesetzt.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt für die in der nachstehenden Abbildung 102 farblich gekennzeichneten beiden Räume im 1. Obergeschoss des Modell-Mehrfamilienhauses. Diese werden im weiteren Textverlauf als Süd-West-Raum und Nord-Raum bezeichnet.

Die Auswahl des Süd-West-Raumes erfolgte insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Außenwände mit 25 % einen großen Fensterflächenanteil aufweisen und dass durch die Süd-West-Orientierung eine erhebliche thermische Belastung durch Sonneneinstrahlung zu erwarten ist. Somit bildet dieser Raum eine gute Grundlage um insbesondere Aussagen zum Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den sommerlichen Wärmeschutz und die thermische Behaglichkeit treffen zu können.

Im Gegensatz dazu sind für den Nord-Raum auf Grund der Fassadenausrichtung insbesondere im Winter nur sehr geringe solare Einträge und daraus folgend ein erhöhter Energiebedarf zu erwarten. Der Fensterflächenanteil von 38 % wird auf Grund eines hohen U-Wertes im Vergleich zu einer Neubau-Außenwand aus Sicht des winterlichen Wärmeschutzes auch als negativ einwirkend angesehen. Deshalb bildet dieser Raum eine gute Grundlage um insbesondere Aussagen zum Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Nutzenergiebedarf für Heizen und die thermische Behaglichkeit treffen zu können. Vereinfacht wurde im Simulationsmodell angesetzt, dass der Nord-Raum einen rechteckigen Grundriss mit einer Grundfläche von $10,89 \text{ m}^2$ ($3,69 \text{ m} \times 2,95 \text{ m}$) aufweist.

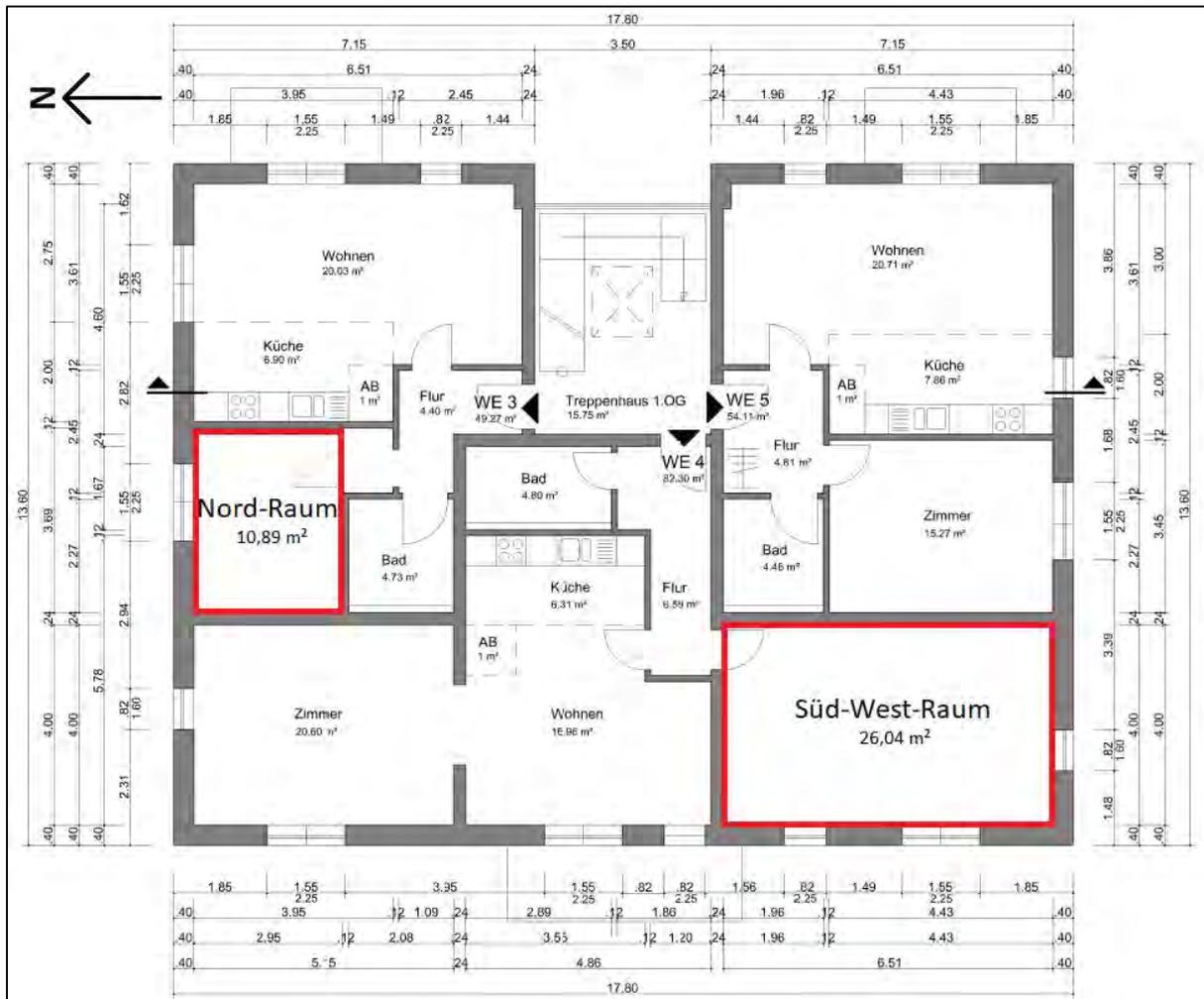


Abbildung 102: Grundriss 1.OG – Typengebäude^{MFH} (in Anlehnung an [20])

Zum einen wurden im Rahmen der Simulationsberechnungen die Konstruktionen der opaken Bauteile der untersuchten Räume variiert. Bei der Auswahl der anzusetzenden Bauteilaufbauten wurde zum einen darauf geachtet, dass die einzelnen Konstruktionen nach Möglichkeit eine ähnliche wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} je m^2 Bauteilfläche aufweisen und dass diese praxistauglich sind. Bei der Ermittlung von C_{wirk} wurden die Vorgaben entsprechend DIN EN ISO 13786 [8, 9] beachtet (10-cm-Regel – siehe Kapitel 3). Zum anderen wurde beachtet, dass zur Vergleichbarkeit alle berücksichtigten Außenbauteile einen einheitlichen Wärmedurchgangskoeffizienten U besitzen. Insgesamt wurden die in den nachfolgenden Tabellen 5 bis 20 zusammengefassten Bauweisen mit Kalksandstein-, Ziegel-, Porenbeton- und Holzbauwänden sowie Stahlbeton-, Ziegel-, Porenbeton- und Holzbalkendecken berechnet. Die detaillierten Bauteilaufbauten können dem Anhang 4 entnommen werden. Mit Hilfe der getroffenen Auswahl kann die komplette Bandbreite an Bauschwerkclassen von $50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ (leicht) bis $130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ (schwer) nach DIN V 18599-2 [11] abgedeckt werden.

Tabelle 5: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	58,9	512
Außenwand W	10,93	58,9	644
Innenwand N	8,00	57,4	459
Innenwand O	16,27	57,4	933
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 5079 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 195 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 6: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	58,9	337
Innenwand O	7,38	57,4	423
Innenwand S	7,22	57,4	414
Innenwand W	7,38	57,4	423
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2657 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 244 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 7: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	48,9	425
Außenwand W	10,93	48,9	534
Innenwand N	8,00	47,6	381
Innenwand O	16,27	47,6	775
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 4647 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 178 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 8: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	48,9	280
Innenwand O	7,38	47,6	352
Innenwand S	7,22	47,6	344
Innenwand W	7,38	47,6	352
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2386 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 219 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 9: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	21,4	186
Außenwand W	10,93	21,4	234
Innenwand N	8,00	42,8	342
Innenwand O	16,27	42,8	696
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 3989 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 153 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 10: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	21,4	123
Innenwand O	7,38	42,8	316
Innenwand S	7,22	42,8	309
Innenwand W	7,38	42,8	316
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2122 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 195 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 11: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	21,4	186
Außenwand W	10,93	21,4	234
Innenwand N	8,00	24,6	196
Innenwand O	16,27	24,6	399
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 3547 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 136 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 12: Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	21,4	123
Innenwand O	7,38	24,6	181
Innenwand S	7,22	24,6	177
Innenwand W	7,38	24,6	181
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1721 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 158 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 13: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 3

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	21,4	186
Außenwand W	10,93	21,4	234
Innenwand N	8,00	24,6	196
Innenwand O	16,27	24,6	399
Decke	26,04	23,6	615
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2498 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 96 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 14: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 3

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	21,4	123
Innenwand O	7,38	24,6	181
Innenwand S	7,22	24,6	177
Innenwand W	7,38	24,6	181
Decke	10,89	23,6	257
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1282 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 118 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

Tabelle 15: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	12,0	104
Außenwand W	10,93	12,0	131
Innenwand N	8,00	19,7	158
Innenwand O	16,27	19,7	320
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 3245 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 125 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

Tabelle 16: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	12,0	69
Innenwand O	7,38	19,7	145
Innenwand S	7,22	19,7	142
Innenwand W	7,38	19,7	145
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1560 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 143 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

Tabelle 17: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	12,0	104
Außenwand W	10,93	12,0	131
Innenwand N	8,00	19,7	158
Innenwand O	16,27	19,7	320
Decke	26,04	15,3	398
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1979 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 76 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 18: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	12,0	69
Innenwand O	7,38	19,7	145
Innenwand S	7,22	19,7	142
Innenwand W	7,38	19,7	145
Decke	10,89	15,3	166
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1031 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 95 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 19: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Leichtbauweise

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	11,3	99
Außenwand W	10,93	11,3	124
Innenwand N	8,00	4,6	37
Innenwand O	16,27	4,6	75
Decke	26,04	24,8	646
Fußboden	26,04	6,6	171
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1151 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 44 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 20: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Leichtbauweise

Bauteil	Fläche [m ²]	C' wirk [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	11,3	65
Innenwand O	7,38	4,6	34
Innenwand S	7,22	4,6	33
Innenwand W	7,38	4,6	34
Decke	10,89	24,8	270
Fußboden	10,89	6,6	71
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 508 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 47 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Zum anderen wurden unterschiedliche Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz angesetzt. In einer Variante wurde für alle Fenster (Gesamtenergiedurchlassgrad $g = 0,60$) ganzjährig eine automatisch strahlungsabhängig geregelte außenliegende Sonnenschutzvorrichtung mit einem Abminderungsfaktor FC von 0,30 berücksichtigt. Diese Maßnahme entspricht einer gängigen Praxis zur Erfüllung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2 [12]. Jedoch lässt eine solche praxisnahe Variante nur geringe Rückschlüsse hinsichtlich der sommerlichen Überhitzung und der thermischen Behaglichkeit zu. Deshalb wurde eine weitere Variante ohne jegliche Sonnenschutzmaßnahmen untersucht.

Insgesamt wurden 16 unterschiedliche Varianten (8 Bauweisen 1x mit und 1x ohne Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz) simuliert. Für jede Variante wurde jeweils für den Süd-West- und den Nord-Raum der jährliche Nutzenergiebedarf für Heizen pro m² Nettogrundfläche, die sommerliche Überhitzung und der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD (Beschreibung siehe Kapitel 5.2.1) berechnet. Bei dem Nutzenergiebedarf für Heizen handelt es sich um die erforderliche Menge an Nutzenergie zur Sicherstellung einer Mindesttemperatur von 20 °C im betrachteten Mehrfamilienhaus. Die berechnete sommerliche Überhitzung bezieht sich entsprechend des angesetzten Gebäudestandortes Potsdam auf die Sommerklima-Region B mit einer operativen Grenztemperatur von 26 °C gemäß DIN 4108-2 [12]. Ein jährlich gemittelter PPD wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit als nur eingeschränkt aussagekräftig angesehen. Deshalb wurde zusätzlich für alle Varianten auch ein mittlerer PPD für den Winter (November bis März), den Sommer (Juni bis September) und die Übergangszeit zwischen Winter und Sommer (April, Mai, Oktober) berechnet.

Die Simulationsergebnisse sind im folgenden Kapitel 7 zusammengefasst.

7 Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind in den nachstehenden Tabellen 21 bis 28 zusammengefasst.

Tabelle 21: Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

Variante	Nutzenergiebedarf für Heizen S-W-Raum [kWh/(m ² a)]	Nutzenergiebedarf für Heizen N-Raum [kWh/(m ² a)]
Kalksandstein-Bauweise 1	54,5	52,9
Kalksandstein-Bauweise 2	54,7	53,2
Ziegel-Bauweise 1	55,0	53,4
Ziegel-Bauweise 2	55,2	54,4
Ziegel-Bauweise 3	55,3	54,8
Porenbeton-Bauweise 1	55,7	55,2
Porenbeton-Bauweise 2	55,3	55,6
Leichtbauweise	57,1	58,1

Tabelle 22: Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

Variante	sommerliche Überhitzung S-W-Raum [Kh/a]	sommerliche Überhitzung N-Raum [Kh/a]
Kalksandstein-Bauweise 1	149	527
Kalksandstein-Bauweise 2	120	414
Ziegel-Bauweise 1	211	732
Ziegel-Bauweise 2	232	917
Ziegel-Bauweise 3	332	993
Porenbeton-Bauweise 1	357	1644
Porenbeton-Bauweise 2	781	2431
Leichtbauweise	1641	4019

Tabelle 23: Simulationsergebnisse PPD (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West-Raum

Variante	PPD Jahr [%]	PPD Winter [%]	PPD Sommer [%]	PPD Übergang [%]
Kalksandstein-Bauweise 1	15,0	19,9	10,4	13,0
Kalksandstein-Bauweise 2	14,8	19,9	9,9	13,1
Ziegel-Bauweise 1	15,1	19,9	10,7	13,1
Ziegel-Bauweise 2	15,1	19,9	10,8	13,2
Ziegel-Bauweise 3	15,4	19,9	11,3	13,3
Porenbeton-Bauweise 1	15,5	19,9	11,5	13,4
Porenbeton-Bauweise 2	16,2	19,8	13,7	13,6
Leichtbauweise	17,4	19,8	16,9	14,2

Tabelle 24: Simulationsergebnisse PPD (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Nord-Raum

Variante	PPD Jahr [%]	PPD Winter [%]	PPD Sommer [%]	PPD Übergang [%]
Kalksandstein-Bauweise 1	15,8	19,5	13,8	12,3
Kalksandstein-Bauweise 2	15,5	19,5	12,9	12,5
Ziegel-Bauweise 1	16,1	19,5	14,8	12,5
Ziegel-Bauweise 2	16,5	19,5	15,6	12,8
Ziegel-Bauweise 3	16,6	19,5	15,6	13,0
Porenbeton-Bauweise 1	17,6	19,5	18,6	13,3
Porenbeton-Bauweise 2	18,7	19,5	21,4	13,9
Leichtbauweise	20,6	19,4	25,8	15,4

Tabelle 25: Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

Variante	Nutzenergiebedarf für Heizen S-W-Raum [kWh/(m ² a)]	Nutzenergiebedarf für Heizen N-Raum [kWh/(m ² a)]
Kalksandstein-Bauweise 1	56,8	56,5
Kalksandstein-Bauweise 2	56,8	56,5
Ziegel-Bauweise 1	57,0	56,6
Ziegel-Bauweise 2	57,1	56,9
Ziegel-Bauweise 3	57,3	56,9
Porenbeton-Bauweise 1	57,4	57,3
Porenbeton-Bauweise 2	57,1	57,0
Leichtbauweise	58,6	59,2

Tabelle 26: Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

Variante	sommerliche Überhitzung S-W-Raum [Kh/a]	sommerliche Überhitzung N-Raum [Kh/a]
Kalksandstein-Bauweise 1	0	0
Kalksandstein-Bauweise 2	0	0
Ziegel-Bauweise 1	0	0
Ziegel-Bauweise 2	0	0
Ziegel-Bauweise 3	0	0
Porenbeton-Bauweise 1	0	0
Porenbeton-Bauweise 2	1	0
Leichtbauweise	68	21

Tabelle 27: Simulationsergebnisse PPD (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West-Raum

Variante	PPD Jahr [%]	PPD Winter [%]	PPD Sommer [%]	PPD Übergang [%]
Kalksandstein-Bauweise 1	14,6	19,9	7,9	14,8
Kalksandstein-Bauweise 2	14,6	19,9	7,9	14,8
Ziegel-Bauweise 1	14,4	19,9	7,4	14,6
Ziegel-Bauweise 2	14,4	19,9	7,5	14,6
Ziegel-Bauweise 3	14,5	19,9	7,7	14,5
Porenbeton-Bauweise 1	14,4	19,9	7,6	14,5
Porenbeton-Bauweise 2	14,4	19,9	8,0	14,2
Leichtbauweise	14,8	19,8	9,3	13,8

Tabelle 28: Simulationsergebnisse PPD (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Nord-Raum

Variante	PPD Jahr [%]	PPD Winter [%]	PPD Sommer [%]	PPD Übergang [%]
Kalksandstein-Bauweise 1	14,6	19,5	8,1	15,2
Kalksandstein-Bauweise 2	14,6	19,5	8,1	15,2
Ziegel-Bauweise 1	14,4	19,5	7,4	15,0
Ziegel-Bauweise 2	14,4	19,5	7,5	15,0
Ziegel-Bauweise 3	14,4	19,5	7,8	14,9
Porenbeton-Bauweise 1	14,4	19,6	7,7	15,0
Porenbeton-Bauweise 2	14,4	19,5	7,9	14,8
Leichtbauweise	14,7	19,5	8,9	14,3

In den nachfolgenden Kapiteln 7.1 bis 7.3 werden die Simulationsergebnisse grafisch aufbereitet und textlich ausgewertet.

7.1 Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Nutzenergiebedarf für Heizen

Die folgenden Abbildungen 103 und 104 zeigen den mit Hilfe von Simulationen berechneten Nutzenergiebedarf für Heizen für alle untersuchten Varianten.

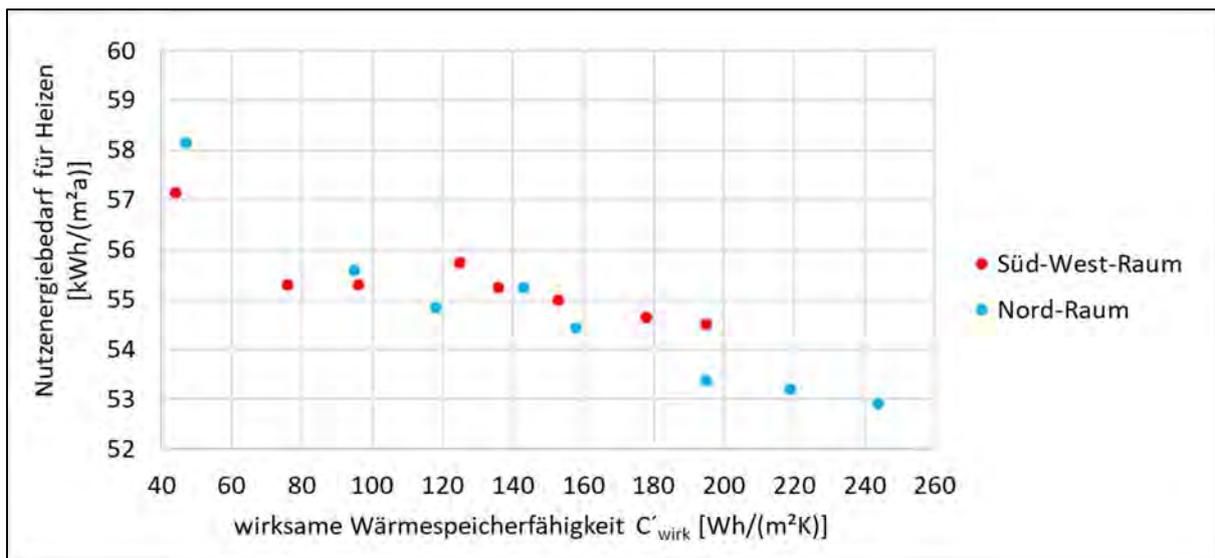


Abbildung 103: Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

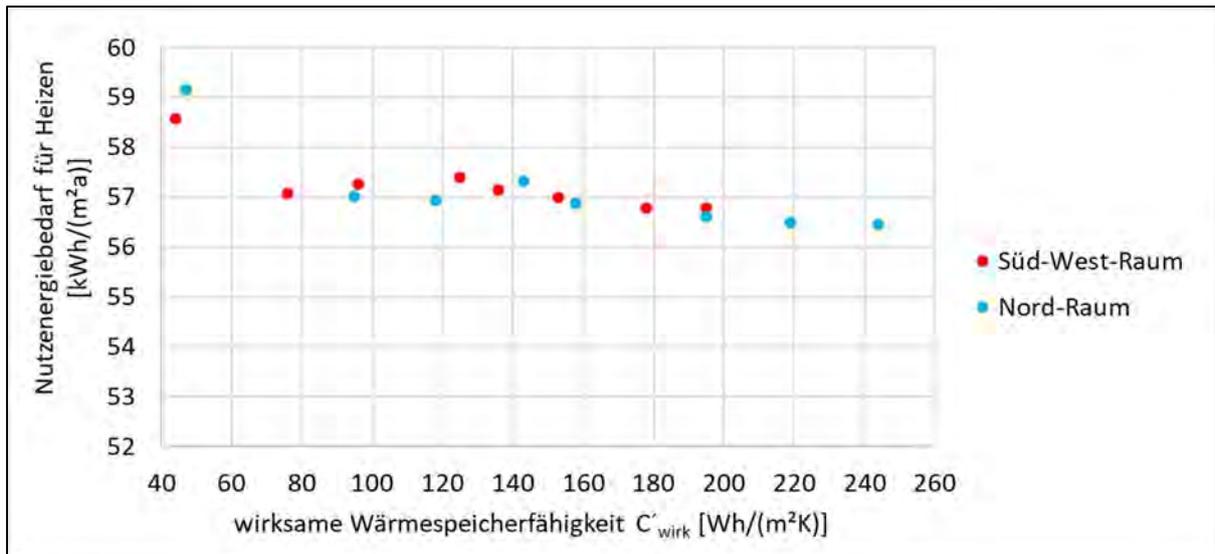


Abbildung 104: Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

Insgesamt weisen die Varianten mit sommerlichen Wärmeschutz einen erhöhten Energiebedarf auf. Die Ursache liegt darin, dass durch den Einsatz einer außenliegenden Sonnenschutzvorrichtung die solaren Wärmegewinne in den untersuchten Räumen eingeschränkt werden und somit insbesondere während der Übergangszeit zwischen Sommer und Winter durch künstliche Beheizung mehr Wärme für ein behagliches Innenraumklima bereitgestellt werden muss.

In den Diagrammen ist die Tendenz zu erkennen, dass unabhängig von möglichen baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz der Nutzenergiebedarf für Heizen umso niedriger ist, je höher die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} ist. Es zeichnet sich ein stärkerer Einfluss bei Verzicht von Sonnenschutzvorrichtungen ab. Bei den simulierten Varianten ohne sommerlichen Wärmeschutz beträgt der Unterschied zwischen schwerster (Kalksandstein-Bauweise 1) und leichtester (Leichtbauweise) untersuchter Bauweise für beide Räume grundflächenbezogen gemittelt 6 %. Bei Ansatz von baulichen Maßnahmen zur Vermeidung einer sommerlichen Überhitzung ergibt sich eine mittlere Abweichung von 4 %.

Entsprechend den nachstehenden Abbildungen 105 und 106 resultiert die Nutzenergiebedarfs-Differenz für Heizen zwischen der schwersten und der leichtesten simulierten Bauweise aus der Übergangszeit zwischen Winter und Sommer. Die Ursache wird darin gesehen, dass Bauteile mit einer hohen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} im Vergleich zu Leichtbaukonstruktionen thermische Träger sind und somit weniger schnell auskühlen, wenn das Außenklima und die internen Wärmelasten zeitweise nicht mehr ausreichen um ein behagliches Raumklima zu gewährleisten. Dadurch muss bei Vorhandensein von schweren Bauteilen insbesondere in der Übergangszeit weniger geheizt werden. Dieser Zusammenhang zwischen Bauweise und thermischer Trägheit hat sich im Rahmen der Kuben-Messungen (siehe Kapitel 5.2) gezeigt.

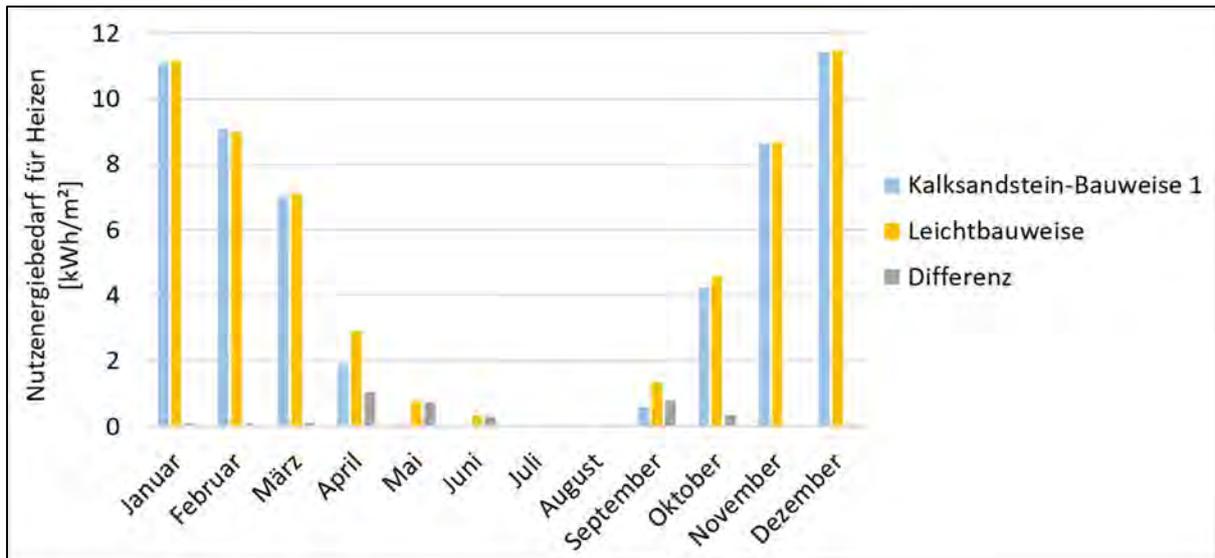


Abbildung 105: Simulationsergebnisse monatlicher Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – beide Räume gemittelt

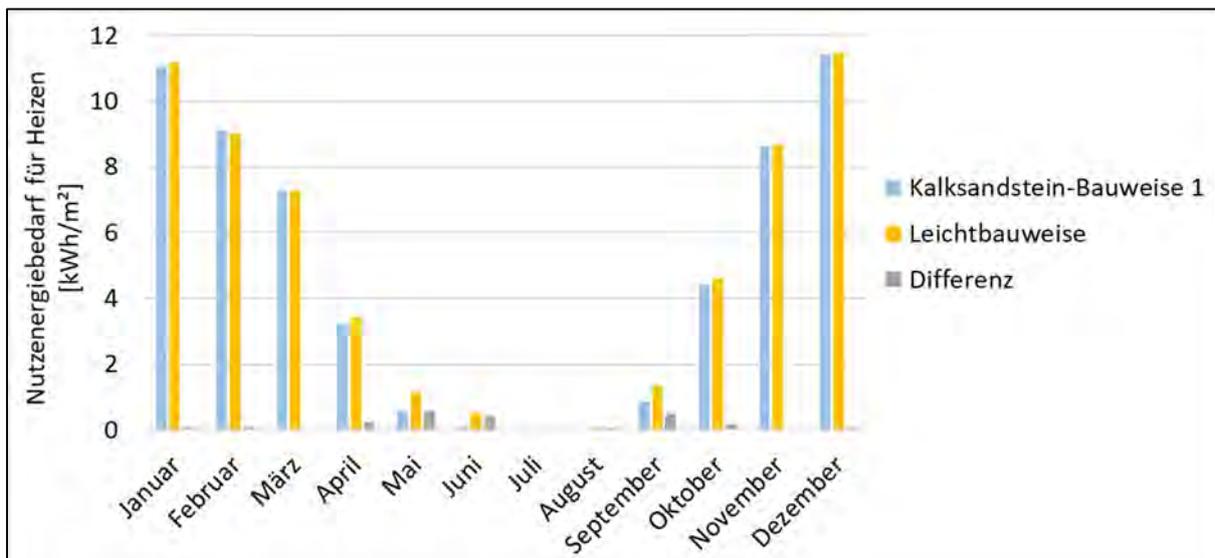


Abbildung 106: Simulationsergebnisse monatlicher Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz) – beide Räume gemittelt

7.2 Einfluss der Wärmespeicherefähigkeit auf die sommerliche Überhitzung

Zur Auswertung des Einflusses der wirksamen Wärmespeicherefähigkeit C'_{wirk} auf die sommerliche Überhitzung werden die nachfolgenden Abbildungen 107 und 108 herangezogen.

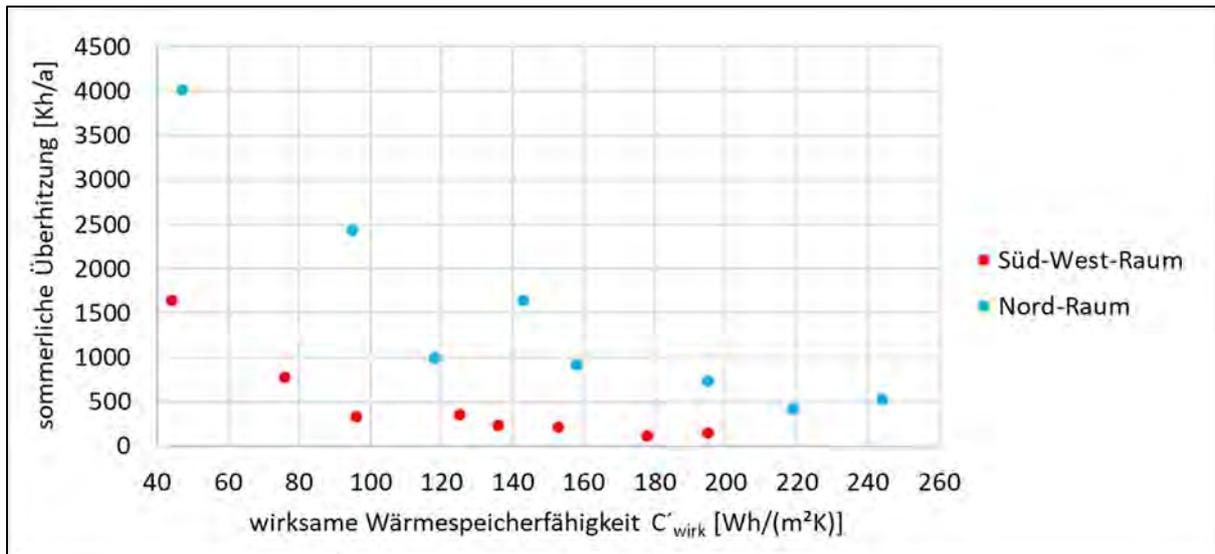


Abbildung 107: Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

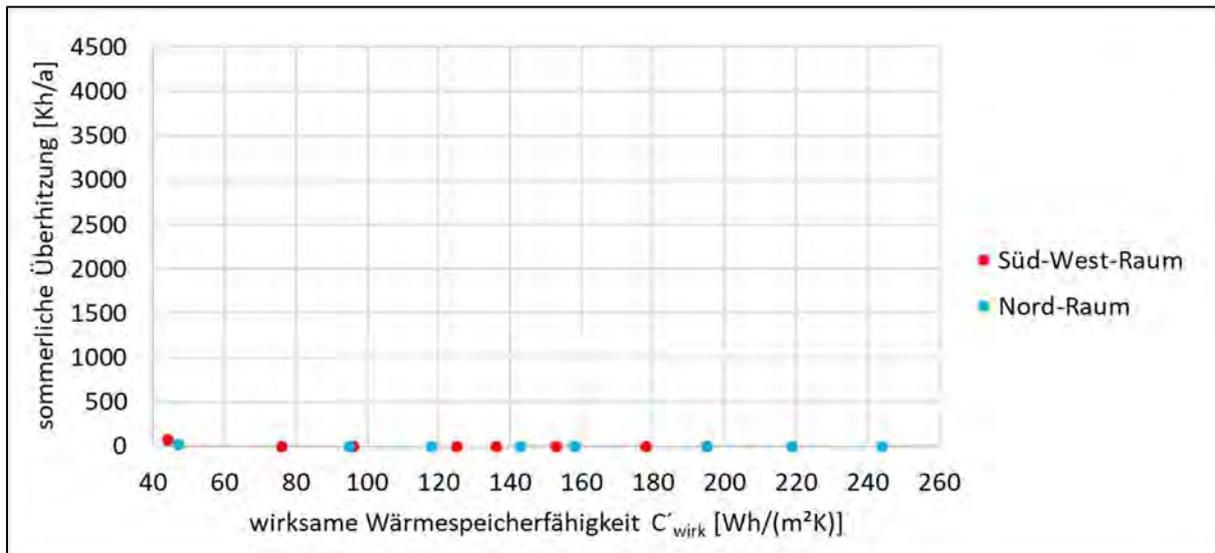


Abbildung 108: Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

Es ist zu sehen, dass bei Verzicht von baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz umso weniger Übertemperaturgradstunden zu erwarten sind, je höher die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} ist. Dieses Verhalten resultiert aus der erhöhten thermischen Trägheit von schweren Bauteilen verglichen zu Leichtbaukonstruktionen. Durch eine hohe wirksame Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} kann das sommerliche Aufheizen von Räumen verursacht durch starke Sonneneinstrahlung abgepuffert werden. Dieser Zusammenhang zwischen der Bauweise und dem sommerlichen Aufheizverhalten von Räumen hat sich im Rahmen der Kuben-Messungen (siehe Kapitel 5.2) gezeigt.

Betrachtet man die Simulationsergebnisse für die beiden untersuchten Räume untereinander, fällt auf, dass sich widererwartend für den Nord-Raum bei Nichtvorhandensein von Sonnenschutzmaßnahmen mehr Übertemperaturgradstunden ergeben im Vergleich zum Süd-West-Raum. Grundsätzlich erwärmt sich der Nord-Raum trotz der günstigen Himmelsausrichtung im Sommer wesentlich, weil sich die angrenzenden Räume im Verbund stark aufheizen und ein Wärmetransport durch die trennenden

Bauteile auch zum Nord-Raum stattfindet. Erschwerend kommt für den Nord-Raum im Vergleich zum Süd-West-Raum eine niedrigere Grundfläche (10,89 m² im Vergleich zu 26,04 m²) und ein größerer fassadenbezogener Fensterflächenanteil hinzu (38 % im Vergleich zu 25 %). Insgesamt ist deshalb in der Simulation eine stärkere sommerliche Überhitzung des Nord-Raums zu verzeichnen. In der Realität ist ein solches Ergebnis allerdings nur denkbar, wenn nach Norden hin keinerlei Fassadenverschattung z. B. durch andere Gebäude, Vegetation oder das umliegende Höhenprofil vorhanden wäre.

Bei dem Einsatz einer außenliegenden Sonnenschutzvorrichtung ist hingegen keine bedeutsame Einflussnahme der Bauweise auf die sommerliche Überhitzung festzustellen. Ein solcher Sonnenschutz verhindert, dass der Großteil der solaren Einstrahlung in das Gebäudeinnere gelangt.

7.3 Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die thermische Behaglichkeit

Wie bereits im Kapitel 6 beschrieben, wird es im Rahmen dieses Forschungsprojektes als sinnvoll erachtet Aussagen zum Einfluss der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} auf die thermische Behaglichkeit mit Hilfe von gemittelten vorausgesagten Prozentsätzen an Unzufriedenen PPD (Beschreibung siehe Kapitel 5.2.1) über das Jahr, den Winter (November bis März), den Sommer (Juni bis September) und die Übergangszeit (April, Mai, Oktober) zu treffen.

Die folgenden Abbildungen 109 bis 112 zeigen die im Rahmen der Simulationsuntersuchungen berechneten PPD's in Abhängigkeit von C'_{wirk} unter Ansatz eines Verzichts auf Sonnenschutzvorrichtungen. Es ist zu erkennen, dass während des Winters und der Übergangszeit der PPD nur sehr gering variiert im Mittel um 20 % im Winter und um 13 % in der Übergangszeit. Die Ursache liegt darin, dass als Randbedingung im Simulationsmodell eine dauerhafte Soll-Raumtemperatur von mindestens 20 °C berücksichtigt wurde. Somit sorgt die künstliche Beheizung des Gebäudes bei einer Unterschreitung dieser Grenztemperatur für eine dauerhafte thermische Behaglichkeit an kalten Tagen.

Auf Grund des nicht angesetzten sommerlichen Wärmeschutzes und der daraus resultierenden sommerlichen Überhitzung variiert der ermittelte PPD im Sommer hingegen stark in Abhängigkeit von der Bauweise. Je höher die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} der eingesetzten Bauteile ist, umso weniger unzufriedene Gebäudenutzer sind im Mittel während der Sommerperiode zu erwarten.

Dieser Zusammenhang zeigt sich auch in einem geringeren Maße bei dem berechneten mittleren PPD während eines gesamten Jahres begünstigt durch den Sommerzeitraum.

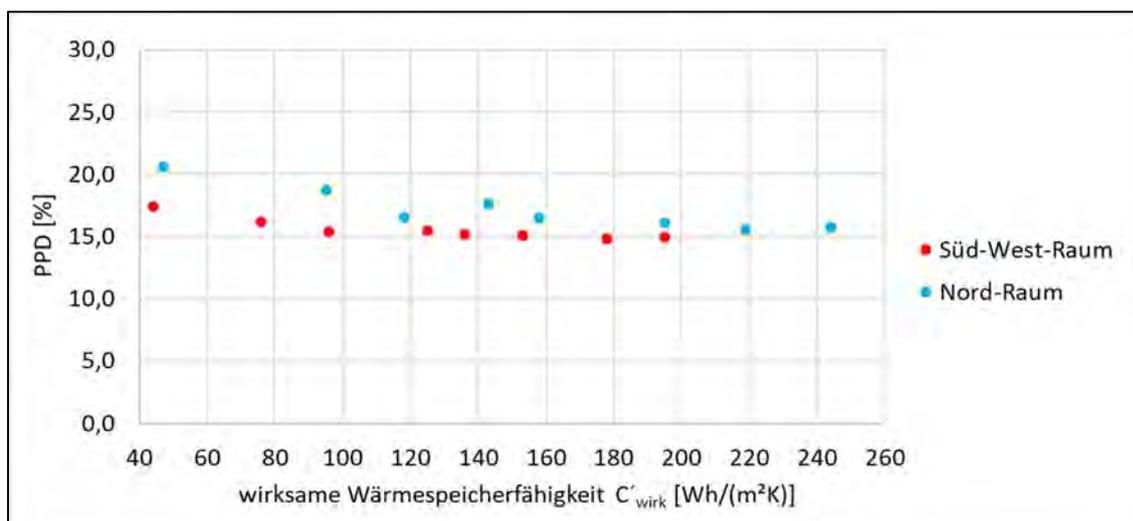


Abbildung 109: Simulationsergebnisse PPD (Jahr / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

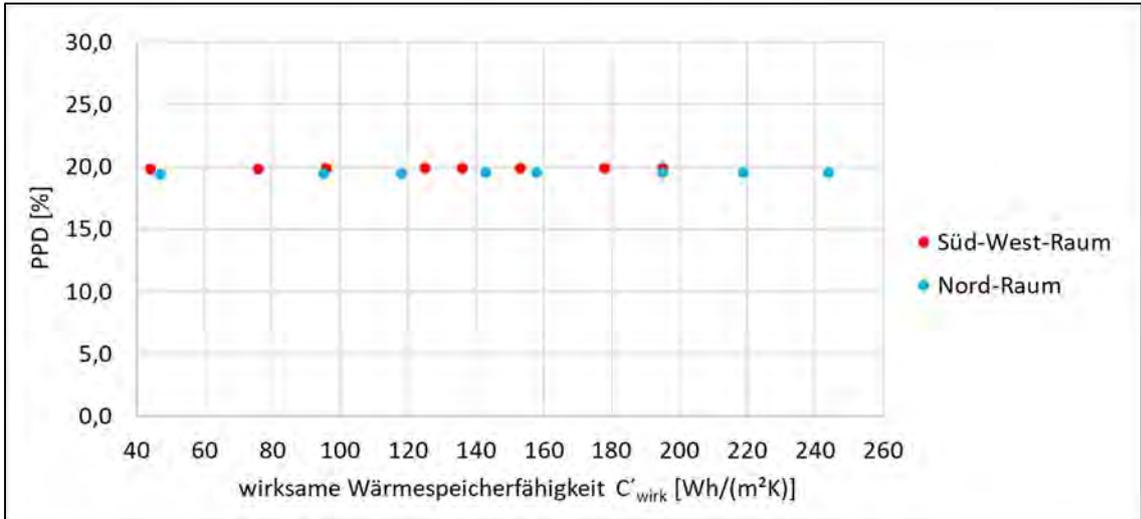


Abbildung 110: Simulationsergebnisse PPD (Winter / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

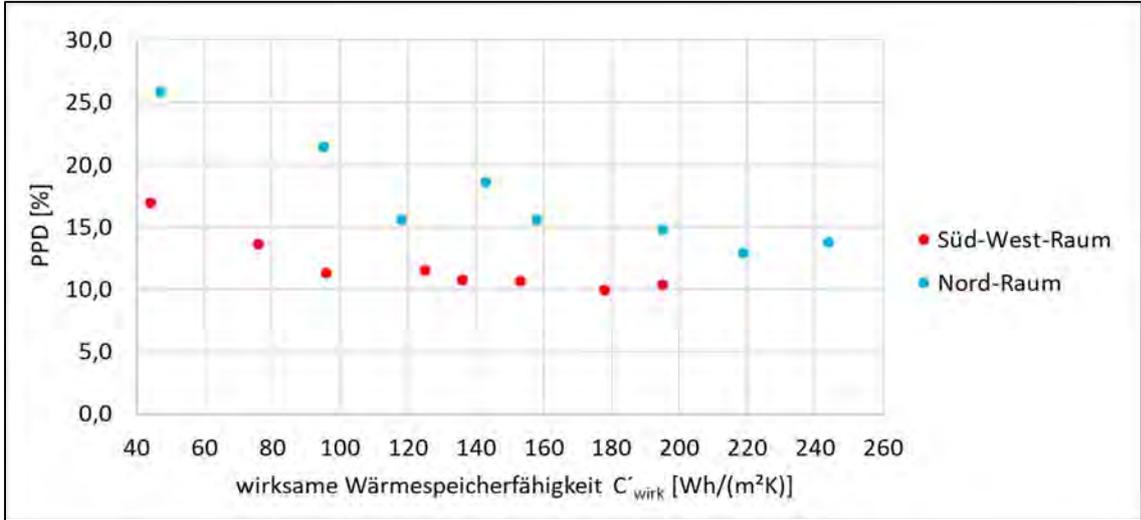


Abbildung 111: Simulationsergebnisse PPD (Sommer / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

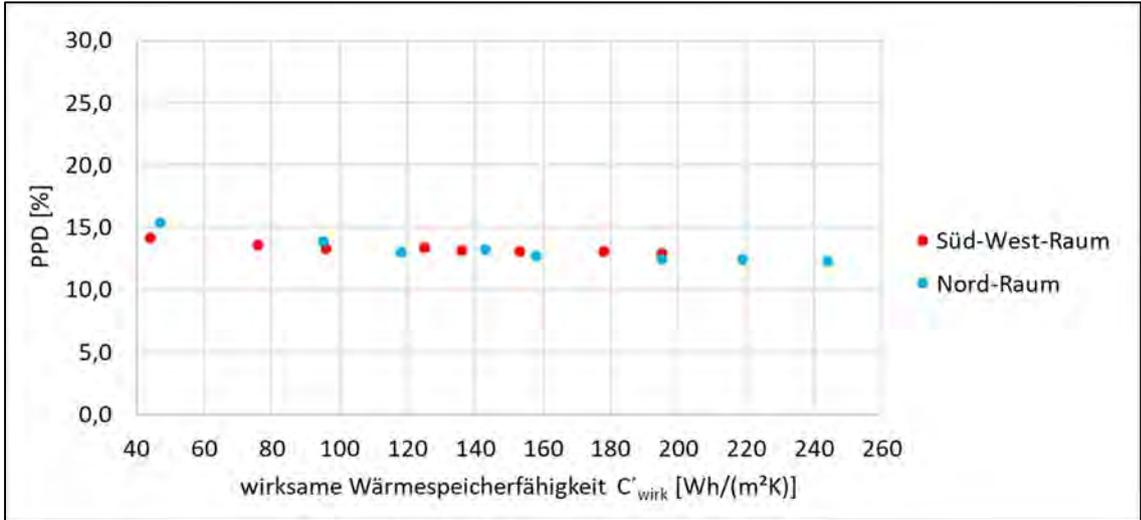


Abbildung 112: Simulationsergebnisse PPD (Übergangszeit / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

Im Vergleich zu den vorherigen Diagrammen basieren die nachstehenden Abbildungen 113 bis 116 auf die Berücksichtigung einer außenliegenden Sonnenschutzvorrichtung in den zugehörigen Simulationen. Durch den Einsatz einer solchen baulichen Maßnahme wird eine sommerliche Überhitzung weitestgehend verhindert. Daraus resultiert ein sehr geringer Einfluss der Bauweise auf den mittleren PPD während des Sommers (um 8 %) und eines vollständigen Jahres (um 15 %).

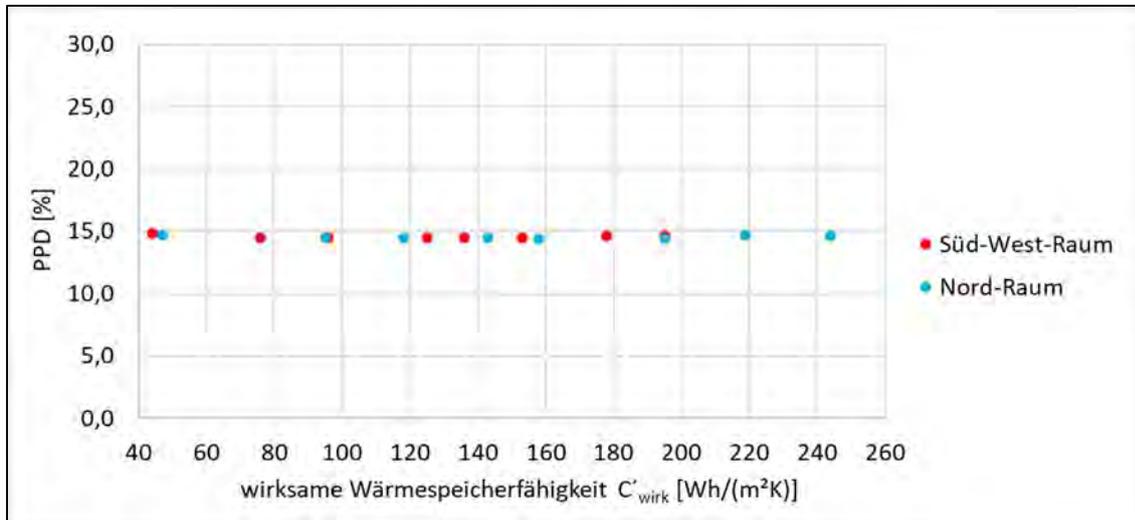


Abbildung 113: Simulationsergebnisse PPD (Jahr / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

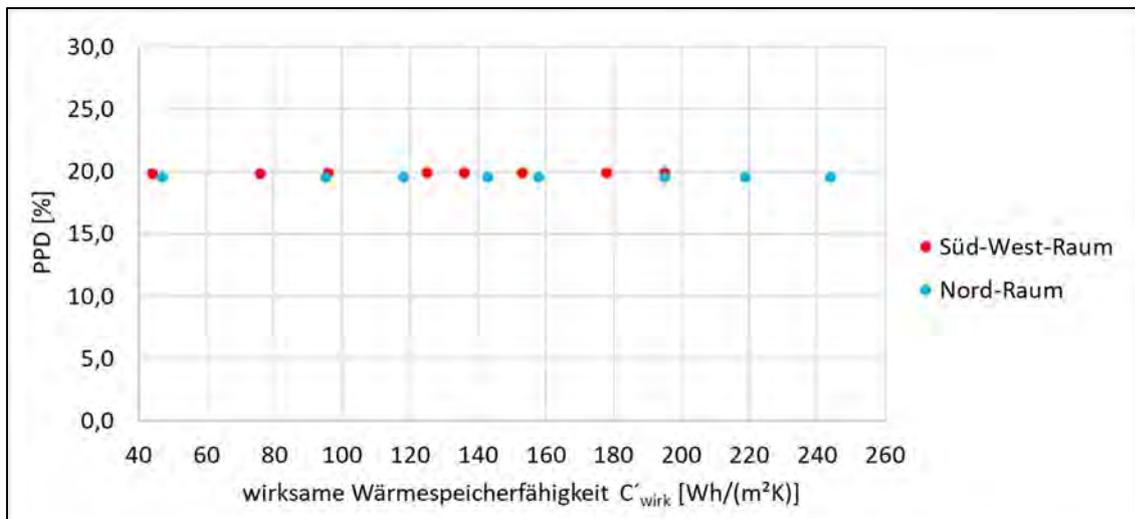


Abbildung 114: Simulationsergebnisse PPD (Winter / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

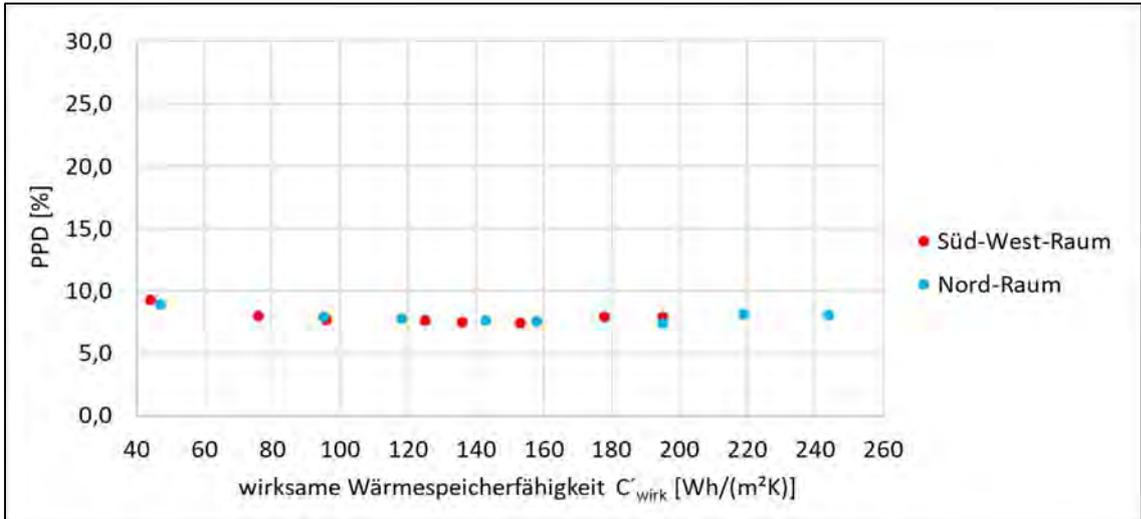


Abbildung 115: Simulationsergebnisse PPD (Sommer / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

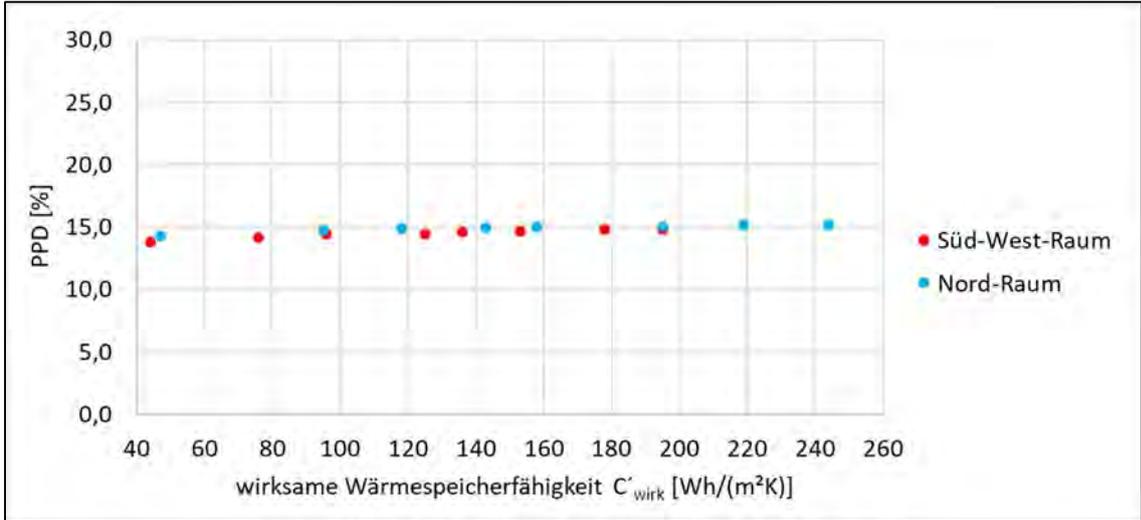


Abbildung 116: Simulationsergebnisse PPD (Übergangszeit / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum

8 Wärmespeicherfähigkeitsindex

Die Auswertung der Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln 7.1 bis 7.3 hat zum einen gezeigt, dass die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} von Gebäuden einen Einfluss auf den Nutzenergiebedarf für Heizen hat – unabhängig von Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz.

Zum anderen haben die Simulationen zu der Erkenntnis geführt, dass bei Nichtvorhandensein von Sonnenschutzvorrichtungen sich die Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen maßgeblich auswirkt auf die sommerliche Überhitzung von Räumen und daraus folgend auf die thermische Behaglichkeit insbesondere während der Sommerperiode.

Auf Basis der Ergebnisse und den daraus abgeleiteten Rückschlüssen wurden Näherungsformeln entwickelt, mit denen die prozentualen Unterschiede bzgl. des Heiz-Nutzenergiebedarfs, der Übertemperaturgradstunden, des jährlich gemittelten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD und des sommerlich gemittelten vorausgesagten Prozentsatzes an Unzufriedenen PPD zwischen einer geplanten Bauweise und einer Bauweise mit einer grundflächenbezogenen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} von $50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ näherungsweise abgeschätzt werden können.

Die Formeln werden in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgestellt und sind anwendbar für standardmäßige neu zu errichtende und energetisch sanierte Wohngebäude ohne Nachtabsenkung der Heizungsanlage unter Einhaltung der Hauptanforderungen der aktuell gültigen EnEV 2016 (Begrenzung Jahres-Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverluste) ohne Innendämmung sowie abgehängte oder thermisch abgedeckte Decken.

8.1 Wärmespeicherfähigkeitsindex – Nutzenergiebedarf für Heizen

Die Simulationen haben für beide untersuchten Räume ähnliche Ergebnisse bzgl. des Nutzenergiebedarfs für Heizen gebracht bei Ansatz von einheitlichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz. Wurde jedoch für ein Raum einmal mit und einmal ohne außenliegender Sonnenschutzvorrichtung gerechnet, ergaben sich unterschiedliche Resultate. Deshalb wurde es als sinnvoll erachtet eine Näherungsformel für Räume ohne und eine für Räume mit Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes entsprechend DIN 4108-2 [12] zu entwickeln.

In den folgenden Abbildungen 117 und 118 sind jeweils die Simulationsergebnisse für die beiden untersuchten Räume – einmal ohne und einmal mit sommerlichen Wärmeschutz – dargestellt sowie eine aus den Punkten jeweils abgeleitete Fitkurve.

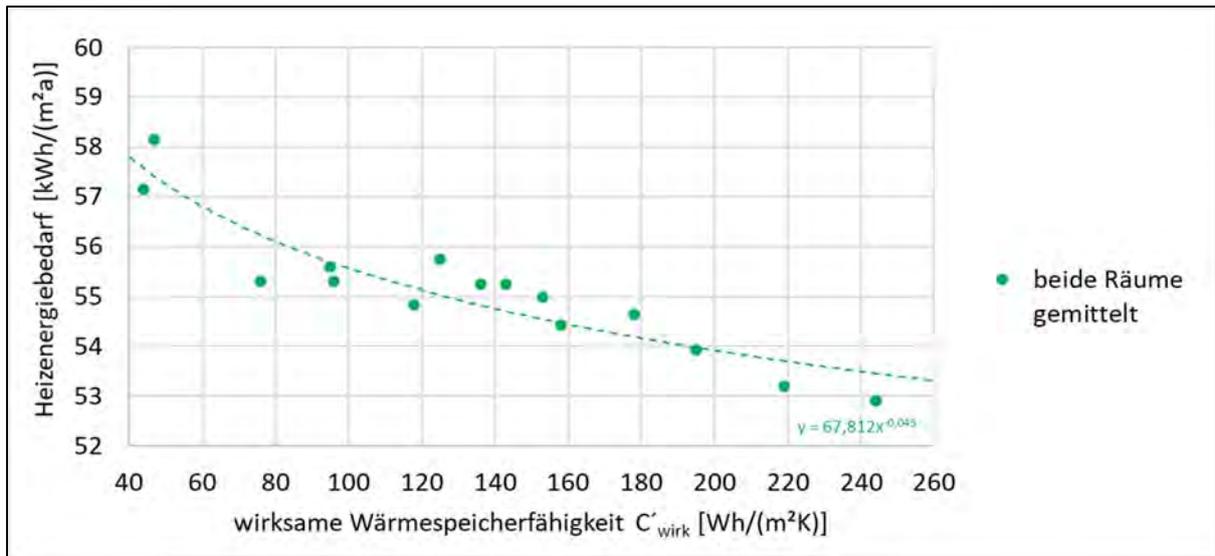


Abbildung 117: Entwicklung Wärmespeicherfähigkeitsindex für den Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz)

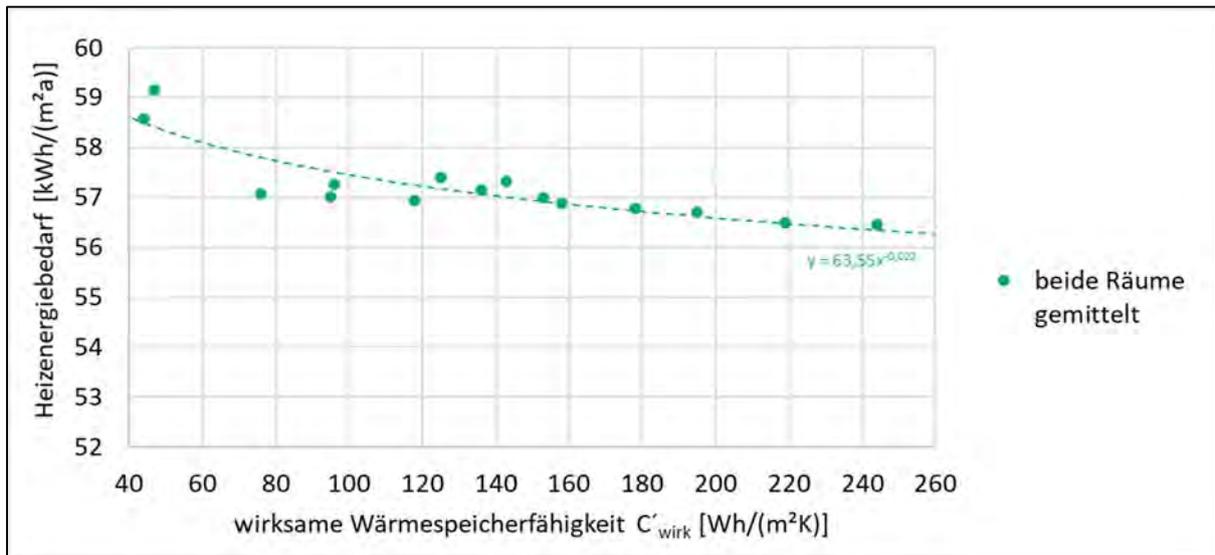


Abbildung 118: Entwicklung Wärmespeicherfähigkeitsindex für den Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz)

Auf Grundlage der Fitkurven kann die Verringerung des Nutzenergiebedarfs für Heizen durch eine geplante Bauweise im Vergleich zu einer Bauweise mit einem C'_{wirk} von 50 Wh/(m²K) näherungsweise mit Hilfe der nachstehenden Formeln (10) (Nichteinhaltung sommerlicher Wärmeschutz entspr. DIN 4108-2) bzw. (11) (Einhaltung sommerlicher Wärmeschutz entspr. DIN 4108-2) abgeschätzt werden:

$$WSI_{\Delta Q} = (1 - 1,183 \cdot C'_{wirk}^{-0,043}) \times 100 \% \quad (10)$$

Legende

$WSI_{\Delta Q}$	Verringerung Nutzenergiebedarf für Heizen durch geplante Bauweise im Vergleich zu Bauweise mit C'_{wirk} von 50 Wh/(m ² K) [%]
C'_{wirk}	wirksame Wärmespeicherfähigkeit der geplanten Bauweise [Wh/(m ² K)] (bezogen auf Nettogrundfläche)

$$WSI_{\Delta Q} = (1 - 1,090 \cdot C'_{wirk}^{-0,022}) \times 100 \% \quad (11)$$

Legende

$WSI_{\Delta Q}$	Verringerung Nutzenergiebedarf für Heizen durch geplante Bauweise im Vergleich zu Bauweise mit C'_{wirk} von 50 Wh/(m ² K) [%]
C'_{wirk}	wirksame Wärmespeicherfähigkeit der geplanten Bauweise [Wh/(m ² K)] (bezogen auf Nettogrundfläche)

Für Gebäude mit extrem schwerer im Vergleich zu extrem leichter Bauweise wurde ein um bis zu 9 % geringerer jährlicher Heiz-Nutzenergiebedarf ermittelt. Es ist zu überlegen ob dieser Effekt normativ oder im Rahmen der EnEV eine Berücksichtigung finden sollte.

8.2 Wärmespeicherfähigkeitsindex – sommerliche Überhitzung

Die Simulationen haben ergeben, dass eine sommerliche Überhitzung durch den Einsatz einer außenliegenden Sonnenschutzvorrichtung vermieden werden kann. Durch den Verzicht des Ansatzes von baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz im Simulationsmodell ergibt sich sowohl für den untersuchten Süd-West- als auch für den Nord-Raum ein hohes Maß an Übertemperaturgradstunden bezogen auf eine operative Grenz-Raumtemperatur von 26 °C. In der Realität sind jedoch Räume mit Nord-, Nord-Ost- und Nord-West-Ausrichtung in der Regel unkritisch hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes. Weiterhin haben sich die Simulationsergebnisse für die sommerliche Überhitzung des Nord-Raums nur ergeben unter dem Ansatz von keinerlei Fassadenverschattung z. B. durch andere Gebäude, Vegetation oder das umliegende Höhenprofil. Solche Bedingungen sind untypisch für die Wirklichkeit. Deshalb wurde es als sinnvoll erachtet nur eine Näherungsformel für Räume mit Süd-, Ost- und/oder West-Orientierung ohne Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes entsprechend DIN 4108-2 [12] zu entwickeln.

In der folgenden Abbildung 119 sind die Simulationsergebnisse für den untersuchten Süd-West-Raum – ohne sommerlichen Wärmeschutz – dargestellt sowie eine aus den Punkten abgeleitete Fitkurve.

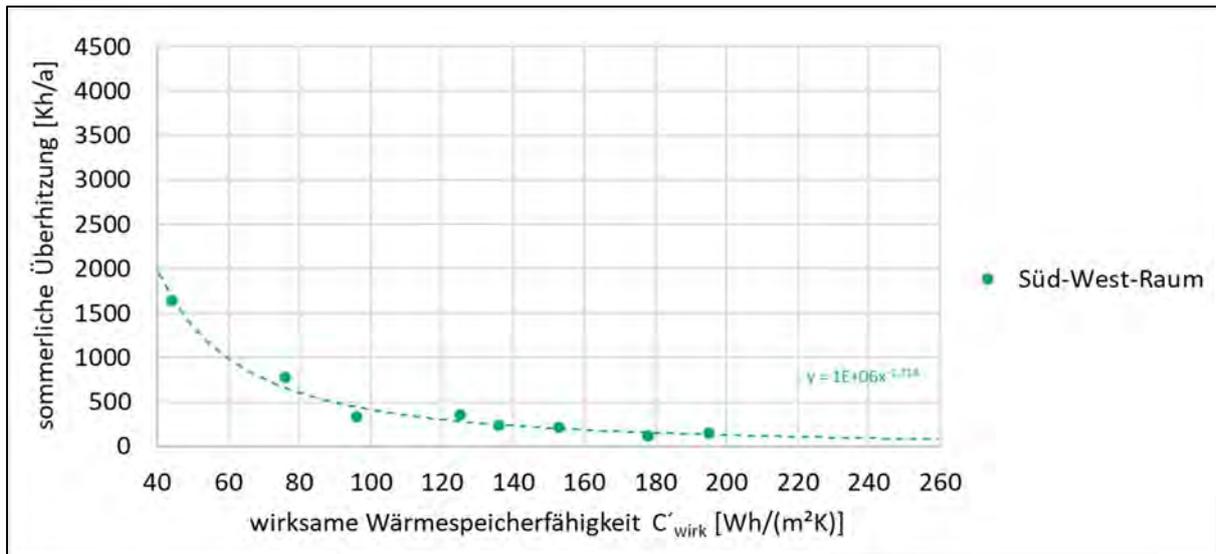


Abbildung 119: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für die sommerliche Überhitzung (ohne sommerlichen Wärmeschutz)

Auf Grundlage der Fitkurve kann die Verringerung von Übertemperaturgradstunden (bezogen auf eine operative Grenz-Raumtemperatur von 26 °C) für süd-, ost- und/oder west-orientierte Räume ohne bauliche Sonnenschutzvorrichtungen durch eine geplante Bauweise im Vergleich zu einer Bauweise mit einem C'_{wirk} von 50 Wh/(m²K) näherungsweise mit Hilfe der nachfolgenden Formel (12) abgeschätzt werden:

$$WSI_{\Delta Gh} = (1 - 829,527 \cdot C'_{\text{wirk}}^{-1,718}) \times 100 \% \quad (12)$$

Legende

- $WSI_{\Delta Gh}$ Verringerung Übertemperaturgradstunden bezogen auf eine operative Grenz-Raumtemperatur von 26 °C durch geplante Bauweise im Vergleich zu Bauweise mit C'_{wirk} von 50 Wh/(m²K) [%]
- C'_{wirk} wirksame Wärmespeicherfähigkeit der geplanten Bauweise [Wh/(m²K)] (bezogen auf Nettogrundfläche)

8.3 Wärmespeicherfähigkeitsindex – thermische Behaglichkeit

Die Simulationen haben ergeben, dass der mittlere vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen PPD nur während des Sommers und dadurch auch der jährlich gemittelte PPD sowohl für den untersuchten Süd-West- als auch für den Nord-Raum bei Nichtvorhandensein von Sonnenschutzvorrichtungen abhängig von der Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile wesentlich variiert. In der Realität werden jedoch Räume mit Nord-, Nord-Ost- und Nord-West-Ausrichtung in der Regel als unkritisch hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes angesehen. Weiterhin haben sich die Simulationsergebnisse für die sommerliche Überhitzung des Nord-Raums nur ergeben unter dem Ansatz von keinerlei Fassadenverschattung z. B. durch andere Gebäude, Vegetation oder das umliegende Höhenprofil. Solche Bedingungen sind untypisch für die Wirklichkeit. Deshalb wurde es als sinnvoll erachtet nur Näherungsformeln für Räume mit Süd-, Ost- und West-Orientierung ohne Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes entsprechend DIN 4108-2 [12] zu entwickeln.

In den nachstehenden Abbildungen 120 und 121 sind jeweils die Simulationsergebnisse für den untersuchten Süd-West-Raum – einmal gemittelt während des Sommers und einmal während des Jahres – dargestellt sowie eine aus den Punkten jeweils abgeleitete Fitkurve.

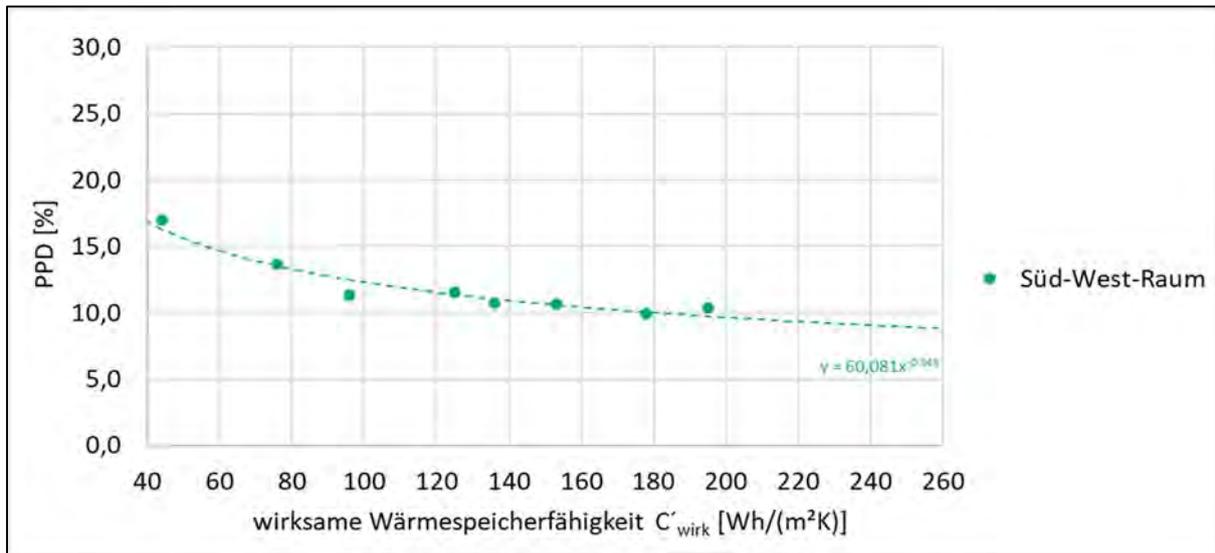


Abbildung 120: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für die sommerlich gemittelte thermische Behaglichkeit (ohne sommerlichen Wärmeschutz)

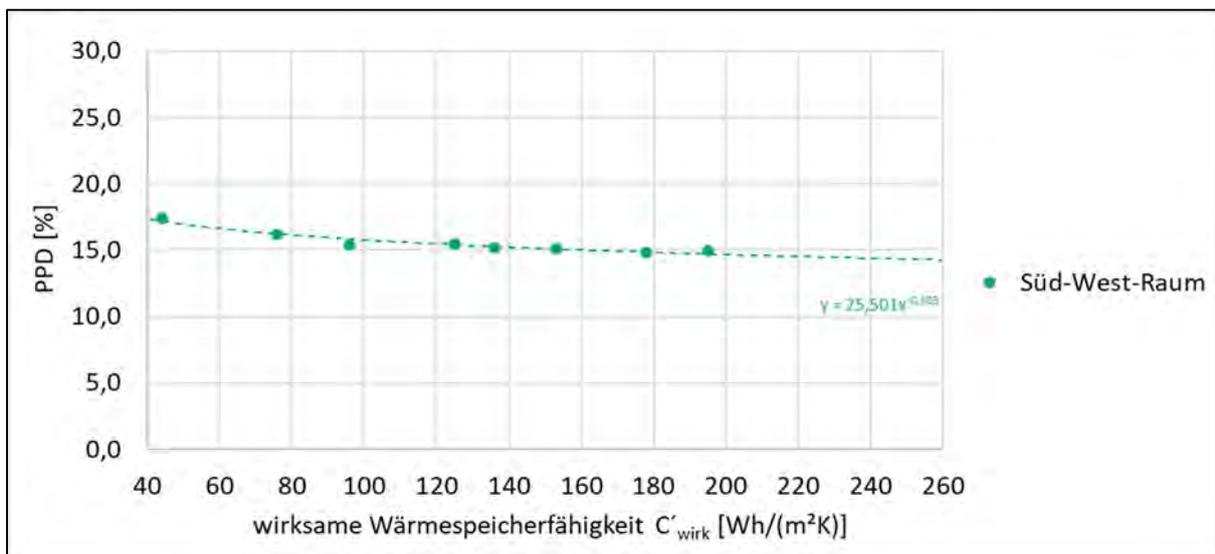


Abbildung 121: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für die jährlich gemittelte thermische Behaglichkeit (ohne sommerlichen Wärmeschutz)

Auf Grundlage der Fitkurven kann die Verringerung des vorausgesagten mittleren sommerlichen bzw. jährlichen Prozentsatzes an Unzufriedenen für süd-, ost- und/oder west-orientierte Räume durch eine geplante Bauweise im Vergleich zu einer Bauweise mit einem C'_{wirk} von 50 Wh/(m²K) näherungsweise mit Hilfe der folgenden Formeln (13) (Sommer) bzw. (14) (Jahr) abgeschätzt werden:

$$WSI_{\Delta PPD,S} = (1 - 3,856 \cdot C'_{wirk}^{-0,345}) \times 100 \% \quad (13)$$

Legende

- $WSI_{\Delta PPD,S}$ Verringerung vorausgesagter mittlerer sommerlicher Prozentsatz an Unzufriedenen durch geplante Bauweise im Vergleich zu Bauweise mit C'_{wirk} von 50 Wh/(m²K) [%]
- C'_{wirk} wirksame Wärmespeicherfähigkeit der geplanten Bauweise [Wh/(m²K)]
(bezogen auf Nettogrundfläche)

$$WSI_{\Delta PPD,J} = (1 - 1,508 \cdot C'_{wirk}^{-0,105}) \times 100 \% \quad (14)$$

Legende

- $WSI_{\Delta PPD,J}$ Verringerung vorausgesagter mittlerer jährlicher Prozentsatz an Unzufriedenen durch geplante Bauweise im Vergleich zu Bauweise mit C'_{wirk} von 50 Wh/(m²K) [%]
- C'_{wirk} wirksame Wärmespeicherfähigkeit der geplanten Bauweise [Wh/(m²K)]
(bezogen auf Nettogrundfläche)

9 Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente

Dieses Kapitel inkl. aller Unterkapitel wurde von der TU München erstellt.

9.1 Grundlagen des Brettsperrholzes

9.1.1 Entwicklung

Brettsperrholz gehört zu den jüngeren Entwicklungen im Bereich der Massivholzprodukte. Im Jahr 1998 wurden in Deutschland und Österreich die ersten bauaufsichtlichen Zulassungen für verschiedene Brettsperrholzprodukte erteilt [22].

Beim Brettsperrholz handelt es sich um ein flächiges, massives Holzprodukt für tragende Anwendungen. Bestehend aus mindestens drei rechtwinklig zueinander verklebten Brettlagen aus Nadelschnittholz kann es in mehrgeschosshohen Abmessungen produziert werden. Durch die tragenden und raumbildenden Bauteileigenschaften ist Brettsperrholz für die Herstellung von Wand-, Dach- und Deckentafeln verwendbar. Neben der deutschen herstellerneutralen Produktbezeichnung Brettsperrholz, kurz BSP, ist hierzulande die englische Bezeichnung Cross Laminated Timber, kurz CLT oder X-Lam, üblich. In Deutschland wird mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung die Verwendbarkeit beziehungsweise Anwendbarkeit des Zulassungsgegenstandes im Sinne der Landesbauordnung nachgewiesen [23].



Abbildung 122: (BSP, X-Lam)



Abbildung 123: Wandtafeln aus Brettsperrholz eines Einfamilienhauses [23]

9.1.2 Herstellungsprozess

Im weitgehend automatisierten Herstellungsprozess durchläuft das Holz die folgenden sechs Schritte bis zum fertigen Produkt, dem Brettsperrholz:

1. Technische Trocknung des Profilholzes auf eine Holzfeuchte von $12\% \pm 2\%$.
2. Visuelle oder maschinelle Sortierung nach Festigkeitsklassen. Die Brettlamellen für die äußeren Decklagen werden zusätzlich nach ästhetischen Aspekten sortiert.
3. Festigkeitsmindernde oder das Aussehen beeinträchtigende Bereiche werden falls nötig ausgekappt und die Bretter bzw. Brettabschnitte über eine Keilzinkenverbindung zu Lamellen der gewünschten Länge gestoßen. Anschließend erfolgt das Hobeln oder Schleifen der Lamellen auf die gewünschte Dicke.
4. Mit den vorsortierten und um Fehlstellen bereinigten Brettlamellen erfolgt nun der eigentliche Brettsperrholzherstellungsprozess. Dafür werden die Brettlamellen nebeneinander angeordnet und flächig verleimt. Die nächste Lage der Brettlamellen wird jeweils um 90 Grad verspart

- aufgelegt. Die Brettlamellen der äußeren Decklagen werden in der Regel in einem Vorprozess schmalseitig verleimt. Optional werden auch innenliegende Schichten schmalseitig verleimt.
5. Der mit Kleber benetzte Schichtaufbau härtet anschließend in einem hydraulischen oder einem vakuumbetriebenen Pressbett unter mechanischem Druck aus. Die Wahl des verwendeten Pressbettes richtet sich nach dem gewünschten Format der Brettsperrholzelemente. Während die hochstandardisierten Systemformate in hydraulischen Pressen gefertigt werden, ermöglicht das flexibel bestückbare Vakuumpressbett auch die Herstellung von Sonder- und Großformaten.
 6. Der Abbund der fertigen Brettsperrholzelemente sowie deren Oberflächenbehandlung erfolgen in der Regel direkt im Herstellungswerk und werden kundenindividuell ausgeführt.
- In Abbildung 124 sind diese sechs Prozessstufen schematisch dargestellt:

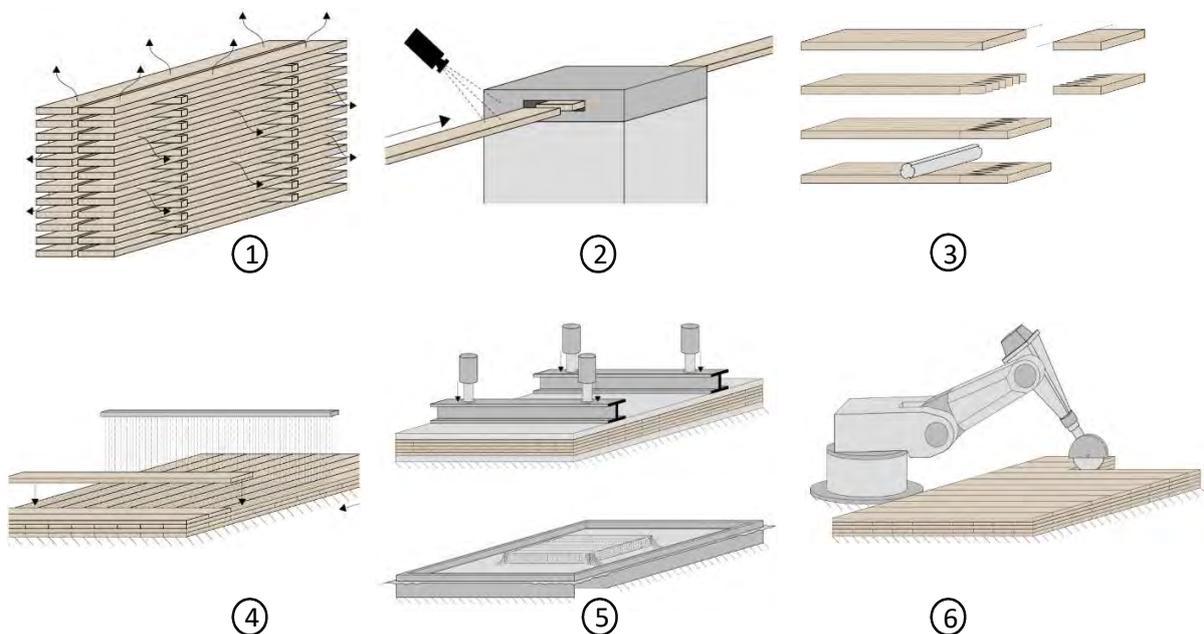


Abbildung 124: Herstellungsprozess von Brettsperrholz [23]

9.1.3 Eigenschaften des Brettsperrholzes

Aufbau und Abmessungen

Übliche Aufbauten des Brettsperrholzes beginnen mit mindestens drei kreuzweise verleimten Lagen aus Brettlamellen. Zur Schwerachse des Elements sind diese in der Regel symmetrisch angeordnet. Dabei sind auch mehrere parallele Lagen in Hauptrichtung möglich um höhere Normallasten abzutragen. Ferner lassen sich für unterschiedliche funktionale Anforderungen Lagen aus Holzwerkstoffplatten wie z.B. OSB in den Schichtenaufbau integrieren[24]. Je nach geltender Zulassung lassen sich Brettsperrholzelemente bis zu einer Dicke von 500 mm und standardmäßigen Plattengrößen von bis zu 3,5 m x 22 m herstellen [25]. Die werkseitige Produktion der fertig abgebundenen Wand-, Dach- und Deckenbauteile ermöglicht unabhängig von der Witterung einen hohen Vorfertigungsgrad. Somit kann die Zeit für die Errichtung der Rohbauten auf ein Minimum verkürzt werden.

Thermische Eigenschaften

Aufgrund der herstellerspezifischen Aufbauten sind die exakten bauphysikalischen Daten den jeweiligen Produktdokumentationen der Hersteller zu entnehmen. Die im Folgenden beschriebenen Eigenschaften sind daher allgemein gehalten. Der Klebstoffanteil von Brettsperrholz ergibt bei einer Stärke der Klebefugen von ca. 0,1 mm ein Massenanteil des Klebstoffes von weniger als 1 % der Gesamtmasse des Bauteils. Bedingt durch die geringe Schichtstärke der Klebefugen beeinträchtigen diese den Transmissionswärmestrom durch das Bauteil nicht wesentlich. Auch die Wärmespeicherfähigkeit des Elements wird aufgrund des geringen Massenanteils des Klebers nur unwesentlich verändert. Ferner unterliegt das anisotrope Material Holz weiteren Effekten, welche auf die Jahrringlage respektive die Faserrichtung des Holzes zurückzuführen sind. Deren Einfluss wurde durch [26] wie folgt am Beispiel von dreischichtigen Massivholzplatten aus Fichtenholz gemessen. Dabei ergeben sich um 8 – 10 % niedrigere Werte in tangentialer Faserrichtung als radial zur Faser. Signifikante Unterschiede dazu bringen die Messung des Wärmeflusses in axialer Richtung, also längs zur Faser. Bei Fichtenholz im darrtrockenen Zustand haben Schneider und Engelhardt bereits 1977 eine um 2,8 – 3,1-mal so hohe Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung gemessen als quer zur Faser [27]. Für exakte thermische zwei- oder dreidimensionale Bauteilsimulationen sollten die richtungsabhängigen Eigenschaften des Holzes im Allgemeinen berücksichtigt werden. Allerdings lässt sich die exakte Lage der Brettlamellen sowie deren Jahrringlagen im fertigen Brettsperrholz im Nachhinein nicht mehr modellieren. Für eine entsprechende Berechnung müsste jede Lamelle im Element separat bemessen werden. Für die baupraktische Anwendung ist in diesem Zusammenhang die dreiachsige Berücksichtigung der Faserrichtung im Brettsperrholzprodukt nicht zweckmäßig. Stattdessen kann vereinfachend angenommen werden, dass bei eindimensionalen Wärmedurchgängen normal zur Elementoberfläche der Wärmefluss ausschließlich radial oder tangential zur Faserrichtung stattfindet. Für eine Berechnung der Wärmeübertragungseigenschaften vom Brettsperrholz - auf Materialebene - sollten folglich die auf einen tangentialen/ -radialen Wärmefluss gemittelten Materialwerte angesetzt werden. Zielführender als die Betrachtung der Materialebene ist es, die Wärmeleitfähigkeit des Brettsperrholzes auf Produktebene zu bemessen. Hierbei kann das Element als homogen innerhalb seiner Oberflächen angesehen werden.

Einen signifikanten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat die Rohdichte des Holzes. Mit zunehmender Rohdichte verringert sich der Massenanteil der in den Poren des Holzes eingeschlossenen Luft. Da Luft eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt als das Holz, verringert sich der thermische Widerstand des Materials mit zunehmender Rohdichte. Wärmeleitfähigkeiten werden daher in der Regel rohddenabhängig angegeben.

Der Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit ist bei großen Temperaturschwankungen wie Brandereignissen zu berücksichtigen. Im bauphysikalisch relevanten Temperaturbereich beträgt die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit quer zur Faser 0,175 %/K [28].

Ein weiterer praxisrelevanter Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit resultiert aus der Materialfeuchte. Da Wasser eine deutlich größere Wärmeleitfähigkeit besitzt, als die in den Poren des Holzes eingeschlossene Luft, steigt die Wärmeleitfähigkeit des Materials mit steigendem Wassergehalt.

In diesem Zusammenhang wird auf eine von Cammerer und Achziger erfolgte Zusammenstellung zur Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verwiesen [29]. Daraus kann entnommen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit von Fichte, Kiefer, Eiche und Buche im Bereich zwischen einem und zwei Prozent je Prozent Holzfeuchte zunimmt. Zur Berücksichtigung des Feuchteinflusses wird in der DIN 52612-2 ein Zuschlag von fünfzehn Prozent auf die Wärmeleitfähigkeit der bei 10 °C in trockenem Zustand gemessene Holzwerkstoffplatten verlangt. Nach Foglia, A. et al. entspricht dies einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von ca. einem Prozent je Prozent Wassergehalt [26]. Ähnlich groß wird dieser Einfluss auch auf die Wärmeleitfähigkeit von Brettsperrholzprodukten vermutet.

Um den Einfluss der Materialfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit bei den in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Brettsperrholzelementen exakt bestimmen zu können, wurden am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Labormessungen unternommen. Dabei wurden 15 Probekörper des Produktes Binderholz Brettsperrholz BBS125 aus Fichtenholz im Aufbau 5 x 20 mm in der Gesamtstärke von 100 mm bei unterschiedlichen Holzfeuchten gemessen. Die Konditionierung der

Materialfeuchte erfolgte vorab beim Hersteller und wurde vor sowie nach der Messung der Wärmeleitfähigkeit in allen fünf Schichten durch das elektrische Widerstandsmessverfahren gemessen. Stichprobenartig wurden Kontrollmessungen der Holzfeuchte durch das Darrtrocknungsverfahren durchgeführt. Dabei ergab sich eine mittlere Abweichung zwischen den beiden Messverfahren von 1,05 % Holzfeuchte. Die 15 Probekörper wurden auf Materialfeuchten im Bereich zwischen 9 % und 18 % gebracht und dementsprechend in drei Serien gruppiert. Im Anschluss an die Messung wurden sämtliche Probekörper technisch bis auf annähernd 0 % Holzfeuchte getrocknet und die Trockendichten bestimmt. Für die Probekörper der dritten Serien wurde im darrtrockenen Zustand erneut eine Messung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. In Abbildung 125 sind die Ergebnisse aufgetragen.

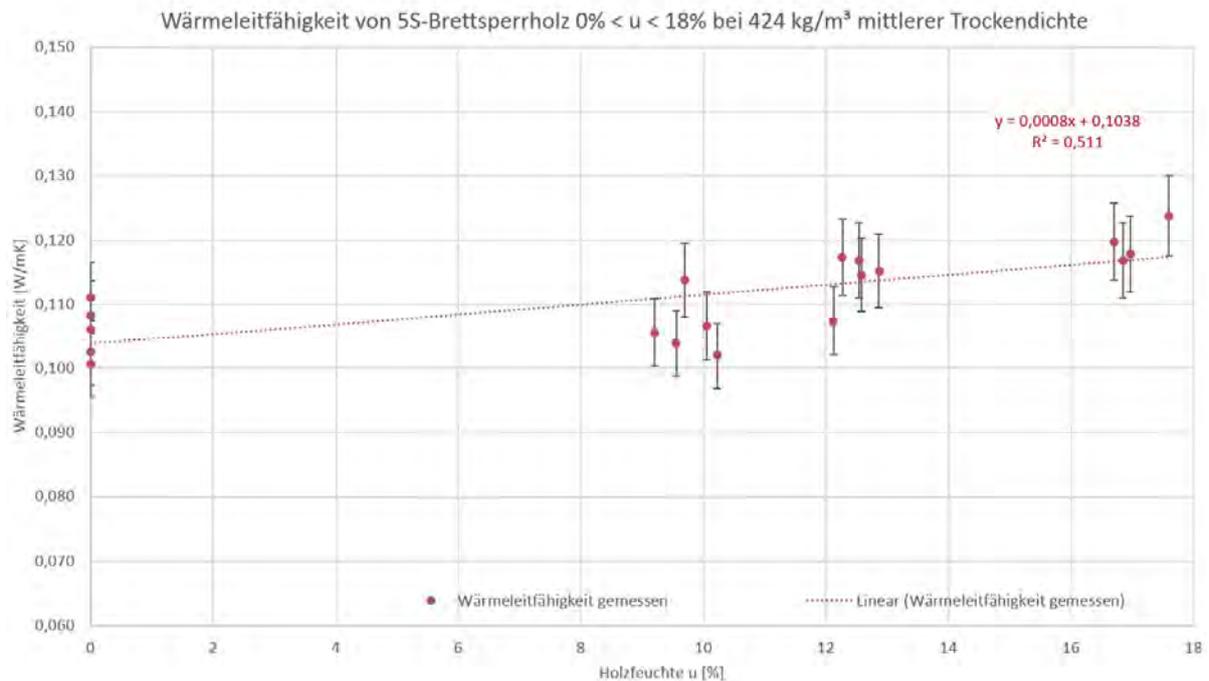


Abbildung 125: Gemessene Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Brettsperrholzelemente bei unterschiedlichen Materialfeuchten

Das Diagramm zeigt die gemessene Wärmeleitfähigkeit über der Holzfeuchte. Jeder Punkt im Diagramm entspricht einer Messung. Für den baupraktisch relevanten Holzfeuchtebereich in beheizten Gebäuden von 5 % < u < 15 % ergeben sich Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,108 W/mK und 0,116 W/mK. Für eine quantitative Angabe der Feuchteabhängigkeit wird eine lineare Regressionsgerade durch die Messpunkte der Wärmeleitfähigkeit über dem Holzfeuchtebereich 0 % < u < 18 % gelegt. Bei einem Bestimmtheitsmaß vom $R^2 = 0,511$ ergibt sich eine lineare Regression von:

$$\lambda_{Fichte,rad} = 0,0008 u + 0,1038 \quad [\text{W/mK}] \quad (15)$$

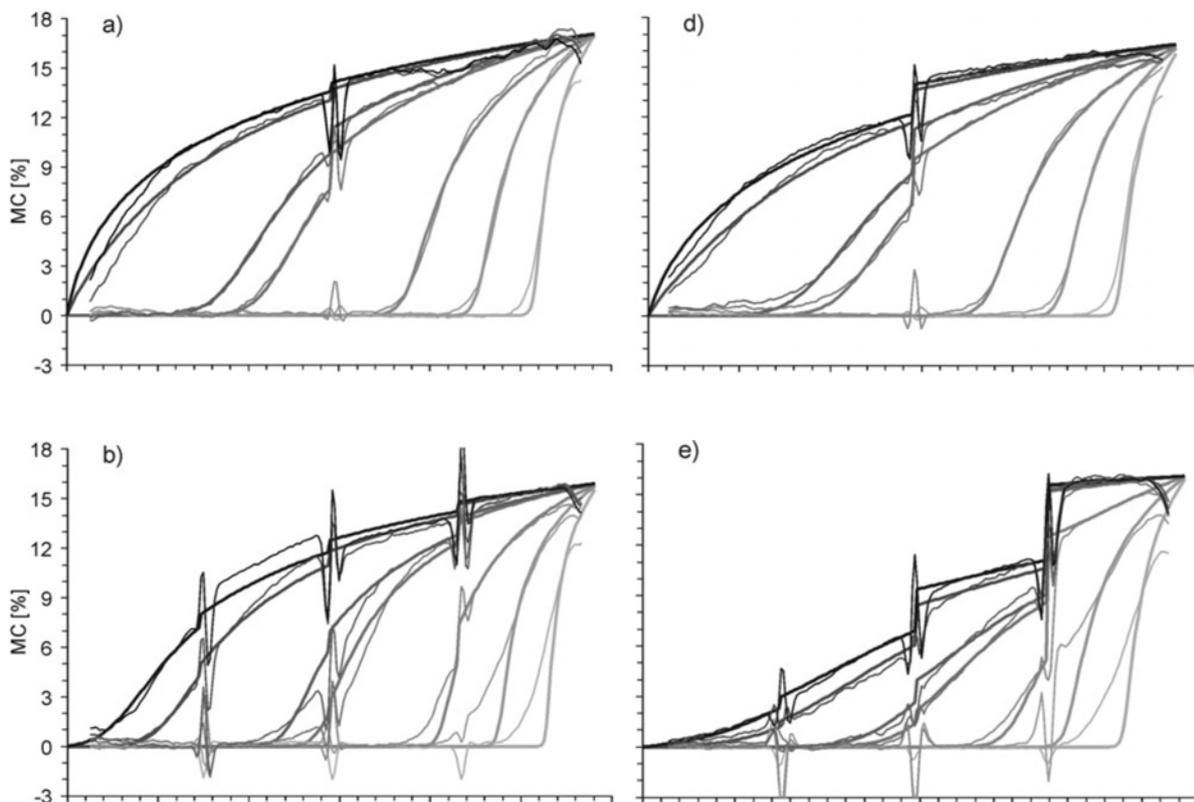
Die Ungenauigkeit der Ergebnisse wird mit fünf Prozent des Messwertes angegeben.

Hygrische Eigenschaften

Im Gegensatz zu den thermischen Eigenschaften werden die hygrischen Eigenschaften des Brettsperrholzes durch den hohen Wasserdampfdiffusionskoeffizienten der Klebeflächen signifikant beeinflusst. Der Diffusionskoeffizient ist ein Maß für die Beweglichkeit von Teilchen in einem Medium wie in diesem Fall von Wassermolekülen im Molekülgitter des Klebers oder in der Zellstruktur des Holzes. Hierzu wurde im Jahre 2010 ein Untersuchungsbericht zur quantitativen Bestimmung der Diffusion von gebundenem Wasser in mehrlagigen Brettlamellen mittels Neutronenradiographie veröffentlicht [30]. Es wurden Diffusionsprozesse an mehrlagigen Proben von Fichtenholz, welche einem Differenzklima (trocken/feucht) ausgesetzt waren, untersucht und quantifiziert. Die Proben wurden in zwei Serien über einem Zeitraum von circa zehn Wochen untersucht. Während dieser Zeit wurden die vorab darrgetrockneten Probekörper einem Differenzklima unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt:

- Serie 1: 20 °C Lufttemperatur / 85 % relative Luftfeuchte zu annähernd 0 %
- Serie 2: 20 °C Lufttemperatur / 90 % relative Luftfeuchte zu annähernd 0 %

Für die Verklebung der Proben wurden unterschiedliche Klebstoffe verwendet: (Polyvinylacetat (PVAc), Harnstoff-Harz (UF), Epoxidharz (EP) und Einkomponenten-Polyurethan (1K-PUR)). Der Feuchtegehalt der Proben wurde mittels Neutronenradiographie in bestimmten Zeitintervallen gemessen, um den Diffusionsprozess in die Proben nachzuverfolgen. Anschließend konnten die Diffusionskoeffizienten für die Klebstoffe sowie für das Fichtenholz in radialer und tangentialer Richtung in Abhängigkeit der schon vorhandenen Feuchte berechnet werden. Die Klebstoffe 1K-PUR und EP wiesen dabei bis zu drei Zehnerpotenzen niedrigere Diffusionskoeffizienten auf als das Fichtenholz. In Abbildung 126 zeigt Sonderegger die zeitliche Änderung der Holzfeuchte entlang der Probenhöhe. Es wird ersichtlich, dass der Diffusionswiderstand der Klebstofffugen stark von der Klebstoffart abhängt.



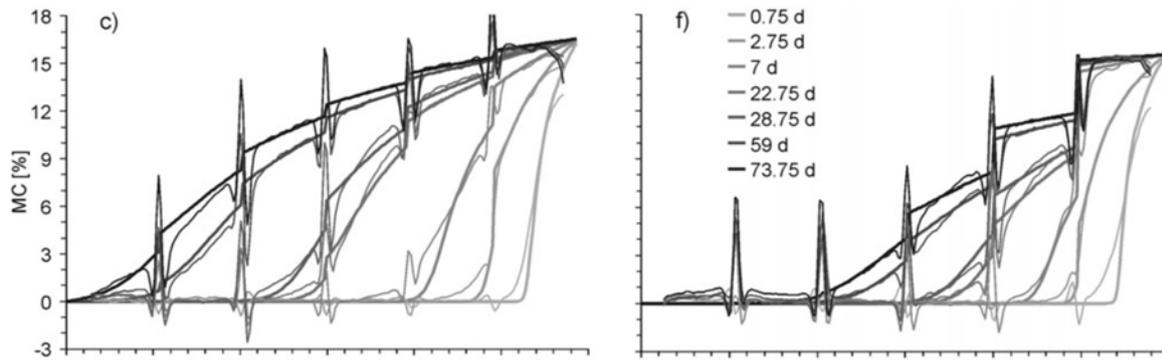


Abbildung 126: Vertikale Profile des Feuchtegehalts durch die Proben der Serie 1 mit 1, 3 und 5 Klebefugen während des Diffusionsprozesses (feine Linien = experimentelle Werte; fette Linien = berechnete Kurven); (a-c) UF, (d-f) 1K-PUR [30]

Außerdem kann für einige Klebstoffe eine Abhängigkeit des Diffusionswiderstandes vom Feuchtegehalt beobachtet werden. Je mehr Klebstoffugen im Probekörper vorhanden sind, desto langsamer kann sich die Wasserdampfkonzentration über den Querschnitt des Probekörpers ausgleichen [30].

Für die weiteren Betrachtungen liegt der Fokus auf dem Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff, welcher bei dem in diesem Projekt näher betrachteten Binderholz-Brettsperrholz verwendet wird. Dieser weist im Versuch von Sonderegger mit $\mu_{\text{Kleber}} = 6500$ einen 163-mal höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand auf, bei gleicher Schichtstärke, als das gemessene Fichtenholz mit $\mu_{\text{Fichte}} = 40$. Hieraus ergibt sich für die ca. 0,1 mm starke Klebefläche eine äquivalente Schichtstärke des Fichtenholzes von 16,3 mm [30].

Für die baupraktische Anwendung kann zur Beurteilung des Feuchteschutzes in Brettsperrholzelementen üblicher Stärke von einer diffusionshemmenden und dadurch dampfbremsenden Wirkung ausgegangen werden. Somit sind Brettsperrholzkonstruktionen in der Regel ohne weitere dampfbremsende Schichten ausführbar. Zusätzlich ist Brettsperrholz ab drei kreuzweise verleimten Brettlagen als luftdicht einzuschätzen. Im Bereich der Bauteilstöße zweier Brettsperrholzelemente kann die Luftdichtheit z. B. mit Kompressionsbändern oder Dichtungsschläuchen hergestellt werden [23].

9.2 Untersuchung zur Machbarkeit von thermisch aktivierten Massivholzelementen

9.2.1 Stand der Technik

Thermische Bauteilaktivierungen der Historie

Bei einer thermischen Bauteilaktivierung wird ein Heiz- oder Kühlmedium durch die tragende Konstruktion eines Gebäudes geleitet, um im Sinne der Raumkonditionierung eine Temperierung der raumumschließenden Hüllfläche zu erreichen. Der Wärmeaustausch mit dem Raum erfolgt dabei überwiegend radiativ [31].

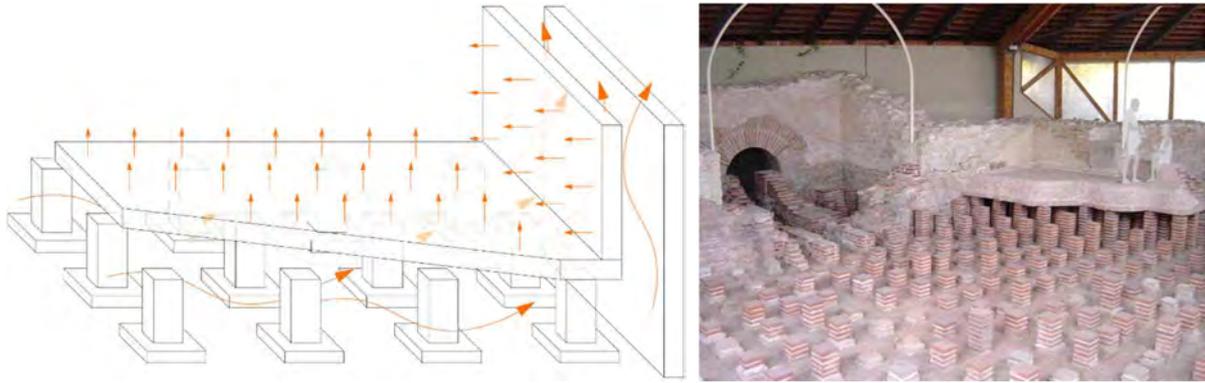


Abbildung 127: Schema der historischen Hypokaustenheizung der Römer, rechts Römisches Thermalbad der Stadt Weißenburg in Bayern [32].

Bereits die Römer waren sich den Vorzügen der Strahlungswärme durch thermisch aktivierte Bauteile bewusst. Sie beheizten die Böden und Wände ihrer Thermalbäder durch heiße Rauchgase, welche durch Hohlbodenkonstruktionen und Wandschächte geleitet wurden.

In den folgenden Abschnitten soll der heutige Stand der Technik im Bereich der thermisch aktivierten Bauteile erläutert werden.

Thermische Bauteilaktivierung mit Luft

Das klassische Anwendungsfeld von thermischen Bauteilaktivierungen heute ist der Massivbau. Dort zählt die wasserführende Betonkernaktivierung seit ca. 30 Jahren zum Stand der Technik, um energieeffizient die Grundlast der Kühlleistung eines Gebäudes abzudecken und ggf. im Winter die Raumheizung zu unterstützen. Seit einigen Jahren werden in diesem Bereich auch Systeme realisiert, die nicht Wasser sondern Luft als Wärmeüberträger nutzen [33]. So wurde das System Concretcool der Firma Kiefer im Jahr 2001 in die Betondecken eines Bürogebäudes eingebaut.

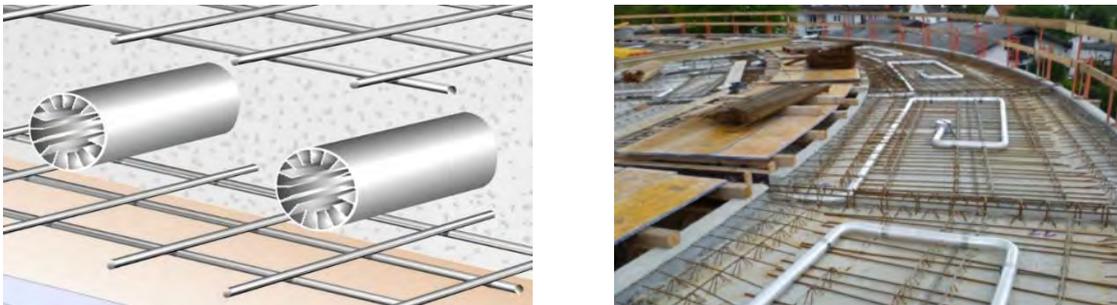


Abbildung 128: Das System Concretcool der Firma Kiefer [34].

Bei diesem System wird die Raumluft als Wärmeüberträger genutzt. Diese wird, bevor sie durch Zuluftauslässe in den Raum geblasen wird, zunächst durch ein Kanalnetz innerhalb der Betondecke geführt. Die Kanäle besitzen Rippen auf der Rohrlinnenseite, um die wärmeübertragende Mantelfläche und damit den Wärmefluss von der Luft in den Betonkern zu erhöhen. Die durchströmte Rohrlänge ist bei dem betreffenden Projekt mit 17 m angegeben. Auf der Basis eines simulationsgestützten Systemvergleichs zeigen Schwenk und Maas, dass das System im Kühlfall gegenüber einer klassischen wassergeführten Variante hinsichtlich des Nutzenergiebedarfes bei gleichem Komfort deutlich besser abschneidet. Im Heizbetrieb hebt sich dieser Vorteil während der Übergangszeit jedoch wieder auf, da die träge Masse dann als „unbeabsichtigte Kühlung“ wirkt, was den Heizenergiebedarf erhöht. Als vorteilhaft wird erwähnt, dass die Austrittstemperatur der Raumluft aus dem System fast schwankungsfrei bei 21 °C liegt. Die Raumluft hat beim Durchströmen des im Betonkern liegenden Rohres die Temperatur des massiven Bauteils angenommen [34].

Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage

Die Idee der thermischen Bauteilaktivierung wurde auch bereits auf den Massivholzbau übertragen. Von 2012 bis 2015 wurde am Internationalen Verein für Technische Holzfragen e. V. und am Institut für Holztechnologie der TU Dresden ein Forschungsvorhaben mit dem Titel „Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage“ durchgeführt [35].

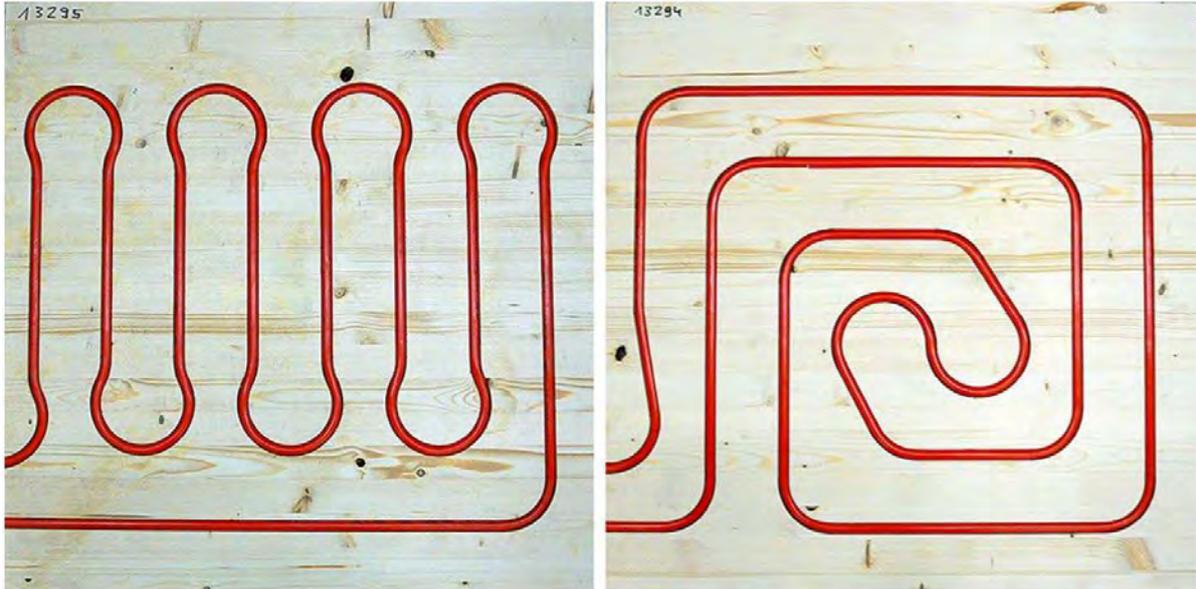


Abbildung 129: Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage aus einem Forschungsprojekt des Internationalen Vereins für Technische Holzfragen e. V. [35].

Es wurden dreilagige Massivholzplatten unterschiedlichen Lagenaufbaus entwickelt mit integrierten Wasserrohren, ähnlich einer Fußbodenheizung. Dabei wurden sowohl das Rohrverlegeschema als auch der verwendete Klebstoff getestet. Anschließend wurden die Biegefestigkeit, die Formstabilität sowie die Verklebungsqualität untersucht, um den Einfluss der Kanäle auf die Festigkeit einerseits und den Einfluss der Feuchte- und Temperaturschwankungen auf die Eigenspannungen andererseits zu beurteilen. Zusätzlich wurden Kleinraumversuche durchgeführt, um Aussagen bezüglich des Aufheiz- und Abkühlverhaltens treffen zu können. [35]

Das Forschungsprojekt zeigt, dass der Ansatz umsetzbar ist und dass viel Potenzial zu Produktentwicklungen für die Brettsperrholzindustrie und die Hersteller von Flächenheiz- und Kühlsystemen darin liegen. [36]

9.2.2 Entwicklungsparameter

Allgemeines

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines standardisierten thermisch aktivierten Massivholzelements, welches in einem breiten Anwendungsspektrum als Flächenheiz- und –Kühlsystem eingesetzt werden kann. Mit Hilfe eines numerischen Modells wird eine Einschätzung über die zu erreichende Heiz- und Kühlleistung getroffen und das entwickelte Element für konkrete Einsatzszenarien auslegbar gemacht. Ausgehend von dem üblichen Herstellungsprozess eines standardisierten Brettsperrholzprodukts soll die Entwicklung des Systems eine schnelle Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis ermöglichen. Zur Validierung des numerischen Modells wurden Prototypen des Systems in Originalgröße gebaut und im Labor getestet. Die Abmessungen des Versuchsaufbaus werden so gewählt, dass die Versuchskörper praxisüblichen Wandelementen entsprechen. Die Anwendung als Decken- oder Bodenelement soll in diesem Vorprojekt nicht betrachtet werden. Aufgrund des Aufwandes der Herstellung und der benötigten Zeit für die Langzeitlaborversuche werden zunächst zwei Versuchskörper realisiert. Auf den Erkenntnissen des

prototypischen Herstellungsprozesses und den Versuchsergebnissen aufbauend, sollen in einem fortführenden Projekt weitere, optimierte Versuchskörper hergestellt werden.

Überblick und Eingrenzung der Variationen

Die ersten Versuchskörper thermisch aktivierter Massivholzelemente, werden unter Berücksichtigung der folgenden Prämissen entworfen:

- anlagentechnische Erschließbarkeit des Elements in der späteren Einbausituation,
- planmäßige Holzfeuchtezustände im Heiz- und Kühlbetrieb und daraus resultierende Quell- und Schwindverformungen,
- Ausschluss kritischer Holzfeuchtezustände insbesondere im Kühlbetrieb und daraus resultierende holzschädigende Mechanismen,
- Wahl des Wärmeüberträgermediums,
- Robustheit gegen Beschädigungen im Nutzbetrieb,
- maximierte Heiz- und Kühlleistung,
- Gleichmäßigkeit der thermischen Leistungsdichte an der Oberfläche,
- minimierte notwendige Temperaturspreizung zwischen Systemluft und Oberfläche,
- Minimierte Strömungsverluste im Element,
- praktischer Überlegungen zum Ablauf des Herstellungsprozesses sowie
- stoffliche Wieder- und Weiterverwendbarkeit der Elemente nach der Nutzungsphase.

Unter Abwägung dieser Punkte und unter Berücksichtigung vorgegebener Schutzziele werden ein sicherheitsorientierter und ein leistungsorientierter Prototyp entwickelt, gebaut und im Labor getestet. Zur Reduzierung der möglichen Varianten wird beginnend festgelegt, dass die ersten Versuchskörper Wandelemente darstellen sollen. Diese können sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlbetrieb effektiv eingesetzt werden. Darüber hinaus erfordert die Integration des Heiz- und Kühlsystems in die Massivholzelemente ein hohes Maß an Standardisierung der Elementgrößen. Diese ist bei Wandelementen im Bereich der üblichen Geschosshöhen leichter zu erreichen als bei Deckenelementen, die je nach Grundriss des Gebäudes unterschiedlichste Formate annehmen müssen. Nach der genannten Festlegung soll die Entwicklung der thermisch aktivierten Massivholz-Wandelemente auf die Bauteile in der folgenden Graphik abzielen.

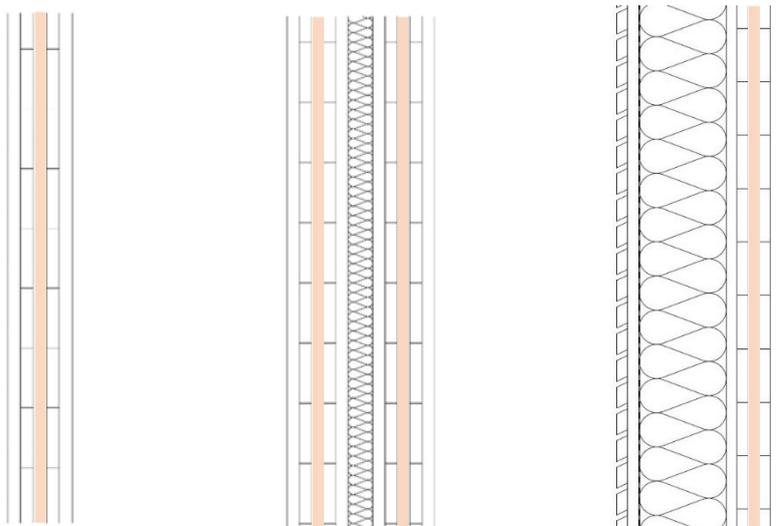


Abbildung 130: Ausgewählte Einsatzszenarien thermisch aktivierter Massivholzelemente, v. l. Innenwand in einer Nutzungseinheit, Innenwand zwischen zwei Nutzungseinheiten, Außenwand

In Abbildung 130 werden mögliche Wandaufbauten der thermisch aktivierten Massivholzelemente gezeigt. Diese Anwendungen sollen im Rahmen der folgenden Untersuchungen für die Bestimmung von Anforderungen maßgebend sein. Der detaillierte Aufbau der Bauteile kann von den in Abbildung 130 gezeigten Wandelementen abweichen.

Als nächstes soll die Wahl des Wärmeüberträgermediums getroffen und die Anzahl konstruktiver Varianten weiter reduziert werden.

Wahl des Wärmeüberträgermediums

Eine der auswirkungsreichsten Festlegungen bei der Entwicklung der thermisch aktivierten Massivholzelemente betrifft die Wahl des Wärmeüberträgermediums. Zunächst werden der Einsatz eines Luft- und eines wassergeführten Systems diskutiert. Die Festlegung des Mediums soll in einem zweistufigen Verfahren getroffen werden. Beginnend werden Vor- und Nachteile beider Systeme gesammelt und anschließend in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt.

In den folgenden zwei Tabellen werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der beiden Systeme aufgezählt.

Tabelle 29: Vor- und Nachteile einer Luftgeführten Bauteilaktivierung

Luftgeführtes System – Vorteile	Luftgeführtes System – Nachteile
keine Gefahr von Wasserschäden bei Leckagen	Geringere Volumen-bezogene Wärmespeicherfähigkeit der Luft
Kein Kanal- oder Rohrmaterial erforderlich	Deutlich höherer Zirkulationsenergieaufwand für das kompressible Medium Luft
Sehr gute Recyclbarkeit der Elemente	Zus. Wasser-Luft-Wärmetauscher und Gebläse am Element erforderlich
Überwachung und Regelung der Holzfeuchte möglich	Teilweise unerwünschte Feuchte-wechselwirkung zwischen Medium und Holz
Besserer Wärmeübergang vom Medium zum Holz	Höhere Temperaturspreizung zwischen gewünschter Oberflächentemperatur und Wärmeüberträgermedium erforderlich
Geringer Herstellungsaufwand durch einfachere Kanalgeometrie und keine weiteren Einbauten	Größere Schleifenanzahl erforderlich aufgrund der geringen Speicherfähigkeit der Luft
Kanäle prinzipiell auch für nachträgliche Elektroinstallationen o. ä. nutzbar	Hohlräume im Holz können sich nachteilig auf den Brandschutz auswirken

Tabelle 30: Vor- und Nachteile einer wassergeführten Bauteilaktivierung

Wassergeführtes System – Vorteile	Wassergeführtes System – Nachteile
Wärmeübergabesystem kann direkt an Verteilnetz der Gebäudes angeschlossen werden	Gefahr von Wasserschäden z. B. nach dem Einschlagen eines Nagels
Geringere Temperaturspreizung zwischen gewünschter Oberflächentemperatur und Wärmeüberträgermedium aufgrund der hohen Wärmespeicherfähigkeit vom Wasser	Der Einbau des Rohrsystems erfordert deutlich höhere Präzision und erweiterte Kompetenzen bei der Produktion des Brettsperrholzes
Geringer Zirkulationsenergieaufwand für das inkompressible Medium Wasser	Einbuße der Materialreinheit durch das Einbringen des Rohrmaterials
Keine hygrische Wechselwirkung zwischen Medium und Holz	Schlechterer Wärmeübergang vom Medium auf das Holzelement (Schwachstelle ist die Verbindung zwischen Rohrmantel und Holz)
Nicht vorhandene Hohlräume im Element wirken sich positiv auf den Brandschutz aus	Keine Überwachung der Holzfeuchte über das Wärmeüberträgermedium möglich
	Bei nicht ganzjährig betriebenen Gebäuden besteht die Gefahr von Frostschäden

Nach der Sammlung der Aspekte sollen diese in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt werden.

Tabelle 31: Bewertungsmatrix zur Wahl des Wärmeüberträgermediums

Aspekt		Wärmeüberträgermedium	
		Luft	Wasser
Herstellung	Fräsen der Kanäle	+/o	-
	Einbringen von Rohrmaterial	++	--
	Verkleben der Elemente	-	+
	Herstellungsaufwand insgesamt	o	--
Montage	Erschließbarkeit	o	+
	Schnittstelle / Anschluss	-	+
	Montageaufwand Baustelle	o	+
Betrieb	Robustheit	+	--
	Komfort	++	++
	Systemleistung	o	o
	Energieeffizienz	+/o	+
	Ressourceneffizienz	++	--
	Rückbau/Trennbarkeit	++	--

++ sehr gut(6P) **+**gut(4P) **o** durchschnittlich(3P) **-** schlecht(1P) **--** sehr schlecht(0P)

Mit der oben aufgeführten Punktebewertung ergibt sich: Luft(49P) zu Wasser(30P).

Bei den getroffenen Bewertungen in Tabelle 31 und den folgenden Erläuterungen handelt es sich um praktische Einschätzungen. Diese sind das Ergebnis der Überlegungen und Diskussionen im Vorfeld der Produktionsplanung. Es ist möglich, dass unter Berücksichtigung neuer Aspekte unterschiedliche Bewertungen resultieren. Zur Nachvollziehbarkeit der Einschätzungen sollen die bewerteten Aspekte kurz erläutert werden.

Fräsen der Kanäle

In der Komplexität der zu fräsenden Geometrien erweisen sich rechteckig angeordnete Kanäle mit jeweils rechteckigem Querschnitt als vorteilhaft gegenüber Rundquerschnitten die in der Ebene freiförmig verlaufen. Hier erhalten die Luftkanäle eine bessere Bewertung aufgrund deren wesentlich einfacheren Geometrien und geringeren Genauigkeitsanforderungen an den Fräsprozess.

Einbringen der Rohre

Dies ist nur beim wassergeführten System erforderlich. Vor dem Verschließen der Elemente ist eine Druckdichtigkeitsprüfung der Rohre durchzuführen. Hier werden neben den CNC-Fachkompetenzen auch haustechnische Kompetenzen in der Brettsperrholzproduktion benötigt. Aus dem zusätzlichen Integrationsaufwand resultiert eine negative Bewertung des wassergeführten Systems.

Verkleben der Elemente

Beim Verkleben der Elemente ist bei den Luftkanälen ein erhöhter Aufwand zu erwarten, da sicherzustellen ist, dass kein Kleber in die ausgefrästen Luftkanäle gerät und dort beim Aushärten zu leistungsreduzierenden Querschnittsverjüngungen führt.

Herstellungsaufwand insgesamt

In der Gesamtbewertung des Herstellungsprozesses ist beim wassergeführten System ein höherer Aufwand zu erwarten. Neben der reinen Holzverarbeitenden Kompetenz muss auch das Verlegen der Rohre im Element koordiniert und qualitativ überwacht werden. Zudem erfordern die Rund-Geometrien der gegengleichen Rohrschalen erhöhte Präzisionsanforderungen.

Erschließbarkeit

Bei der Erschließbarkeit wird das wassergeführte System besser bewertet, da die hydraulischen Anschlüsse wartungsfrei sind und bei deren Positionierung nicht auf eine dauerhafte Zugänglichkeit geachtet werden muss.

Schnittstelle / Anschluss

Der Anschluss des luftgeführten Systems erfordert eine Konditionierungseinheit für die Systemluft mit Gebläse und Wasser-Luft-Wärmetauscher. Dieser anlagentechnische Mehraufwand wird negativ bewertet.

Montageaufwand Baustelle

Wie zuvor beschrieben, erfordert das luftgeführte System eine Konditionierungseinheit am Erschließungspunkt des Elementes. Nachteilig wird dessen zusätzlicher Platzbedarf gesehen. Neben dem hydraulischen Anschluss ist zudem auch ein elektrischer Anschluss für das Gebläse beim luftgeführten System erforderlich. Daher wird der Montageaufwand des wassergeführten Systems positiv bewertet.

Robustheit

Ein großes Risiko liegt in den im Massivholzelement verlaufenden Wasserleitungen. Sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Beschädigung während der Nutzungsphase als auch der resultierende Schaden wird bei dem wassergeführten System kritisch gesehen. Eine nachträgliche Reparatur einer beschädigten Rohrleitung ist mit hohem Aufwand verbunden und würde bei Elemente mit Sichtholzoberflächen voraussichtlich den Austausch des Wandelements erfordern. Schwindrisse an

den Oberflächen der Elemente müssen sowohl beim luftgeführten als auch beim wassergeführten System während des Heizbetriebs planmäßig berücksichtigt werden. Im Kühlbetrieb ist eine Abkühlung der Elemente bis auf die Taupunkttemperatur regelungstechnisch auszuschließen. Letzteres trifft für sämtliche Flächenkühlsysteme zu und ist seit 30 Jahren Stand der Technik.

Komfort

Die thermische Aktivierung der Massivholzelemente wird als überdurchschnittlich behagliche Raumtemperaturkonditionierung angesehen. Dies gilt unter der Prämisse, dass die Regelung des Systems eine kritische Strahlungstemperatursymmetrie vermeidet.

Systemleistung

Die thermische Leistung ist im Wesentlichen abhängig von der Vorlauftemperatur des Wärmeüberträgermediums, der Überdeckung der aktivierenden Schicht, dem Abstand der Kanäle zueinander sowie der rückwärtigen Dämmung des Wandelements. Die thermische Leistung des Systems liegt im unteren Bereich im Vergleich mit üblichen Wandtemperierungssystemen.

Energieeffizienz

Sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb können beide Systeme mit moderaten Vorlauftemperaturen nahe der Raumsolltemperatur betrieben werden. Dies erhöht den Ausnutzungsgrad von erneuerbaren Wärmequellen und –senken. Die Energieeffizienz beider Systeme wird positiv bewertet.

Ressourceneffizienz

Die Ressourceneffizienz beider Systeme kann aufgrund der Verwendung des nachwachsenden Rohstoffs Holz als positiv bewertet werden. Ein zusätzliches Heiz- oder Kühlsystem kann in vielen Anwendungen entbehrlich werden. Durch das Einbringen der Rohrleitungen in das Massivholzelement verliert dieses seine stoffliche Reinheit, weshalb unter diesem Aspekt dem wassergeführten System Abstriche in der Bewertung gemacht werden.

Rückbau/Trennbarkeit

Mit Blick auf die Wiederverwendbarkeit der verbauten Stoffe wird das wassergeführte System als Kompositmaterial negativ bewertet.

Wahl des Wärmeüberträgermediums.

Die Festlegung auf ein Wärmeüberträgermedium stellt sich als ein komplexer Entscheidungsprozess dar. Viele der oben aufgeführten Aspekte überlagern oder beeinflussen sich wechselseitig. Die getroffene Punktebewertung zu Gunsten des Wärmeüberträgers Luft kann dabei zunächst ein Anhaltspunkt sein. Im Rahmen einer Expertenrunde im Dezember 2016 wurde definiert, dass dem Aspekt der Robustheit die höchste Priorität zugestanden werden soll. Unter diesem Aspekt bestätigte sich das Ergebnis der Punktebewertung nach Tabelle 31.

Unter Abwägung der zuvor diskutierten Aspekte wird folglich entschieden, dass die Entwicklung der thermisch aktivierten Massivholzelemente auf der Basis eines luftgeführten Wärmeübertragungssystems erfolgen soll.

Arrangement der Luftkanäle

Vorteile und Nachteile unterschiedlicher Luft-Kanalarrangements sollen anhand der folgenden Schemata erläutert werden. Dabei soll zunächst auf grundsätzlich unterschiedliche Verschaltungsprinzipien der Kanäle und der Erschließung der Elemente eingegangen werden. Im Weiteren werden die Lagetiefe der Kanäle, deren Querschnitt und die Strömungsweglänge diskutiert.

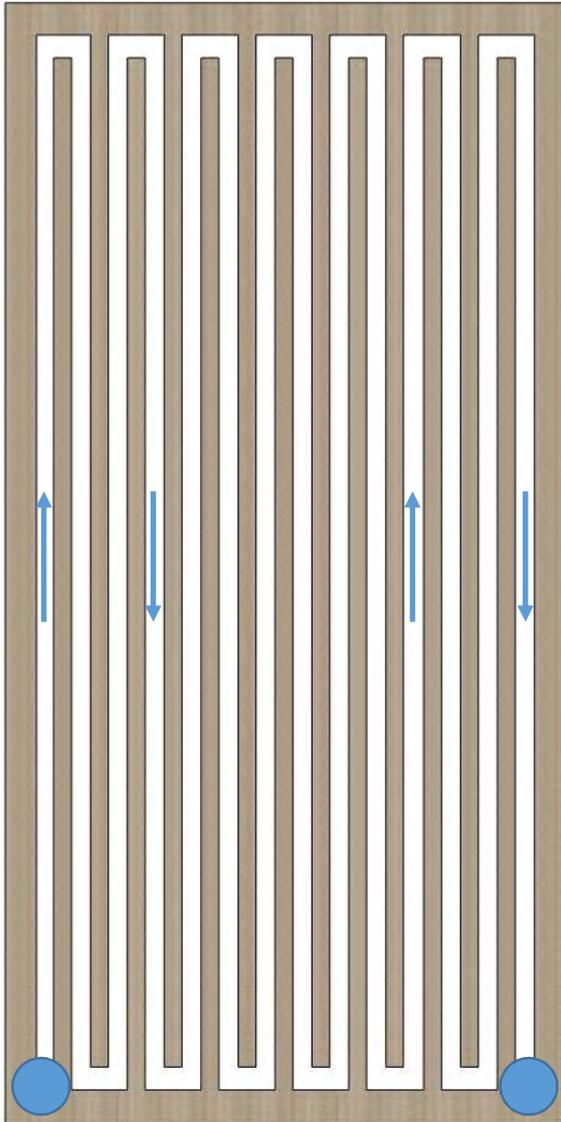


Abbildung 131: Mäanderförmige Serien-schaltung der Kanäle mit einseitiger Erschließung im Sockelbereich

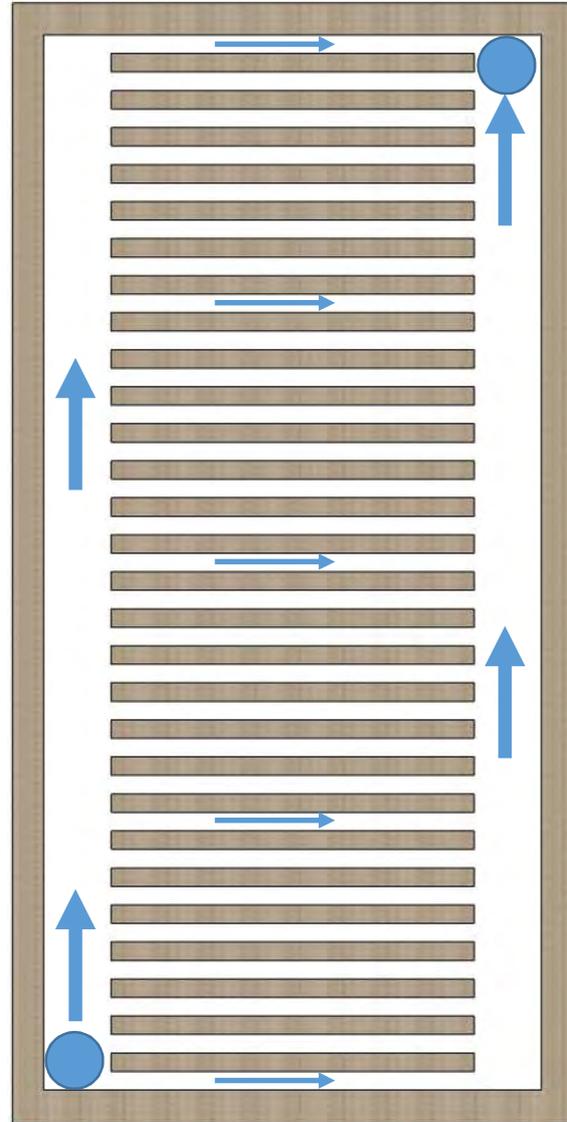


Abbildung 132: Harfenförmige Parallel-schaltung mit diagonaler Erschließung, horizontale Einzelkanäle

Die Abbildung 131 zeigt ein mäanderförmiges Kanalarrangement wie es z. B. bei Wasserrohren in Fußbodenheizungen üblich ist. Aus dieser seriellen Verschaltung der Kanäle ergibt sich die größte Strömungsweglänge. Aufgrund der geringen Wärmespeicherfähigkeit der Luft wird deren Temperaturüberhöhung schon nach wenigen Metern abgebaut, sodass stets nur ein Teil der Elementfläche thermisch aktiviert würde. Diese Variante wird für den Wärmeüberträger Luft nicht weiter betrachtet. Die Abbildung 132 zeigt ein Arrangement, in dem alle Einzelkanäle parallel durchströmt werden. Durch die diagonal entgegengesetzte Anordnung der Ein- und der Ausströmöffnung befinden sich alle Kanäle im hydraulisch abgeglichenen Zustand zueinander, da der Strömungsweg über sämtliche Pfade exakt gleich lang ist. Einzig der aufwärts gerichtete Impuls der einströmenden Luft bewirkt, dass die unteren Kanäle etwas weniger stark durchströmt werden als die

oberen. Der große Nachteil dieser Variante ist die Erschließbarkeit. Ein Versorgungskanalanschluss an der oberen Position lässt sich in der üblichen Praxis voraussichtlich kaum realisieren.

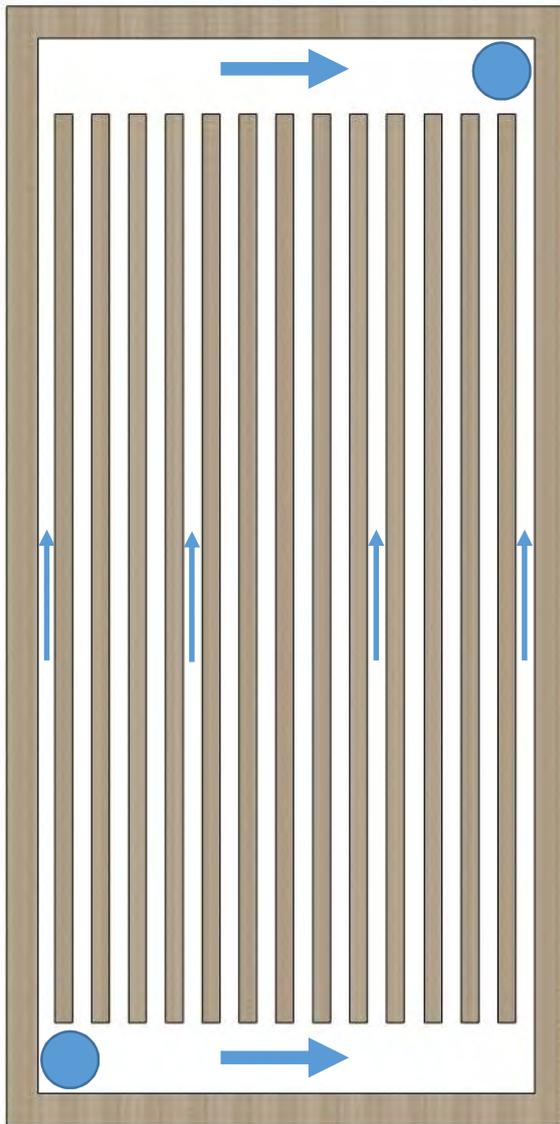


Abbildung 133: Harfenförmige Parallel-schaltung mit diagonaler Erschließung, vertikale Einzelkanäle

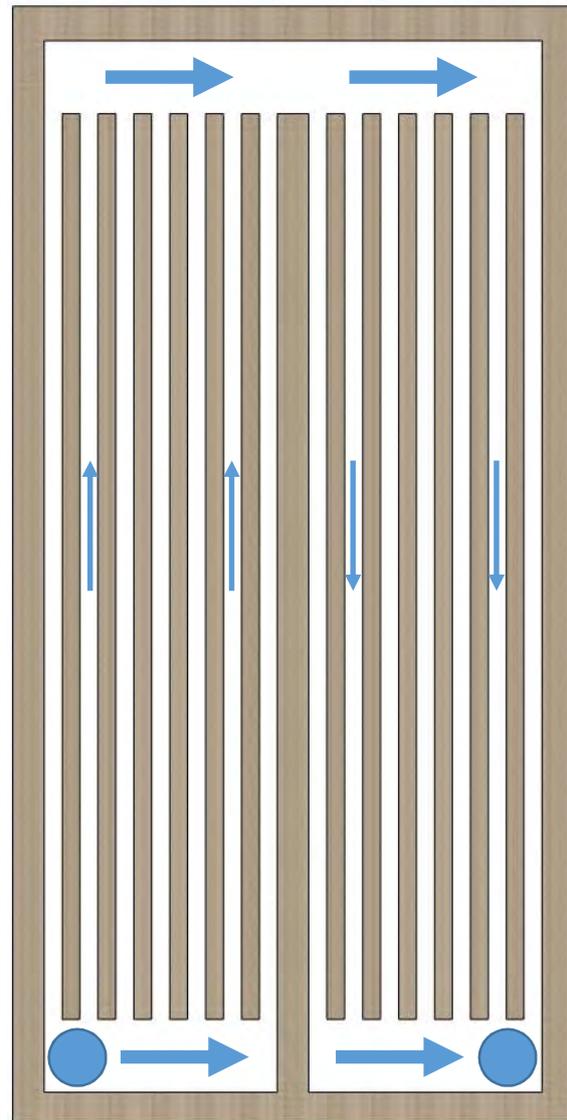


Abbildung 134: Harfenförmige Serien-Parallelschaltung mit Erschließung im Sockelbereich, vertikale Einzelkanäle

Ähnlich ist die in Abbildung 133 gezeigten Variante zu bewerten. Die Strömungspfade der Systemluft sind optimal kurz. Problematisch ist wieder die Erschließungsposition der Ausströmöffnung. Ein optimierter Kompromiss ist die Variante der Abbildung 134. Auch hier befinden sich sämtliche Strömungspfade im hydraulischen Abgleich zueinander. Die Strömungswege sind mit ca. zweimal der Elementhöhe plus einmal der Elementbreite länger als die der diagonalen Varianten. Beide Anschlüsse der Elementerschließung befinden sich auf der unteren Seite. Dadurch kann die Luftkonditionierungseinheit im Fußbodenaufbau untergebracht werden.

Die Variante der Abbildung 134 wird als realistisch umsetzbar angesehen und in den folgenden Kapiteln als Grundlagen der Entwicklung genutzt.

Lagetiefe der Luftkanäle

Das zu entwickelnde System sollte zum einen eine möglichst hohe spezifische Heiz- und Kühlleistung aufweisen und auf der anderen Seite robust sein. Die thermische Leistung der Flächenheizung ist insbesondere abhängig von der Überdeckung der aktiven Schicht sowie von der Vorlauftemperatur. Die Vorlauftemperaturüberhöhung gegenüber der gewünschten Oberflächentemperatur sollte möglichst gering sein, um mit moderaten Vorlauftemperaturen einen möglichst hohen Ausnutzungsgrad von erneuerbaren Energiequellen zu ermöglichen. Beispielsweise kann bei einer zum Heizen notwendigen Vorlauftemperatur von 30 °C eine Wärmepumpe noch sehr effizient betrieben werden. Steigt die notwendige Vorlauftemperatur auf über 55 °C an, wird die Leistungszahl der Wärmepumpe zunehmend schlechter.

Im Sinne der Energieeffizienz ist eine möglichst geringe notwendige Temperaturüberhöhung. Je dicker die Holzschicht zwischen Raum und aktivierender Schicht, desto höher ist die notwendige Temperaturüberhöhung. Allerdings tritt bei geringer werdender Holzüberdeckung der Aspekt der Systemdichtheit in den Vordergrund. Um eine Luftdichtheit zwischen Systemluft und Raumluft herzustellen, sollten mindestens eine ungestörte schmalseitenverleimte Brettlamellenschicht und eine ungestörte Leimfläche zwischen der luftführenden Schicht und der Raumbooberfläche vorhanden sein. Der Schichtenaufbau des Brettsperrholz-Standardproduktes Binderholz Brettsperrholz BBS-125-Systemformat beginnt mit einer vertikalen schmalseitenverleimten Deckschicht. Die zweite Schicht ist horizontal ausgerichtet und standardmäßig nicht schmalseitenverleimt. Die dritte Schicht ist wieder vertikal ausgerichtet. Bei der Positionierung der luftführenden Schicht stellt sich die Frage, ob diese in die dritte oder in die zweite Schicht integriert werden kann. Bezüglich der Systemleistung und der Energieeffizienz sollte die Schicht zwei die geeignetere Lage sein. Fraglich ist, ob die verbleibende erste Schicht die raumseitige Luftdichtheit gewährleisten kann. Die konservativere Variante ist also, die luftführende Schicht in die dritte Brettlamellenschicht zu integrieren. So wäre die Luftdichtheit durch die beiden Schichten eins und zwei sowie durch die dazwischenliegende ungestörte Leimschicht gewährleistet. Ausgehend von dem Systemformat BBS 125 mit einem praxisüblichen fünfschichtigen Aufbau in der Stärke 100 mm ergibt sich für die beiden angedachten Varianten eine Holzüberdeckung von 20 bzw. 40 mm.

Durch Laborversuche soll überprüft werden, ob im laufenden Heizbetrieb Leckagen im Element oder andere unvorhergesehene Erscheinungen auftreten. Für die zwei angedachten Varianten soll jeweils ein Prototyp hergestellt werden. Ab sofort wird der sicherheitsorientierte Versuchskörper mit der luftführenden Schicht in Lage drei „Prototyp A“ genannt. Der leistungsorientierte Versuchskörper mit der luftführenden Schicht in Lage zwei wird Prototyp B genannt. Die folgenden zwei Abbildungen illustrieren den Aufbau der beiden Prototypen.

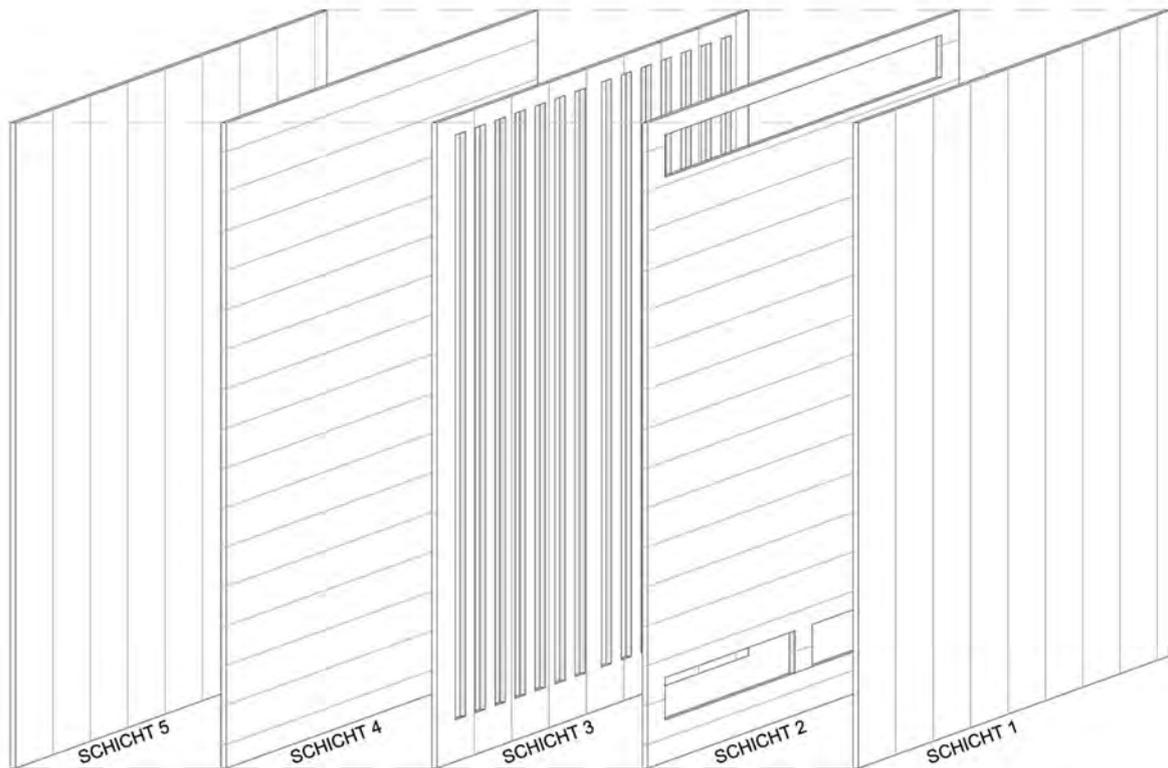


Abbildung 135: Prototyp A mit der Luftführenden Schicht in Brettlamellenlage drei

Bei dem sicherheitsorientierten Prototypen B befinden sich die Luftkanäle in Schicht drei. Die Überdeckung beträgt durch die ersten beiden Schichten insgesamt 40 mm. Um die Stabilität des Schichtenaufbaus nicht unnötig zu schwächen, werden die horizontalen Erschließungskanäle parallel der Brettlamellen in Schicht zwei integriert.



Abbildung 136: Prototyp B mit der Luftführenden Schicht in Brettlamellenlage zwei

Beim leistungsorientierten Prototyp B befinden sich sämtliche Luftkanäle in der zweiten Schicht. Die Überdeckung der aktivierten Sicht ist mit 20 mm halb so stark wie bei Prototyp A. Durch die Laborversuche sollen die Leistungsdaten beider Prototypen ermittelt und geprüft werden ob sich an der Elementoberfläche im Heizbetrieb Schwindrisse oder sonstige Beeinträchtigungen bilden.

9.3 Produktion der Versuchskörper

9.3.1 Produktionskonzept

Möglichst ressourcensparend sollen zwei Versuchskörper auf der Grundlage des Binderholz-Systemformats BBS 125 produziert werden. Daher werden in einem Produktionsablauf zwei Prototypen eines üblichen Wandelements von je 1250x2450 mm des fünfschichtigen Aufbaus hergestellt. Die Länge der zu verklebenden Elemente errechnet sich aus der zweifachen Elementlänge (2 x 2450 mm) zzgl. einer 10 mm Sägeblattfuge und einer 90 mm Materialproben-Überlänge an der Unterseite des Elements. Die Breite aller Elemente soll 1250 mm betragen, da dies ein übliches Achsmaß in standardisierten Gebäudegrundrissen ist und so ein geringerer Anpassungsbedarf bei der späteren Projektierung des Systems erwartet wird. Die zwei Prototypen A und B unterscheiden sich wie zuvor beschrieben in der Lage der Längskanäle:

Die Herstellung erfolgt in vier Schritten:

- 1a.) Herstellung vorderseitigen Halbelements aus den Schichten eins und zwei,
- 1b.) Herstellung des rückseitigen Halbelements aus den Schichten drei, vier und fünf,
- 2) Fräsen der Kanäle in die beiden Halbelemente entsprechend der nachfolgenden, Zeichnungen,
- 3.) Verkleben und Verpressen der beiden Halbelemente,
- 4.) Zuschnitt der beiden Prototypen A und B.

9.3.2 Bemaßung

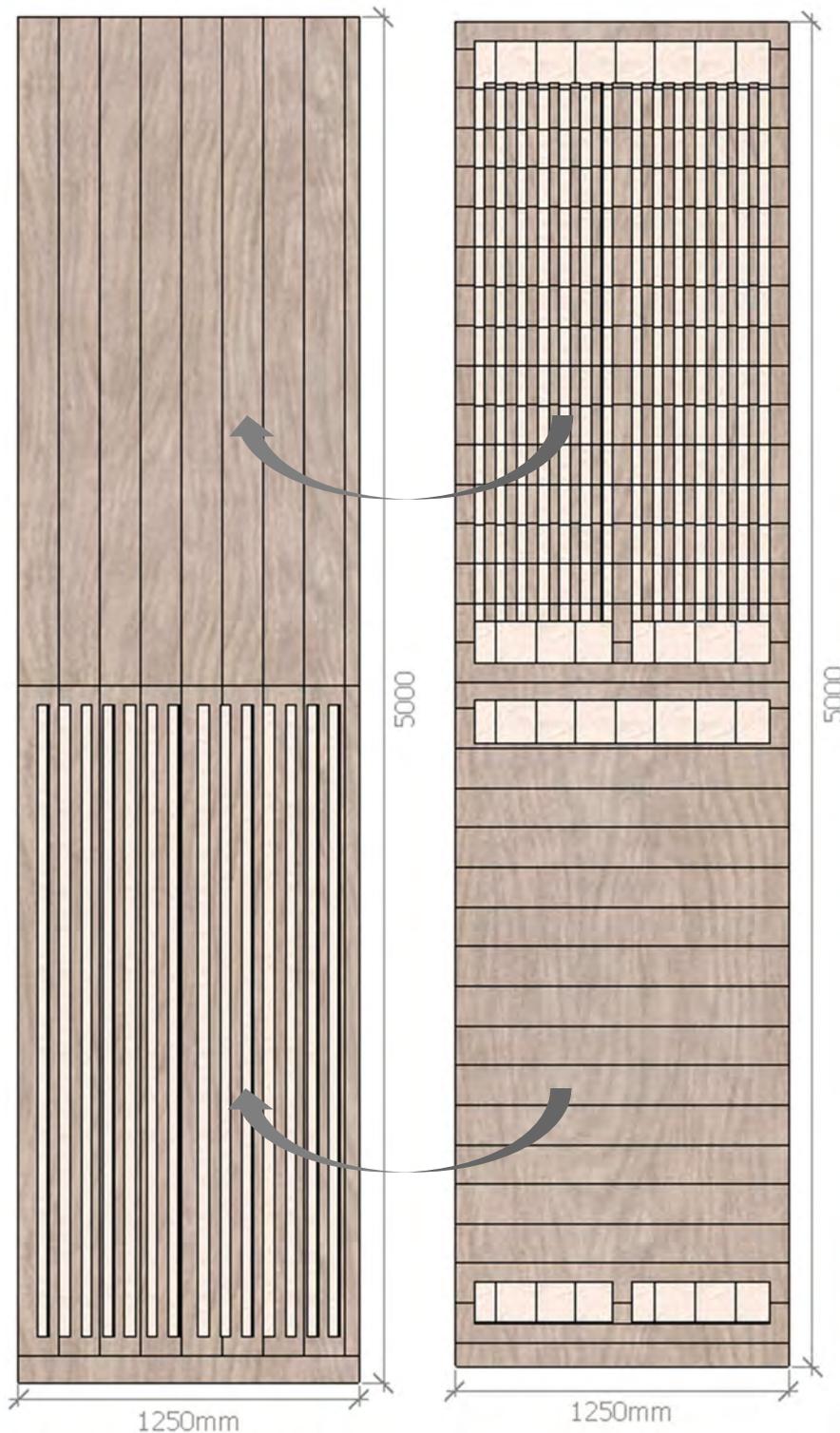


Abbildung 137:

Links: rückseitiges Halbelement aus den Schichten 3,4,5

Rechts: vorderseitiges Halb-element aus den Schichten 1,2

Bei der Verklebung sollen die im Bild gezeigten offenen Seiten mit Kleber benetzt und später zusammengeklappt werden.

Nach dem Verpressen und Aushärten der Halbelemente sollen diese entlang der mittleren Querfuge in die Prototypen A (unten) und Prototyp B (oben) zersägt werden.

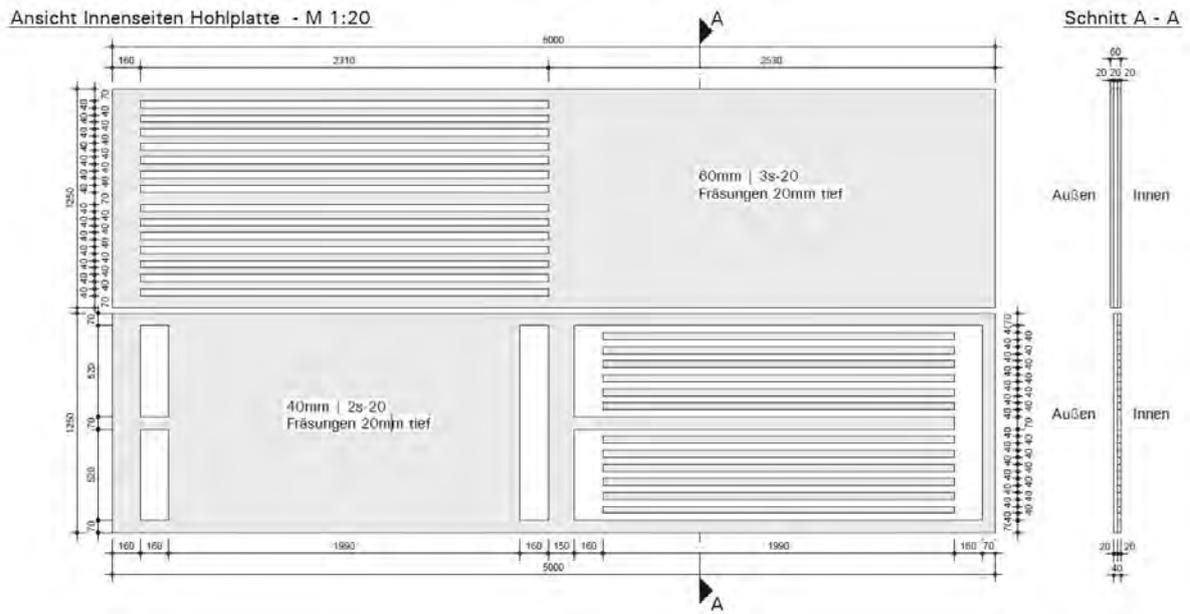


Abbildung 138: Abbundbemaßung für die Herstellung der Prototypen A und B [25]

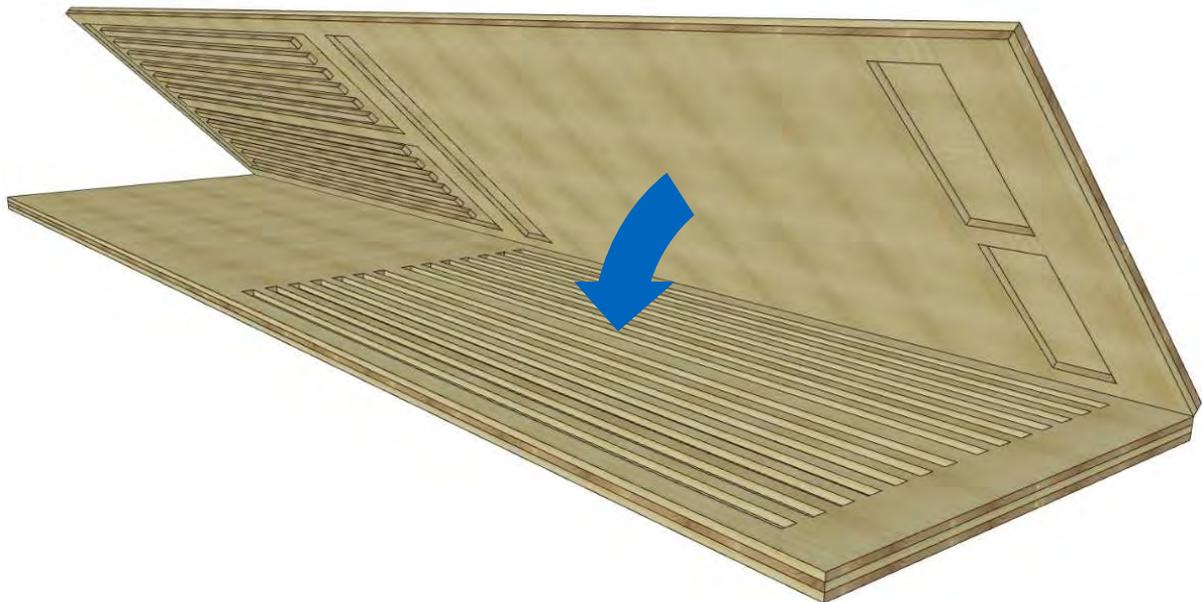


Abbildung 139: Produktionsfolge Fräsen der Kanäle, Kleberauftrag, Zusammenklappen, Verpressen und Aushärten [25]

9.3.3 Produktion



Abbildung 140: Vor dem Abbund durch das Portalbearbeitungszentrum wird das Werkstück auf dem Träger fixiert

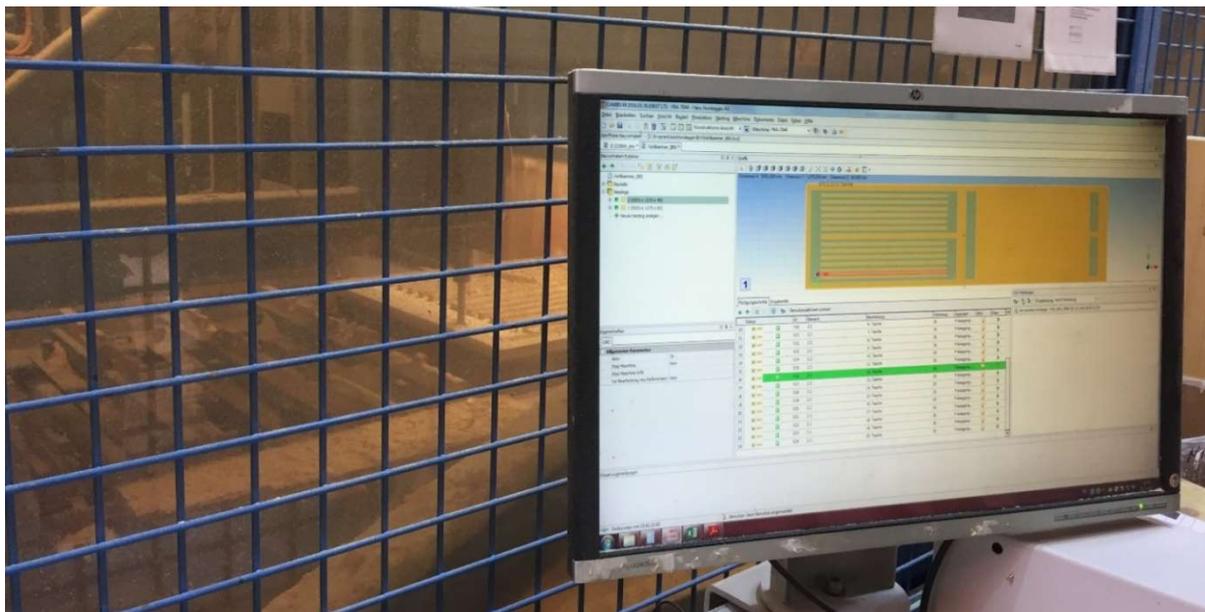


Abbildung 141: Das Layout für den Abbund wird mittels G-Code dreidimensional vorgegeben



Abbildung 142: Der Abbund der Halbelemente erfolgt mit einem 30mm Nutfräser. Bei quer zur Faserrichtung verlaufenden Fräskanälen ist auf die Schmalseitenverleimung zu achten um eine Sperrwirkung gegen Abscherungen zu bewirken.



Abbildung 143: Das Fräsen der Kanäle in Schicht zwei hat auch quer zur Faserrichtung dort problemlos funktioniert wo die Lamellen schmalseitenverleimt sind. Als problematisch hat sich der nicht schmalseitenverleimte Stoß zwischen den Massivholzplatten herausgestellt. Siehe Abbildung 145.



Abbildung 144: Die Maßhaltigkeit der Abbundanlage liegt im Bereich $< 1/10$ mm. Stichprobenartig konnte diese Toleranz bestätigt werden. Zur späteren Positionierung der Messsensoren wurden die Stege markiert.



Abbildung 145: Die querliegende Schicht zwei wurde aus schmalseitenverleimten Massivholzplatten hergestellt. Der Stoß dieser Platten besteht aus der in der linken Abbildung gezeigten V-Nut. Die Folge waren Abscherungen, welche beim Fräsen der Kanäle in Schicht zwei in Höhe der V-Nut aufgetreten sind.



Abbildung 146: Die Abscherungen in Schicht zwei wurden zunächst auf ein definiertes Maß ausgefräst und dann durch das Einkleben von Füllstücken versiegelt. Vor dem Verkleben wurden diese plangeschliffen.



Abbildung 147: Um Undichtigkeiten durch die V-Nut im zweiten Halbelement zu vermeiden wird diese versiegelt.

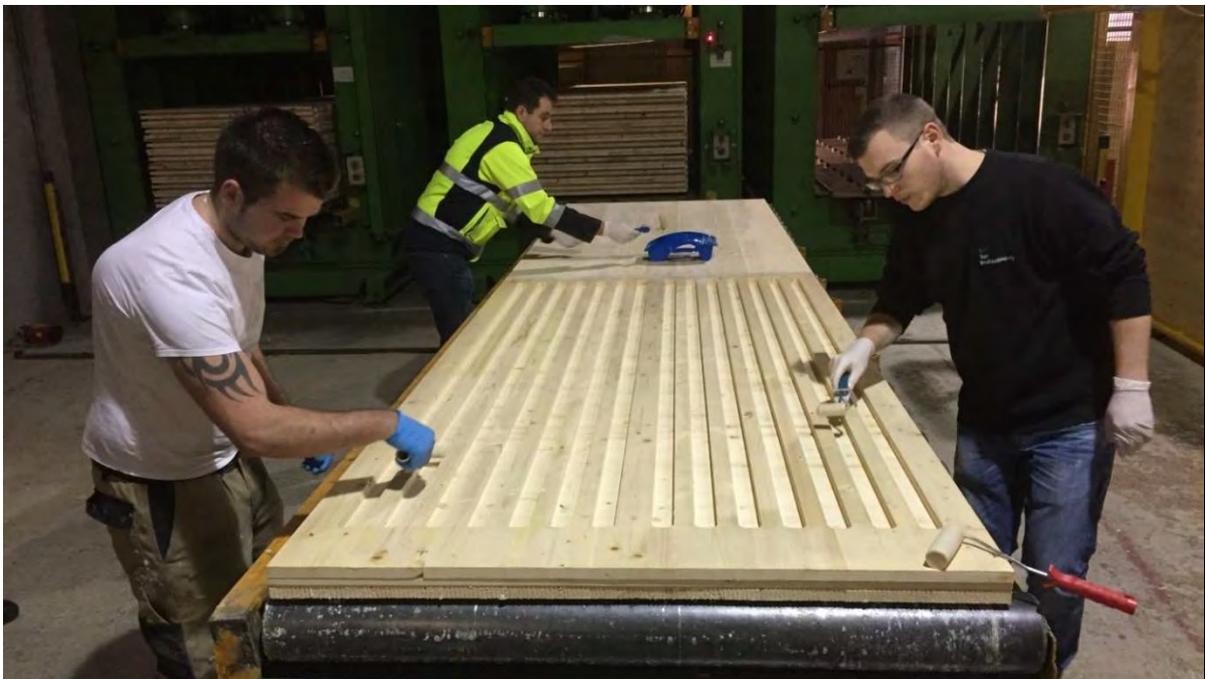


Abbildung 148: Der Auftrag des Klebers erfolgt manuell auf das rückseitige Halbelement. Die benötigte Zeit für diesen manuellen Vorgang betrug ca. fünf Minuten.



Abbildung 149: Verpressen und Aushärten der Halbelemente im hydraulischen Pressbett.

9.3.4 Bewertung des Herstellungsprozesses

Rückblickend kann festgehalten werden, dass der Herstellungsprozess von luftgeführten thermisch aktivierten Massivholzelementen weitgehend mit verfügbaren, erprobten Produktionsanlagen realisierbar ist. Das Fräsen der Längskanäle könnte durch die Wahl eines Scheibennutfräsers beschleunigt werden. Bei diesem Fräswerkzeug wird zudem durch eine geringere Rauigkeit der Kanaloberflächen eine Reduzierung der Rohrreibungsdruckverluste erwartet. Der einzige irreguläre, rein manuelle Prozess bei der Herstellung der beiden Prototypen war der Auftrag des Klebers.

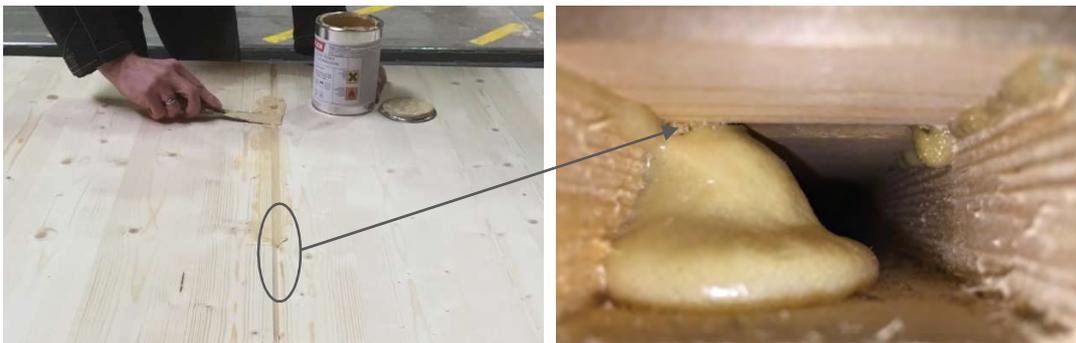


Abbildung 150: Problemstelle V-Nut in den Querlagen

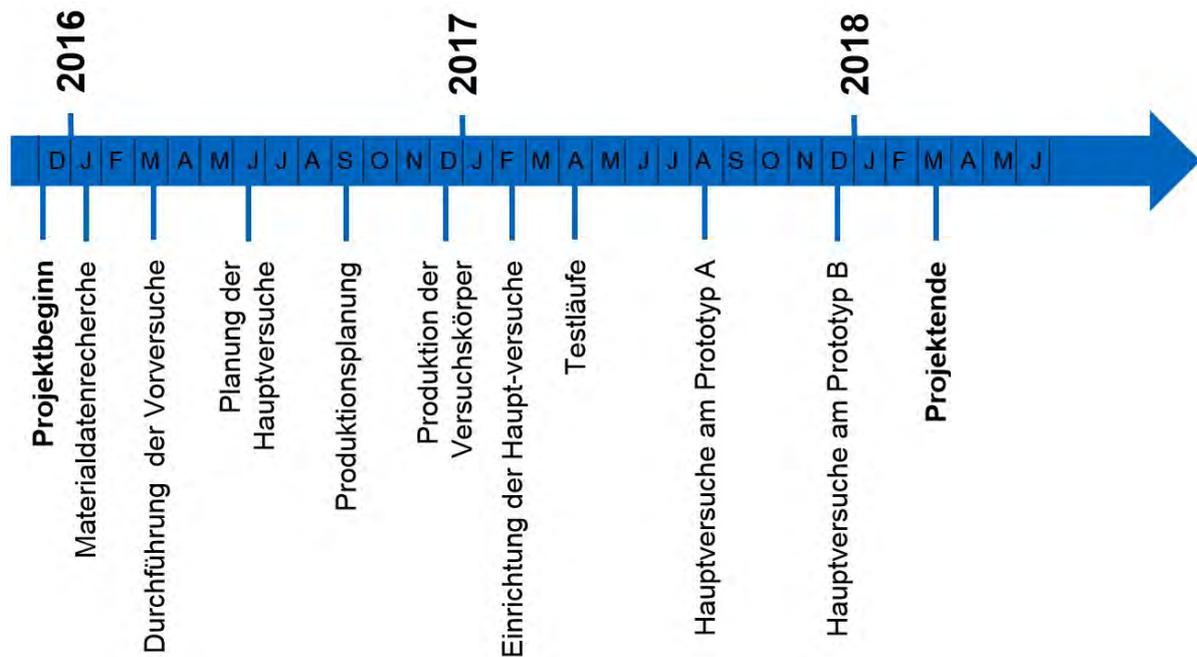
Problematisch haben sich die Mulden der versiegelten V-Nut erwiesen, in denen sich ein Reservoir von Kleber gesammelt hat, welcher beim Aushärten teilweise in die Luftkanäle gedrungen ist. Der in einen Längskanal des Prototyp A eingedrungene Kleber schnürte den Querschnitt des betroffenen Kanals auf ca. die Hälfte ein. Auf Thermographien im Heizbetrieb konnte dieser Kanal anhand der geringeren Leistung und Oberflächentemperatur bereits vor dem Öffnen des Prototyp A eindeutig identifiziert werden.

Für die weitere Entwicklung des Systems und den Bau weiterer Versuchskörper sollte eine detailliertere Planung des Beleimungsvorganges sowie eine entsprechende Vorbereitung der Halbelemente vorgesehen werden. Eine deutliche Optimierung des Herstellungsprozesses ist zu erwarten, wenn die Düsenbrücke, durch die der Kleber auf die Flächenelemente aufgetragen wird,

eine einzelne oder kleingruppenweise Ansteuerung der Düsen ermöglichen würde. Hierdurch könnte die aufgetragene Klebermenge sehr präzise erfolgen und automatisch überwacht werden. In einem Vorprozess könnte im Rahmen einer Qualitätskontrolle die Oberfläche gescannt und auf Fehlstellen an den Grenzen der Kanäle durch eine leicht reduzierte Klebermenge oder die vorherige Korrektur der Fehlstelle reagiert werden.

9.4 Laborversuche

9.4.1 Zeitplanung



Die Versuche gliedern sich in Kurzzeitversuche, in denen die thermischen Eigenschaften der Probekörper bestimmt werden und Langzeitversuche zur Untersuchung des hygrischen Verhaltens. Zu den thermischen Eigenschaften zählen die erreichte Oberflächentemperatur sowie die Heiz- und Kühlleistung in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Vorlauf- und Nachlaufzeit des Systems. Hierfür werden je Versuch ca. zwei Wochen eingeplant.

Das hygrische Verhalten betrifft das Aufweichen und Abtrocknen der Elemente in Abhängigkeit der betriebenen Heiz- und Kühlleistung und des umgebenen Raumklimas. Die Feuchteänderung im Holz ist ein verhältnismäßig langsamer Prozess. Hierfür werden drei Monate je Prototyp eingeplant.

9.4.2 Versuchskonfiguration

Das Primärziel der Versuche ist, thermisch- hygrische Vergleichsdaten für eine numerische Systemsimulation der Elemente zu gewinnen. Ein Simulationsmodell zur gezielten Weiterentwicklung und Auslegung in realen Einsatzszenarien soll so validiert werden. Der Umfang der Messtechnik und die Positionierung der Datenpunkte orientieren sich an der Vergleichbarkeit zwischen simulierten und gemessenen Größen. Darüber hinaus werden einige Sensoren zur Überprüfung der Regelungstechnik außerhalb des Probekörpers benötigt. Aus organisatorischen Gründen werden die Lufttemperatur-, Materialtemperatur-, Luftfeuchte-, Materialfeuchte, und Wärmeflussensoren in und an den Probekörpern nach der Produktion im Labor eingebaut. Die Versuche sollen in einem Temperatur- und Luftfeuchtegeregeltem Bereich des Laboratoriums des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion durchgeführt werden. Sämtliche Raumklimaparameter, welche auf das hygrothermische Verhalten des

Probekörpers einwirken, werden aufgezeichnet. Aus Platzgründen soll der Versuchsstand beweglich gelagert sein. Ziele des ersten Laborversuchs sind die Feststellung der maximalen Systemleistung im Heizbetrieb und im Kühlbetrieb in Watt je Quadratmeter Systemfläche sowie die Dokumentation auftretender Materialbeeinträchtigungen. Die Erschließung des Wandelementes soll in der Ebene des Fußbodenaufbaus erfolgen. Hierzu soll eine Luftkonditionierungseinheit mit Heiz- und Kühlregister sowie Ventilator im Sockelbereich vor dem Wandelement konstruiert und an das Element angeschlossen werden.

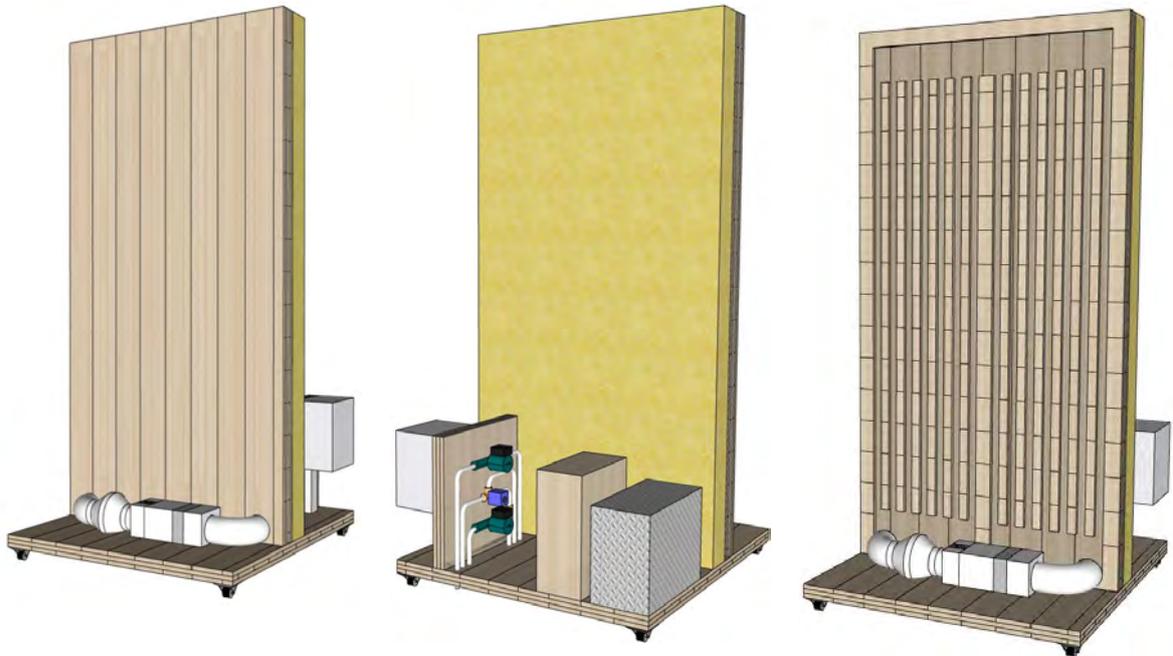


Abbildung 151: Visualisierung der Versuchskonfiguration – Links: Vorderansicht, Mitte: Rückansicht, Rechts: Vorderansicht mit ausgeblendeter erster Schicht am Prototyp B; nicht dargestellt ist die Stirnseitendämmung oben und an den Seiten

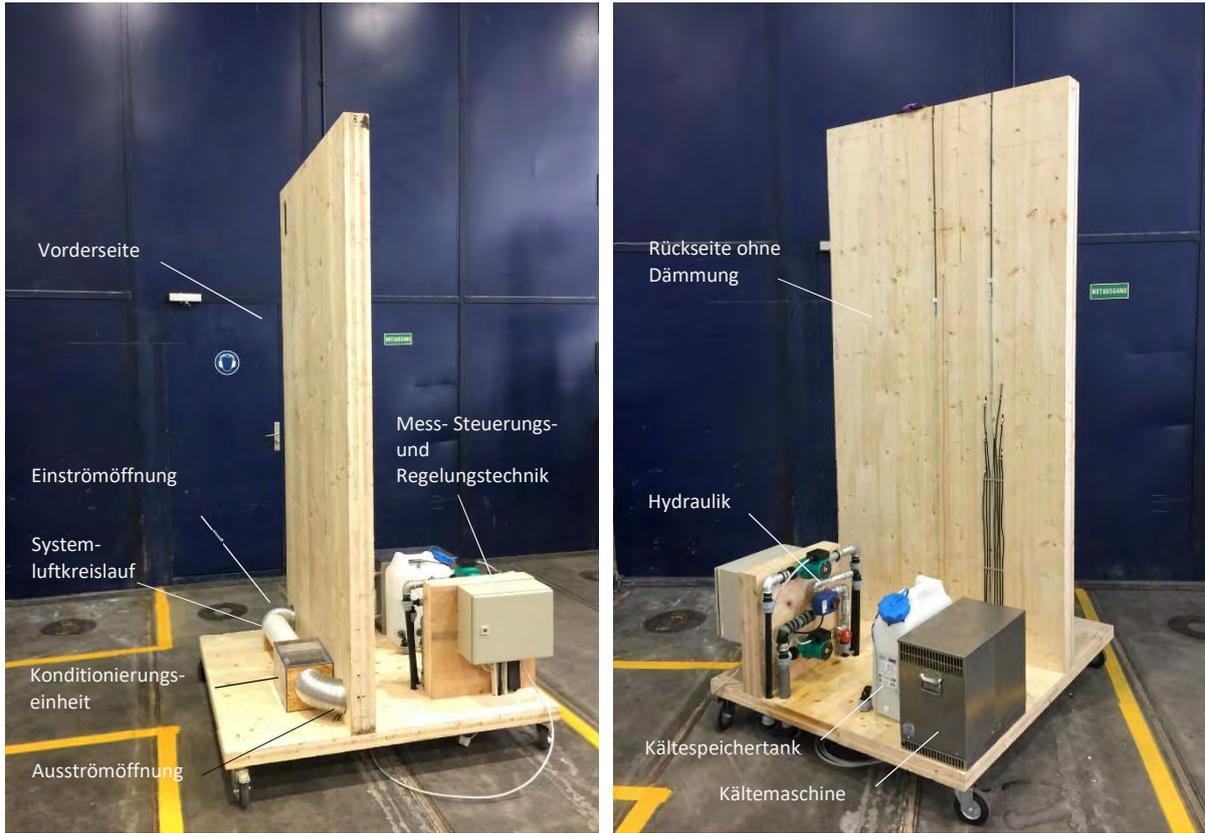


Abbildung 152: Versuchskonfiguration mit Prototyp A – Links: Vorderansicht, rechts: Rückansicht

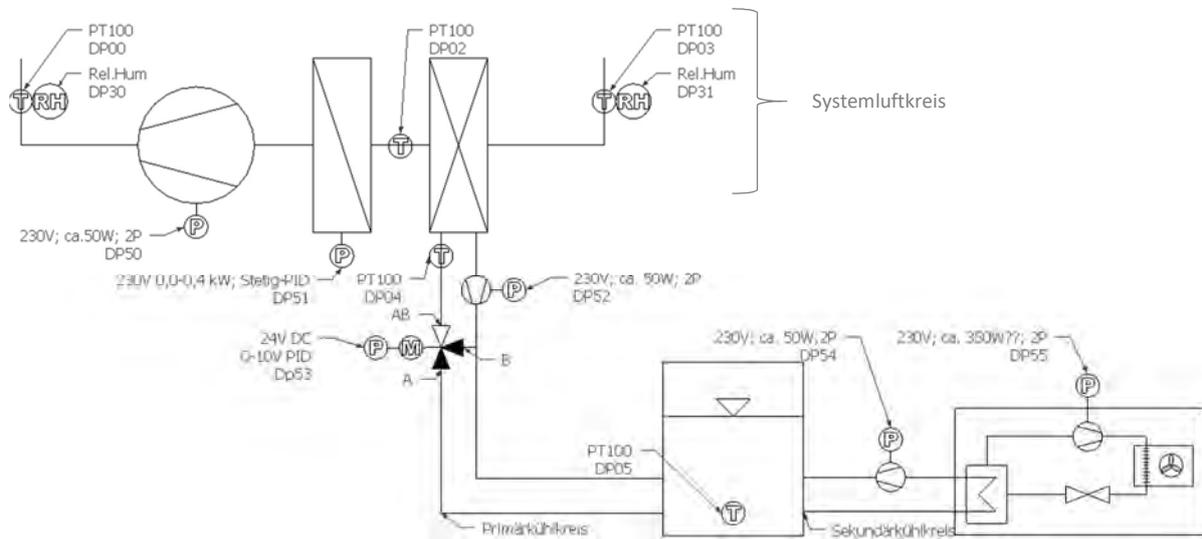


Abbildung 153: Hydraulik- und Regelungsschema der Systemluftkonditionierung

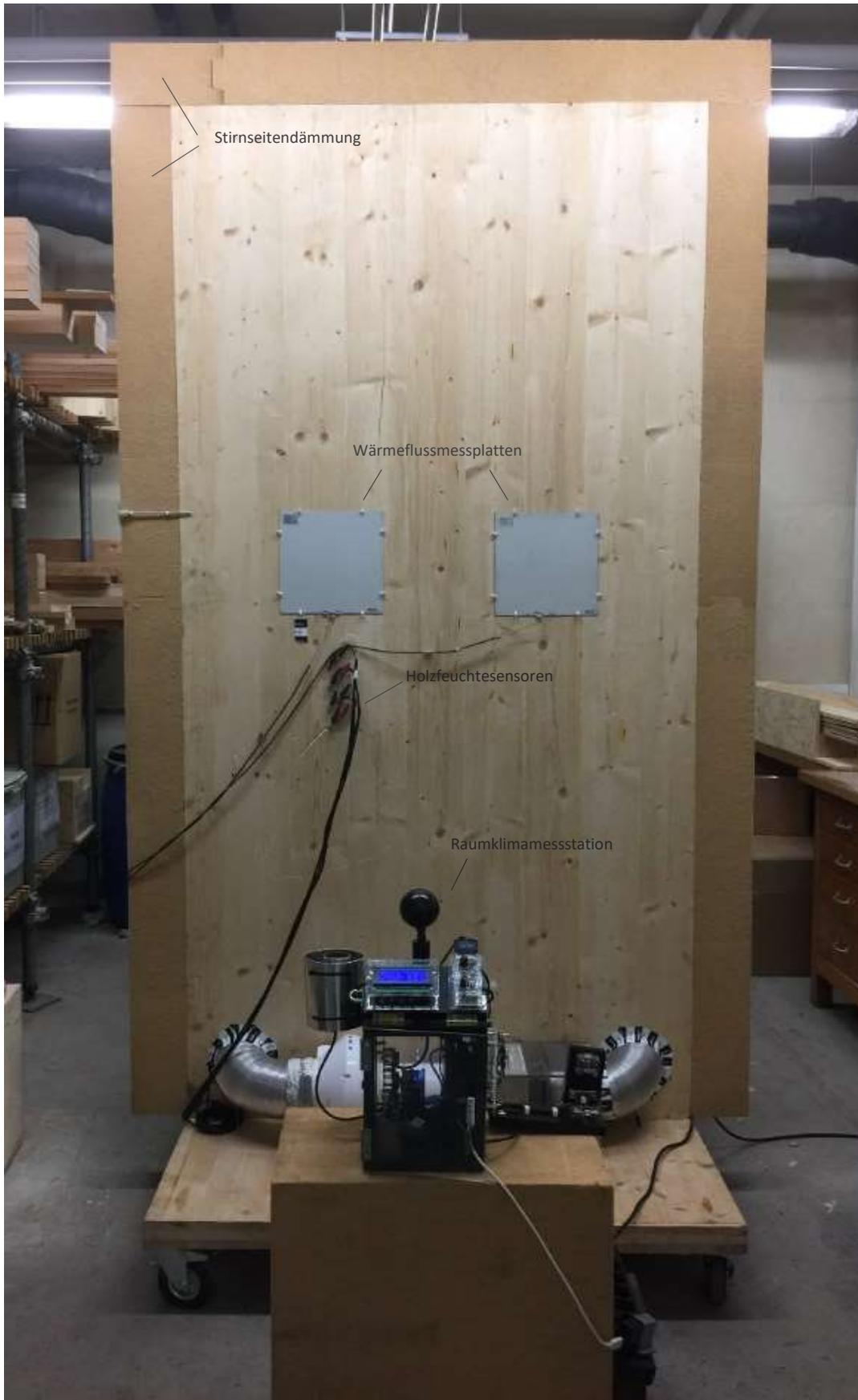


Abbildung 154: Versuchsaufbau mit Prototyp B und Klimamessstation

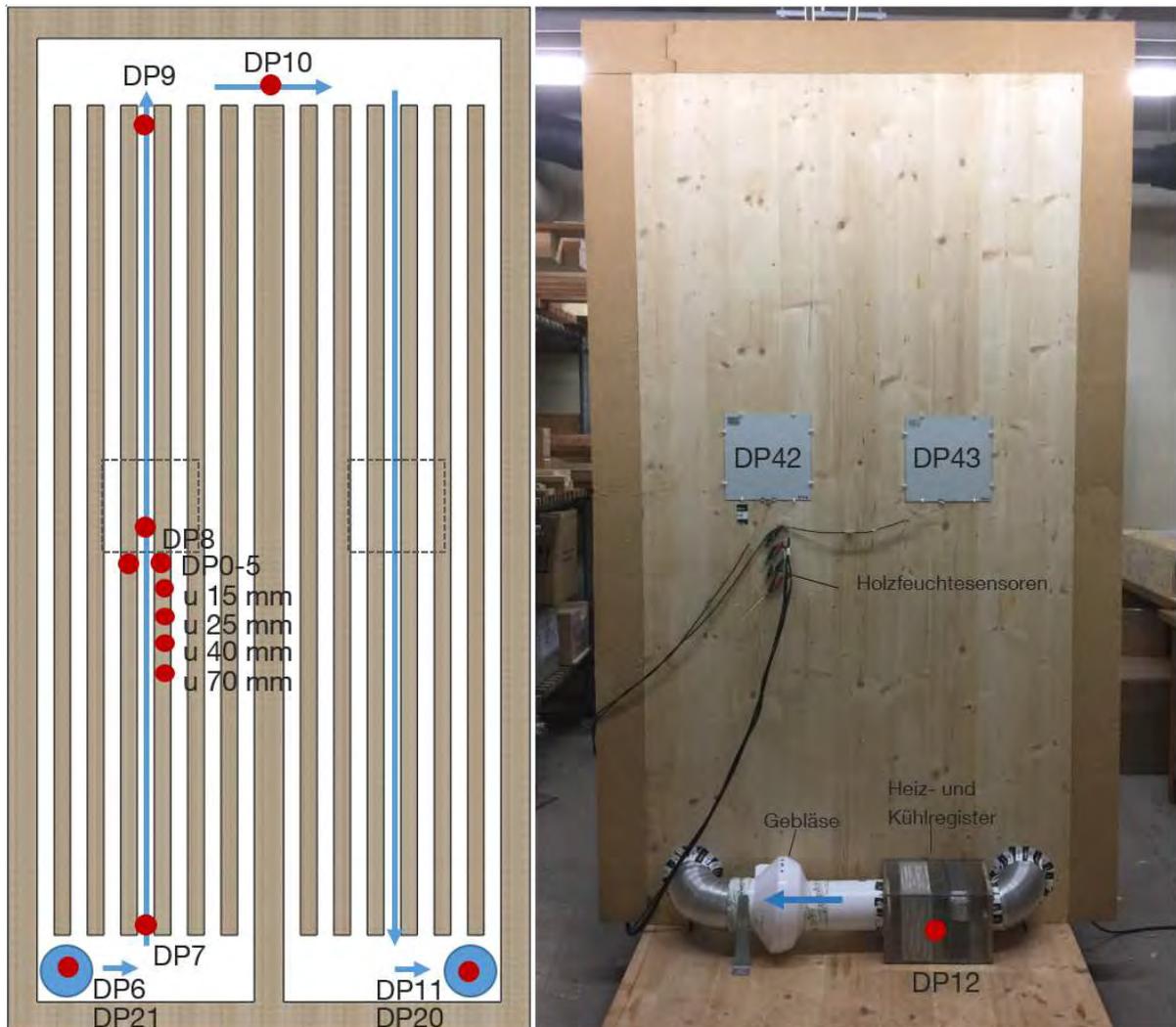


Abbildung 155: Datenpunkte im Systemluftkreislauf und an der Elementoberfläche

- Messung der Lufttemperatur: DP 6 – DP 12
- Messung der relativen Luftfeuchte: DP 20, DP 21
- Messung der Wärmeflussdichte: DP 42, DP43

Der Energiegehalt der Systemluft kann über die insgesamt sieben Lufttemperatursensoren im Systemluftkreislauf (DP6 – DP12) gemessen werden. Zur Bestimmung der relativen Luftfeuchte befinden sich Hygrometer an der Ein- und an der Ausströmöffnung. (DP20, DP21)

Mit der Luftkonditionierungseinheit kann die Lufttemperatur in der Einströmöffnung an DP6 geregelt werden. Sämtliche Regelungsaufgaben sowie ein Großteil der Messaufgaben wurden auf der Grundlage des Open Source Baukastensystems der Firma Tinkerforge umgesetzt. [37] Der Upload eines Stundenplans ermöglicht den Durchlauf von Sprungfunktionen der Lufttemperatur. Zur Erwärmung dient ein elektrisches Heizregister, zur Kühlung ein Wasser-Luft-Wärmetauscher. Durch eine PID-Regelung können Regelschwankungen der Temperatur auf ein Minimum reduziert werden. Die PID-Parameter sind mit Hilfe des heuristischen Verfahrens nach Chien, Hrones und Reswick bestimmt und während einer zweiwöchigen Lernphase weiter optimiert worden. Ein Schema der Regelung und der Hydraulik kann Abbildung 153 entnommen werden.

Die thermische Aktivierung führt zu einer Erwärmung bzw. einer Abkühlung des Massivholzelements. Abhängig von der Temperatur der Bauteiloberfläche gegenüber der Raumlufttemperatur sowie deren relativen Feuchte, nimmt die Holzoberfläche Wassermoleküle aus der Raumluft auf oder gibt diese ab.

Zur Bestimmung der hygrothermischen Zustände im Material befinden sich im Holz Thermosensoren sowie vier Elektrodenpaare. [38]

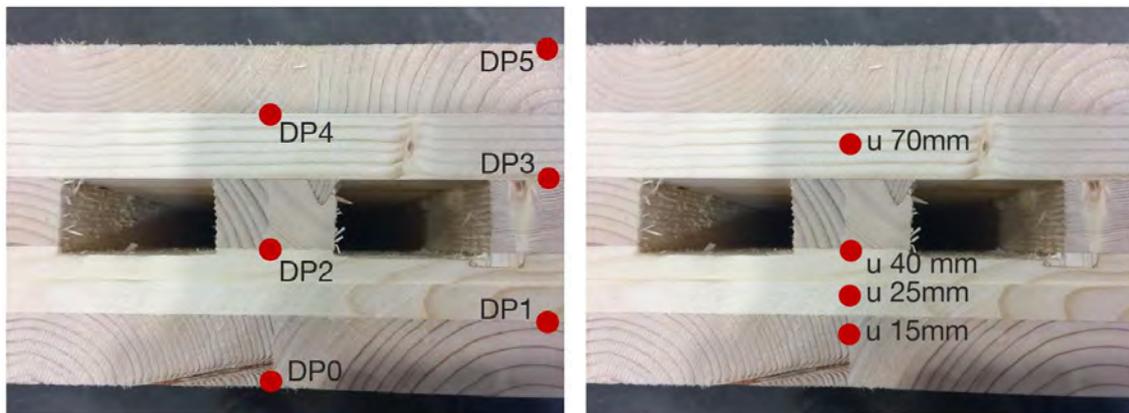


Abbildung 156: Datenpunkte in den Massivholzelementen, hier in Prototyp A

- Messung der Materialtemperatur: DP 0 – DP 5
- Messung der Holzfeuchte u in: 15 mm, 25 mm, 40 mm und 70 mm

Beginnend mit dem raumseitigen Temperatursensor DP0 bis zum rückseitigen Temperatursensor DP5 kann der Temperaturverlauf an jeder Schichtgrenze der fünf Lagen des Brettsperrholzelements bestimmt werden. Die Holzfeuchte wird in vier Tiefen durch elektrische Widerstandsmessung bestimmt. Bei der Verlegung der Sensoranschlusskabel wurde auf einen spitzen Winkel zwischen dem Kabel und den erwarteten Isothermen im Umfeld der Messung von max. 15 Grad geachtet. So soll der Temperaturmessfehler durch den Wärmenachfluss des Kabels gering zu halten werden. Die Position der Materialtemperatursensoren sowie der Materialfeuchtesensoren befinden sich, wie in Abbildung 155 ersichtlich, auf der linken Elementseite auf halber Höhe des aufwärts gerichteten Luftstromes. Um die thermischen Eigenschaften des Holzelements durch den Einbau der Sensoren weniger stark zu verfälschen, wurden die Sensoren DP0-DP5 auf zwei benachbarte Stege aufgeteilt. In beiden Prototypen sind die in das Holz eingebauten Sensoren identisch platziert. Die Lufttemperatursensoren befinden sich ebenfalls in gleicher Position jedoch durch die Lage der Kanäle in Prototyp B um eine Schicht nach vorne versetzt. In Abbildung 157 ist die Bestimmung des Systemluft-Volumenstroms dokumentiert.

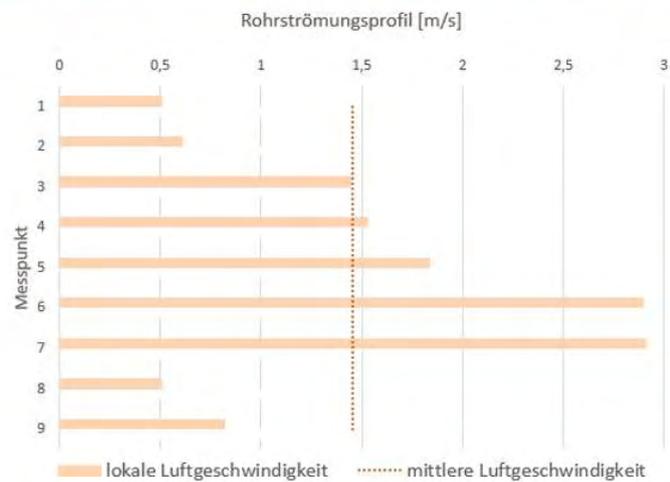
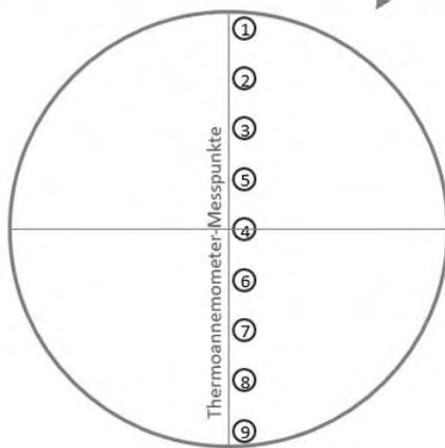
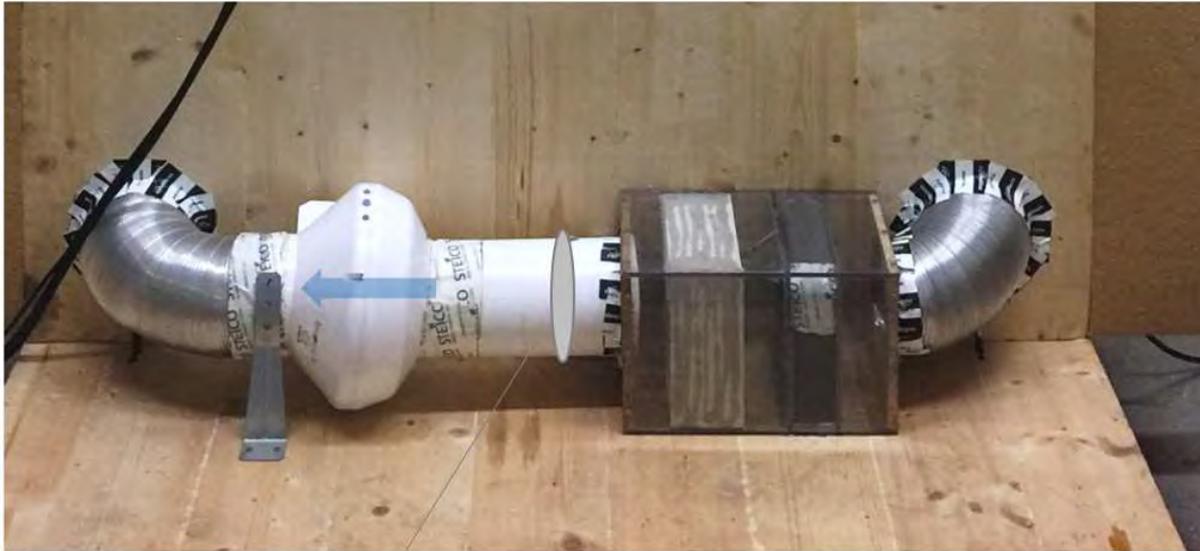


Abbildung 157: Bestimmung des Volumenstromes im Systemluftkreislauf bei Prototyp B

Um diesen zu bestimmen, kann aufgrund des unsymmetrischen Strömungsprofils der vereinfachte Ansatz mittels einfacher Messung und Strömungsprofilfaktor nicht angewendet werden. Es wurden daher lokale Messungen verteilt über dem Querschnitt des Lüftungsrohres unternommen und zu einer mittleren Luftströmungsgeschwindigkeit verrechnet. Für die Versuche an Prototyp B ergibt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 1,45 m/s. Hiermit kann durch Multiplikation mit dem lichten Rohrquerschnitt des DN125 Rohres der Volumenstrom zu 64,2 m³/h berechnet werden. Die Messungenauigkeit des verwendeten Thermoanemometers wird vom Hersteller mit 3 % angegeben. [39]

9.4.3 Versuchsergebnisse

In den folgenden Abbildungen werden die Messdaten zur thermischen Leistung der aktivierten Massivholzelemente anhand des Prototyp B dargestellt.

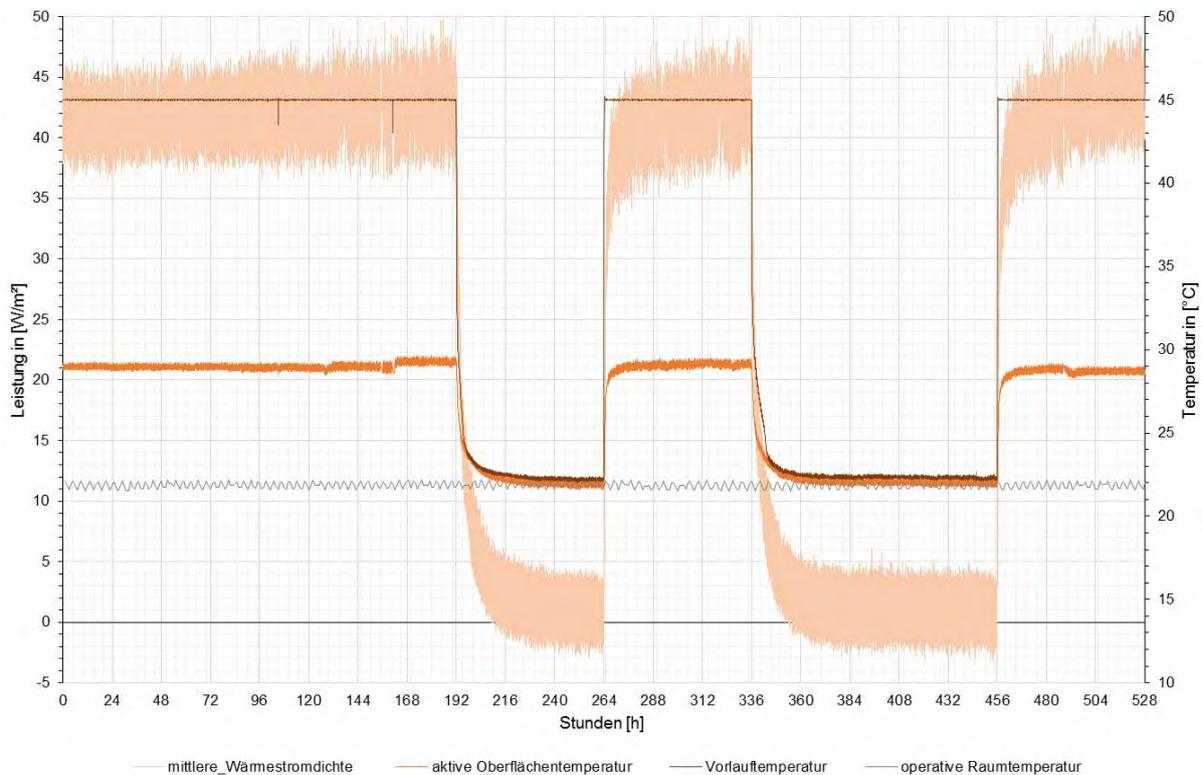


Abbildung 158: Messdaten zum Heizbetrieb an Prototyp B; $T_{VL}=45,0\text{ °C}$; $T_{OP,Raum}=21,6\text{ °C}$,

Abbildung 158 zeigt die gemessenen Leistungs- und Temperaturdaten des Prototyp B während eines Heizbetriebs über 528 Stunden. Während des Versuchs wurde der Heizbetrieb nach Erreichen des stationären Zustandes zweimal aus- und wieder eingeschaltet, um die Reaktionsgeschwindigkeit zu messen. Die operative Innenraumtemperatur des Laborraumes ist grau dargestellt und schwankt um einen Mittelwert von $21,6\text{ °C}$. Die Standardabweichung durch die vom Laborklimagerät aufgeprägten Schwankungen beträgt $0,39\text{ K}$.

Die Vorlauftemperatur der Systemluft wird durch eine PID-Regelung eingestellt und beträgt an der Einströmöffnung des Massivholzelements im Heizbetrieb $45,0\text{ °C}$. Die Standardabweichung der Regelgröße konnte durch eine Lernphase der Regelung auf $0,02\text{ K}$ im Heizbetrieb optimiert werden. Die erreichte Oberflächentemperatur wird an der raumseitigen Oberfläche gemessen und beträgt nach Erreichen des stationären Zustandes im Heizbetrieb $28,69\text{ °C}$. Das entspricht einer Erhöhung von $6,98\text{ K}$ gegenüber der operativen Raumtemperatur. Die Messungenauigkeit aller Thermosensoren beträgt $0,3\text{ K}+0,005\cdot t$. Diese vom Hersteller angegebene Messungenauigkeit wurde in einer Eisbadkalibrierung überprüft. Dort zeigten die Sensoren deutlich geringere Abweichungen zueinander und gegenüber einem auf $0,1\text{ K}$ geeichten Sensor. Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wird trotzdem der Herstellerwert angegeben. Die mittlere Wärmestromdichte auf der Massivholzoberfläche beträgt im Heizbetrieb $42,2\text{ W/m}^2$ und entspricht dem arithmetischen Mittelwert der beiden Wärmestrommessplatten DP42 und DP43. Für die Wärmeflussmessplatten der Firma Ahlborn wird die Ungenauigkeit mit 5% des Messwertes angegeben [40]. Die starken Schwankungen der an der Elementoberfläche gemessenen Leistung und Temperatur werden von der Raumtemperatur- und Feuchteregeung des Laborraumes auf das Element aufgeprägt. Die gemessene Holztemperatur an allen Schichtgrenzen lässt sich in Abbildung 159 nachvollziehen. Der dargestellte achtstündige Ausschnitt entspricht den Stunden 264-272 in Abbildung 158.

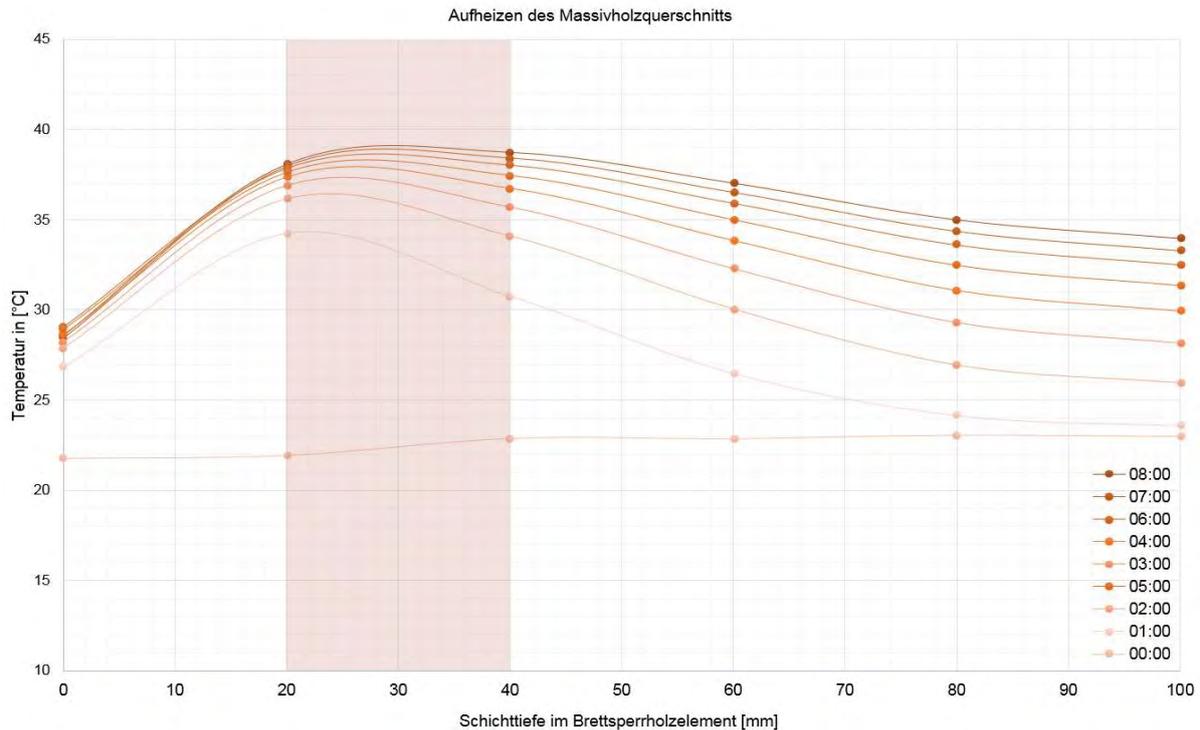


Abbildung 159: Zeitliche Entwicklung der Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang im Querschnitt des Massivholzelements

Der hellrot markierte Bereich entspricht der thermisch aktivierten Schicht. Diese liegt bei Prototyp B in der zweiten Brettlage. Die Entwicklung der raumseitigen Oberflächentemperatur determiniert die Reaktionsgeschwindigkeit des Systems. Bezogen auf die maximale Temperaturerhöhung im stationären Zustand werden ab dem Einschaltzeitpunkt nach 30 min 39,3 %; nach 60 min 70,2 % und nach 90 min bereits 81,5 % der Oberflächentemperaturerhöhung erreicht. Bei Prototyp A betrug die Dauer bis zum Erreichen einer 70 prozentigen Temperaturerhöhung ca. zwei Stunden.

Als erste Faustformel lässt sich hieraus ableiten, dass bei dem verwendeten Fichtenholz mit ca. einer Stunde Verzögerung je Zentimeter Holzüberdeckung gerechnet werden kann, bis 90 % der maximalen Leistung erreicht werden.

9.4.4 Visuelle Prüfung und Bewertung der Materialfeuchteentwicklung

Bei der visuellen Prüfung wird die Oberfläche des Massivholzelements nach mehrwöchigem Heizbetrieb auf Schwindrisse untersucht. Zusätzlich wird Prototyp A nach Ende des Versuchs geöffnet, um das Innere der Kanäle auf Beeinträchtigungen zu untersuchen und Materialproben zur Ermittlung der Holzfeuchte über das Darrtrocknungsverfahren zu entnehmen.

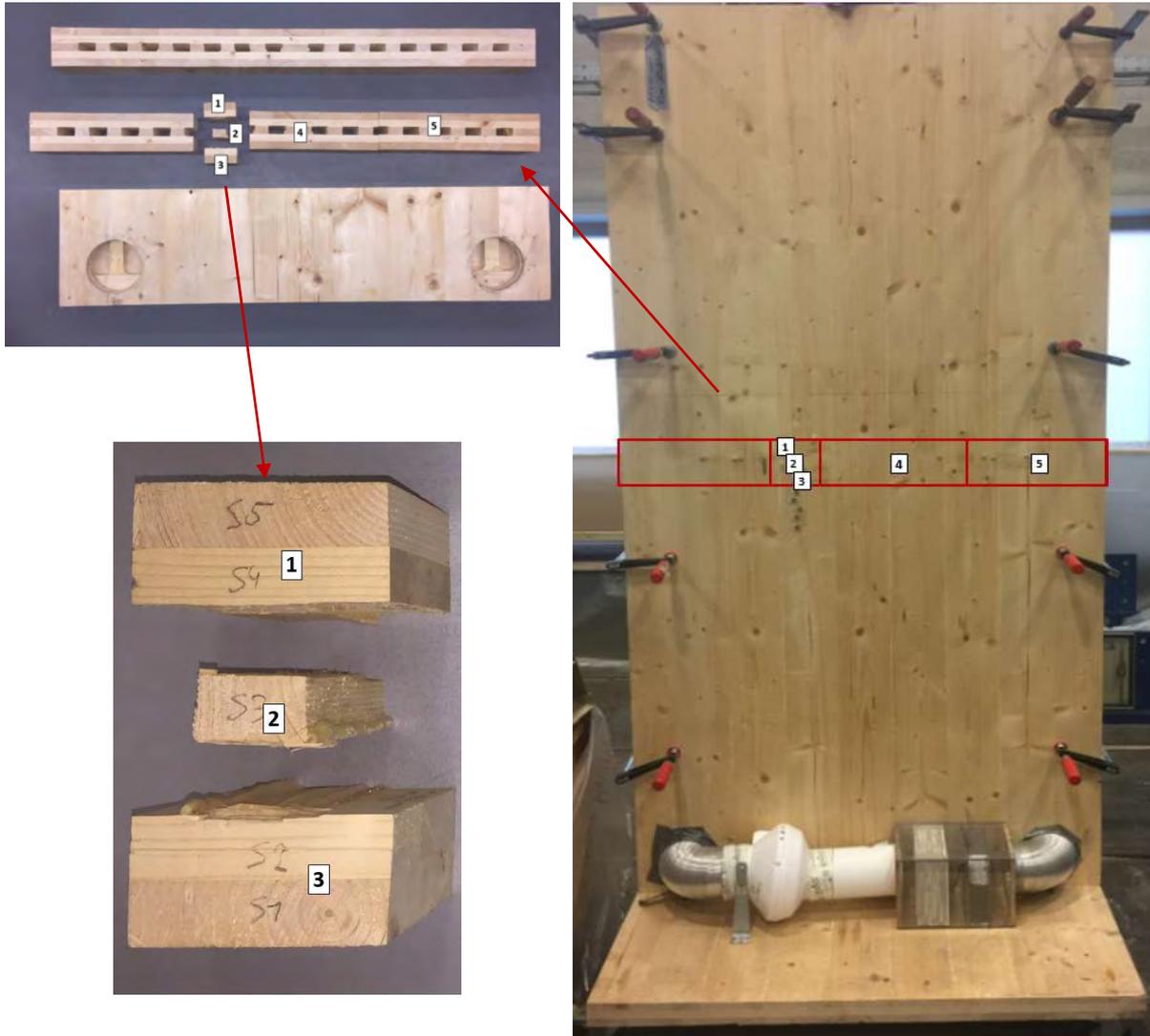


Abbildung 160: Probeentnahme nach dem Test des Prototyp A zur Bestimmung der Holzfeuchte und Begutachtung der Kanalinnenseiten

Die visuelle Untersuchung am Prototyp A ergab, dass nach mehrwöchigem Heizbetrieb keine Schwindrisse an der Elementoberfläche aufgetreten sind. Hieraus lässt sich allerdings nur bedingt eine allgemeingültige Bewertung der Problematik des Quell- und Schwindverhaltens ableiten.

Tabelle 32: Materialfeuchtemessung nach Ende des Heizbetriebes an Prototyp A

Darrtrocknung Prototyp A		03.11.; 13:00	10.11.2017; 14:00	10.11.2017; 18:00	03.11.; 13:00
		Masse Feucht	Masse darrtrocken		Wassergehalt
		mu	mt_1	mt_2	u
Probe	aus Position	[g]	[g]	[g]	[%]
1	Mittlere Höhe, Steg 6, Schichten 4-5	133,12	125,89	125,89	5,74%
2	Mittlere Höhe, Steg 6, Schicht 3	27,6	26,2	26,2	5,34%
3	Mittlere Höhe, Steg 6, Schichten 1-2	150,63	139,6	139,6	7,90%
4	Mittlere Höhe, Steg 7-10, Schichten 1-5	1304,41	1218,09	1218,09	7,09%
5	Mittlere Höhe, Steg 11-15, Schichten 1-5	1578,35	1463,3	1463,3	7,86%

Aus Tabelle 32 können die tatsächlichen Holzfeuchtwerte nach Beendigung des Heizbetriebs von Prototyp A abgelesen werden.

Die Holzfeuchtwerte im Prototyp A erreichten nach mehrwöchigem Heizbetrieb Werte bis minimal 5,3 % Holzfeuchte. Dies entspricht in Etwa der statisch vorausgerechneten Holzgleichfeuchte entsprechend des Umgebungsklimas und der betriebenen Oberflächentemperatur im Heizbetrieb. Es kann nach Ansicht des Autors erwartet werden, dass Schwindrisse an der Elementoberfläche auftreten, wenn das thermisch aktivierte Massivholzelement bei extrem trockenem Umgebungsklima mit relativen Luftfeuchten deutlich unter 30 % betrieben wird. Eine belastbare Aussage hierzu kann nur getroffen werden, wenn das System über mindestens eine Heizperiode in einem entsprechenden realen Einsatz getestet wird. Beispielsweise könnte der in diesem Forschungsvorhaben errichtete Massivholzkubus eine derartige Umgebung bieten. Dieses Einsatzszenario soll in einem weiterführenden Forschungsvorhaben untersucht werden.

Eine Darrtrocknung von Materialproben aus Prototyp B konnte zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht erfolgen, da dieser noch in Betrieb befindet und für weitere Experimente verwendet werden soll. Die laufenden Langzeitversuche an Prototyp B werden sich voraussichtlich bis in den Sommer 2018 erstrecken. Es wird während der Versuche ein Holzfeuchtemonitoring mittels elektrischer Widerstandsmessung in vier unterschiedlichen Tiefen durchgeführt. Die Anordnung der Widerstandsmesselektroden kann Abbildung 156 entnommen werden. Die Ausbreitung der Holzfeuchte ist ein um Größenordnungen langsamerer Prozess als die Wärmeleitung im Material. Daher muss diese losgelöst von den thermischen Versuchen ausgewertet werden.

Abbildung 161 zeigt die gemessene Holzfeuchteverteilung nach dem elektrischen Widerstandsverfahren. Dieses Verfahren beruht auf der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Materialfeuchte und der Materialtemperatur. Letztere ist bei der Auswertung der Holzfeuchte herausgerechnet worden. Bei dem Messsystem handelt es sich um ein Materialfeuchte-Gigamodul der Firma Scantronik Mugrauer GmbH. [38]

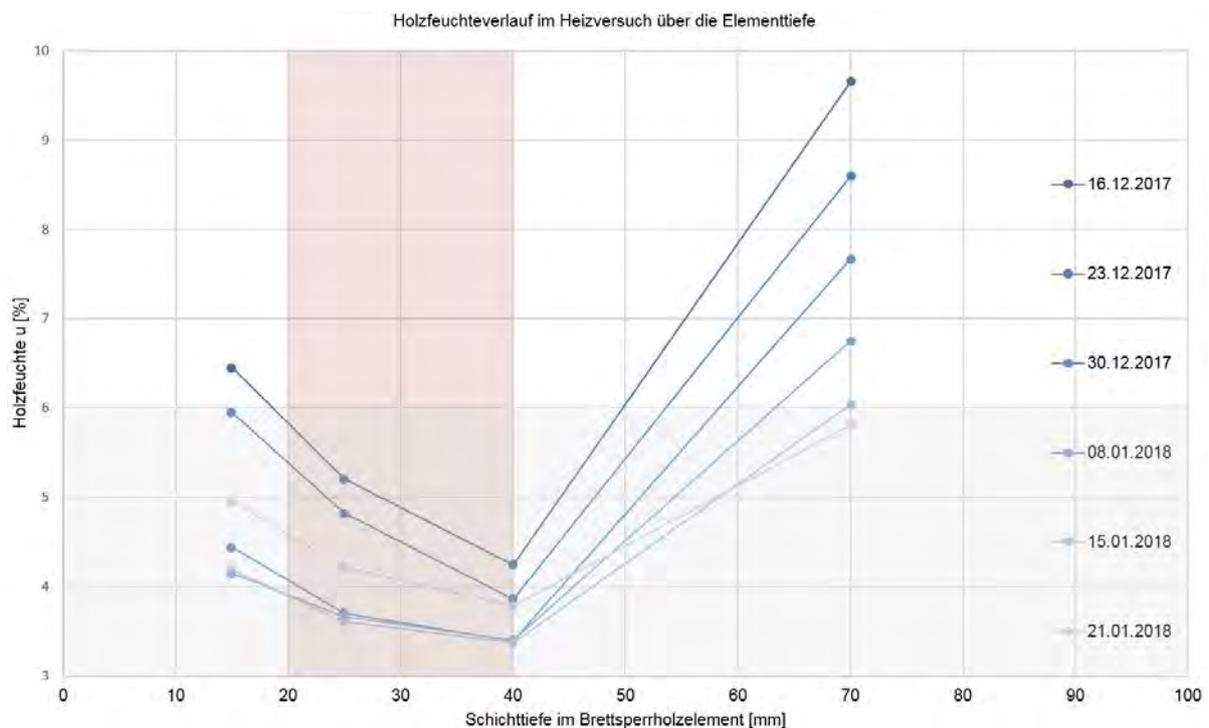
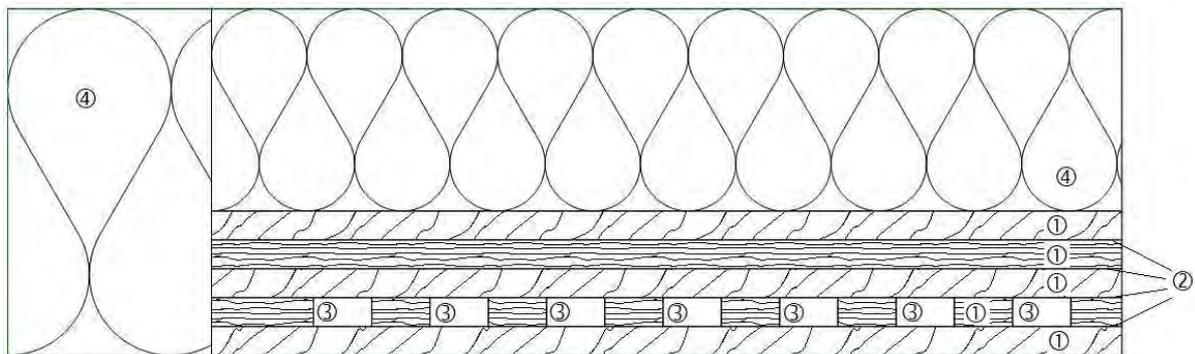


Abbildung 161: Holzfeuchtemessung über dem Querschnitt vom Prototyp B

Da dieses Verfahren für Holzfeuchten über 6 % bestimmt ist, kann der Wertebereich unter 6 % Holzfeuchte in Abbildung 161 nur orientierend interpretiert werden. Es ist ausdrücklich keine quantitative Bewertung dieses Bereiches erlaubt, da die Ungenauigkeit der Messung nicht angegeben werden kann. Der betrachtete Zeitraum der Holzfeuchtemessung liegt zwischen dem 16.12.2017 und dem 21.01.2018. Nachdem das Laborklimagerät während dieses Zeitraumes ausgeschaltet war, herrschte eine niedrigere Temperatur und ein niedrigere Raumluftfeuchte als während des in

Abschnitt 9.4.3 beschriebenen Heizversuchs. Die Raumlufttemperatur beträgt in dem betrachteten Zeitraum im Mittel 21 °C und die relative Luftfeuchte schwankt stark um einen Wert von 47 %. Die Vorlauftemperatur der Systemluft an der Einströmöffnung war konstant auf 45,0 °C geregelt. Den Messdaten kann entnommen werden, dass die Holzfeuchte nach einem vierwöchigen Heizbetrieb auf unter sechs Prozent abgesunken ist.

Eine an den genannten Zeitraum des Heizversuchs unmittelbar anschließende visuelle Untersuchung der Oberfläche des Massivholzelements hat ergeben, dass keine Risse in der Oberfläche aufgetreten sind. Es wird wie bei der Bewertung des Prototyp A darauf hingewiesen, dass die Untersuchung nicht bei extrem trockenem Umgebungsklima stattgefunden hat. Eine Bewertung des Quell- und Schwindverhaltens für den extrem trockenen Winterfall kann erst ein Langzeittest in einer extrem trockenen Umgebung bringen. Nach den bisher durchgeführten Untersuchungen wird vermutet, dass das Quell- und Schwindverhalten im Holzfeuchtebereich oberhalb von 5 % und unterhalb von 20 % als unkritisch bewertet werden kann. Im Rahmen einer instationären Feuchteberechnung mit dem Simulationsprogramm WUFI 2D wurde die Abhängigkeit zwischen der spezifischen Heiz- und Kühlleistung und der sich ergebenden Holzfeuchte ermittelt. [41] In der Simulation wird ein Umgebungsklima von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte angenommen.



1 – Fichtenholz; longitudinal/radial	2 – Einkomponenten- Polyurethan-Klebstoff	3 – Luftkanal	4 – Holzfaserdämmung
---	--	---------------	----------------------

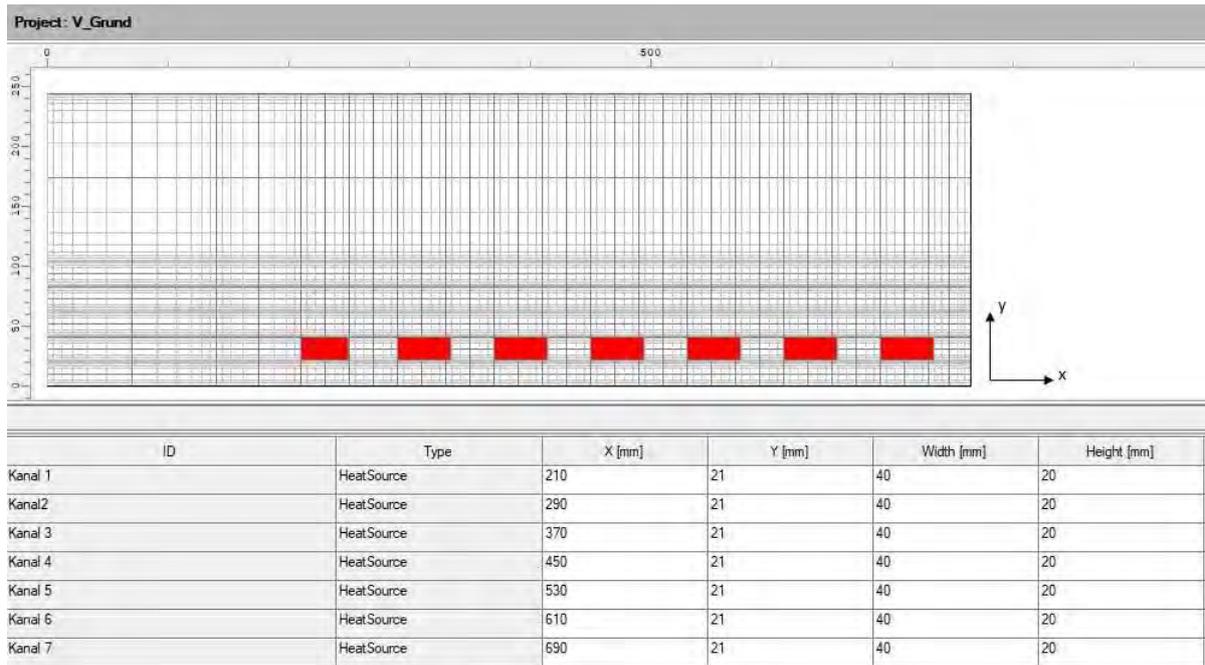


Abbildung 162: 2D-Modell der hygrothermischen Simulation in WUFI-2D [41]

Zur Reduktion der Komplexität des Simulationsmodells wurde die nur linke Elementhälfte eingegeben. Da die konditionierte Systemluft links unten in das Element strömt, stellt aufgrund der dort höheren spezifischen Systemleistung die linke Elementhälfte die kritische Seite des Elements dar. Bei der Ermittlung der kritischen Leistung wird daher nur dieser Bereich betrachtet. Um den Einfluss der thermischen Leistung auf die sich ergebende Holzfeuchte bestimmen zu können, werden konstante Klimarandbedingungen vorausgesetzt. Die thermische Leistung wird in fünf Watt je Quadratmeter-Schritten variiert.

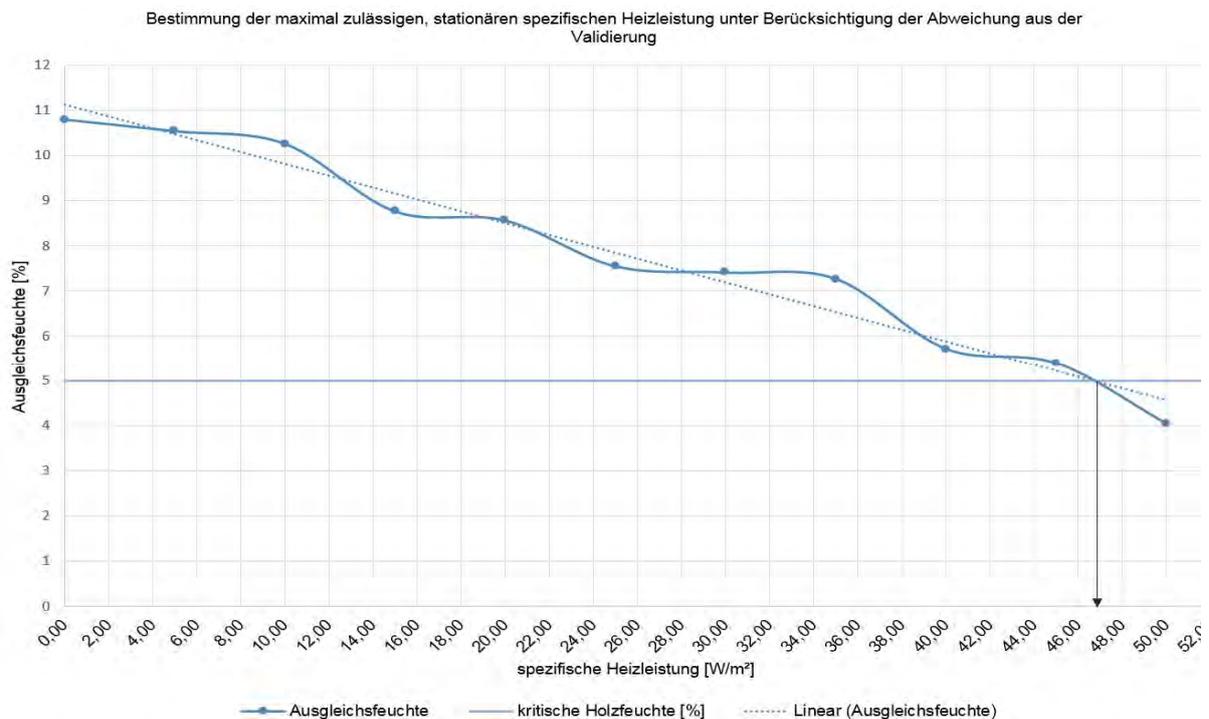


Abbildung 163: Abhängigkeit zwischen spezifischer Heizleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungs-klima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte [42]

Den Simulationsergebnissen entsprechend, kann bei einer Lufttemperatur von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte im Heizbetrieb eine dauerhafte thermische Leistung von 47 W/m² betrieben werden. Die Simulation einer kurzzeitig überhöhten Heiz- und Kühlleistung erbrachte in der WUFI-Simulation keine plausiblen Ergebnisse. Aus Sicherheitsgründen wird bis auf weiteres die dauerhaft mögliche Systemleistung als zulässige Spitzenleistung genannt. Es wird vermutet, dass eine leichte Überhöhung der Kühlleistung und eine größere Überhöhung der Heizleistung zu Spitzenlastzeiten unter Annahme einer anschließenden Regenerationsphase nicht zu Schädigungen des Elements führen werden. Sämtliche Berechnungen und Überlegungen zur Entwicklung der Holzfeuchte bewegen sich im hygroskopischen Bereich deutlich unterhalb des Fasersättigungspunktes. Es muss in jedem Fall darauf geachtet werden, dass die thermisch aktivierten Massivholzelemente, wie auch alle vergleichbaren Wandtemperierungssysteme, im Kühlbetrieb an deren raumseitigen Oberfläche nicht bis auf die Taupunkttemperatur der Raumluft abgekühlt werden. Dies würde bei sämtlichen bauteilintegrierten Wandtemperierungssystemen zu unmittelbaren Bauschäden führen und muss regelungstechnisch ausgeschlossen werden. Dies ist Stand der Technik.

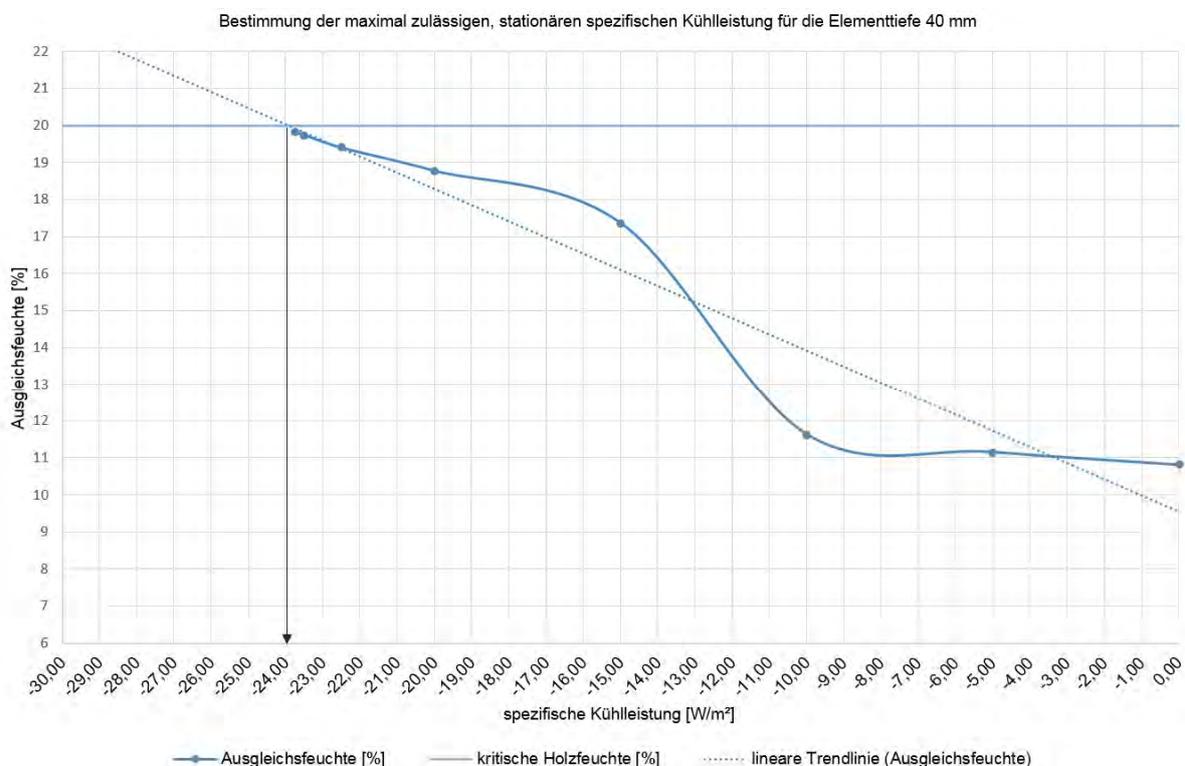


Abbildung 164: Abhängigkeit zwischen spezifischer Kühlleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungsklima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte [42]

Analog wird die maximal dauerhaft zulässige Kühlleistung bei einem Raumklima von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte an der Elementoberfläche bestimmt. Die als kritisch angesehene Holzfeuchte beträgt 20 %. Hieraus ergibt sich eine als maximal zulässig angesehene Kühlleistung von -24 W/m². Um diese Ergebnisse für die konkrete Anwendung des Systems nutzen zu können, soll als nächstes das thermische Modell beschrieben werden.

9.5 Thermische Simulation

9.5.1 Implementierung einer luftgeführten thermischen Aktivierung von Brettsperreholzelementen in das thermische Simulationsprogramm TRNSYS

Der Aufbau eines validierten numerischen Modells ist ein essentieller Schritt auf dem Weg zur Anwendungsreife der thermisch aktivierten Massivholzelemente. Primär bietet das Modell die Möglichkeit simulationsgestützte Parameterstudien zur weiteren Optimierung des Systems durchzuführen. Final kann das thermodynamische Modell dazu dienen, das Heiz- und Kühlsystem für komplexe Einsatzszenarien auszulegen.

Die modular aufgebaute Simulationssoftware TRNSYS (Transient System Simulation Tool) [43] bietet unterschiedliche Möglichkeiten zur Implementierung eines Flächenheiz- und Kühlsystems. Einige Module sind bereits im sogenannten Building-Type T56, dem Kernmodul der thermischen Gebäudesimulation hinterlegt. Der Building-Type erfasst die raumumschließenden Bauteile in einem Finiten-Schichten-Modell, in dem die thermischen Eigenschaften aller Materialschichten enthalten sind. Dieses Modell kann die Temperaturen und Wärmeflüsse orthogonal zu den Bauteiloberflächen zeitabhängig berechnen. Mehrere raumumschließende Bauteile werden auf übergeordneter Ebene zu einem Netzwerk zusammengeschaltet – das Raummodell bzw. die thermische Zone. Mehrere Räume ergeben durch Verknüpfung der angrenzenden Bauteile sowie durch die Verkettung der durchströmenden Luftvolumenströme ein Gebäude.

Der Type 56 bietet im einfachsten Fall die Möglichkeit, das Modell einer Wandheizung durch Berücksichtigung der thermischen Leistung in einer Wandschicht als sogenannter „Wall gain“ abzubilden. Dabei wird die flächenspezifisch abgegebene thermische Leistung als Wärmegewinn in der Energiebilanz des raumseitigen Schichtenelements angerechnet. Durch die Erhöhung des Energieniveaus in der Wandschicht steigt dessen Temperatur und mit der Temperatur die Wärmeabgabe an die Umgebung bzw. an die rückseitig angrenzenden Materialschichten. Entlang der Ebene werden sämtliche Eigenschaften und Zustände homogen als Mittelwerte beschrieben. Die Wärmeströme werden somit ausschließlich normal zu den Schichten, also rein eindimensional abgebildet. Eine zweidimensionale Modellierung der Wärmeflüsse, wie sie bei Wärmebrücken oder bei den im Bauteil verlegten Heiz- und Kühlleitungen auftreten, ist in diesem Modell nicht direkt möglich. Diese vereinfachte Methode wird der Darstellung eines thermisch aktivierten Bauteils nicht gerecht. Weder die konkrete Position des Heizmediums im Bauteil noch dessen Temperaturniveau und dessen thermodynamischen Fluideigenschaften können abgebildet werden. Diese Methode wird für den Zweck dieses Projektes nicht weiter betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit bietet das ebenfalls in dem Buildingtype integrierte, aber deutlich komplexere, sog. „active Layer“-Modell. Dieses Modul wurde eigens für die Simulation von thermisch aktivierten Bauteilen sowie Flächenheiz- und Kühlsystemen entwickelt. Es enthält ein Modell, um die Energiemenge der Fluide je Rohrsegment zu berechnen. Hierdurch können der Temperaturverlauf über der Rohrlänge sowie die exakte zweidimensionale Position des Rohres im Bauteil berücksichtigt werden. Somit kann das thermisch aktivierte Bauteil dreidimensional modelliert werden. Mit diesem Modell ist es möglich bei unterschiedlichen Fluiden den Energiegehalt, den strömungsabhängigen Wärmeübergang auf das Rohr und auf das Bauteil sowie die hydraulische Verschaltung des Rohrsystems im Bauteil detailliert abzubilden. Die räumliche Dimension in Längsrichtung der Rohrachse wird durch die vorgeschaltete Berechnung der äquivalenten Fluidtemperatur reduziert. Mit der äquivalenten Fluidtemperatur kann der mittlere Wärmeübergang vom Fluid auf den Rohrmantel berechnet werden. Nach der darauffolgenden Berechnung des Wärmeübergangs vom Rohr in das Bauteil wird die Wärmeausbreitung im Bauteil, um das Rohr herum, zweidimensional modelliert. Da das Bauteilmodell in TRNSYS bei der Verknüpfung mehrerer Bauteile zu einem Raummodell, wie oben beschrieben, nur eindimensionale Wärmeströme bilanzieren kann, muss im Weiteren das zweidimensionale Wärmeflussfeld um den Rohrmantel auf ein eindimensionales Problem reduziert werden. Dies geschieht mit Hilfe von Geometriefaktoren, welche die räumliche Überdeckung des Rohres zu dem Abstand der Rohre zueinander ins Verhältnis setzen.

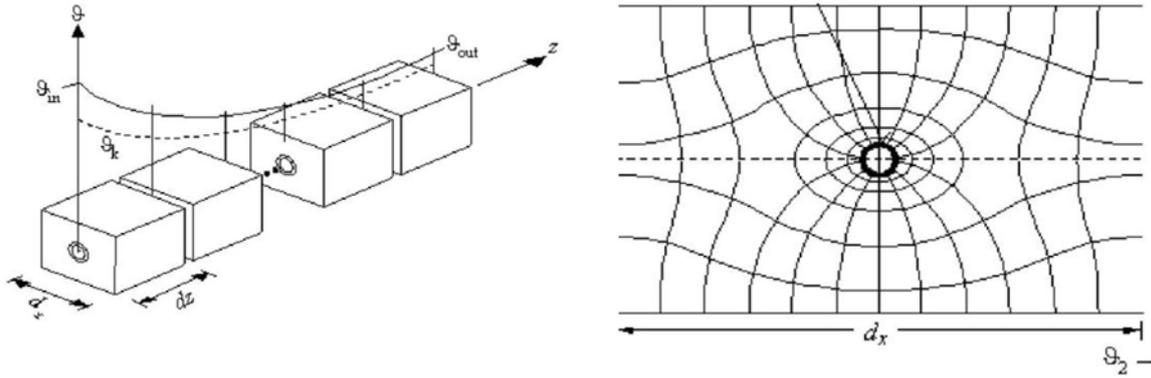


Abbildung 165: links: Modell des Temperaturverlaufs einer Rohrleitung innerhalb eines Bauteils; rechts: Temperaturfeld um ein Rohrelement innerhalb eines thermisch aktivierten Bauteils [43]

Durch die Geometriefaktoren kann der Wärmefluss, welcher seitlich aus den Rohren fließt, respektive parallel zur Bauteiloberfläche, mit dem Wärmefluss senkrecht zur Bauteiloberfläche verrechnet werden. An der Schichtoberfläche kann nun, wie im TYPE 56 üblich, mit einem eindimensionalen Wärmestrom weitergerechnet werden. Damit diese Reduzierung auf einen eindimensionalen Wärmefluss zulässig ist, müssen einige Bedingungen an die Geometrie des zweidimensionalen Wärmeflussfeldes erfüllt sein. Ist die Überdeckung der Rohrleitungen zu gering oder der Abstand der Rohrleitungen zueinander zu groß, funktioniert diese Verrechnung der Wärmeflüsse nicht im Rahmen der geforderten Genauigkeit. Ferner bestehen Anforderungen an den thermischen Widerstand der Bauteilrückseite. Da auch dann die Verrechnung der zweidimensionalen Wärmeströme nicht hinreichend genau funktioniert, wenn der Wärmestrom zur Bauteilrückseite zu groß wird. Weitere Limitierungen des sog. „active Layer“-Modells liegen in der Modellierbarkeit von Luft als Wärmeüberträgermedium. Luft besitzt eine deutlich geringere Dichte sowie volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit und unterscheidet sich deutlich in seinen fluiddynamischen Eigenschaften im Vergleich zu Wasser. Aufgrund dieser und weiterer Einschränkungen und der Nichterfüllbarkeit der oben genannten Bedingungen kann das „active Layer“-Modell nicht zur Modellierung der thermisch aktivierten Massivholzelemente verwendet werden.

Da die Simulationssoftware TRNSYS modular aufgebaut ist, kann zur Simulation unterschiedlichster physikalischer Probleme auf eine Vielzahl von weiteren bestehenden Lösungen in Form von Simulations-Types zurückgegriffen werden. Ein solcher Type, der für die Simulation von luftgeführten Bauteilaktivierungen entwickelt wurde, ist der TRNSYS-Type: „TYPE 360: FLOOR HEATING AND HYPOCAUST“ von Karel Fort. [44] Dieser Simulationstyp ist als Open-Source-Modul vollständig nachvollziehbar und kann im Rahmen der Lizenzrechte frei erweitert werden. Die im Weiteren beschriebene Modellierung basiert auf diesem Modul.

9.5.2 Aufbau des Simulationsmodells mit TYPE 360

In diesem Abschnitt soll das Modell beschrieben werden, mit dem thermisch aktivierte Massivholzelemente instationär berechnet werden können. Im Anschluss wird der Abgleich der Simulationsdaten mit den im Labor gemessenen Daten beschrieben, durch die das Modell validiert werden soll. Die Illustrationen zum Aufbau des Simulationsmodells basieren zum Teil auf Abbildungen der Master's Thesis [45], welche 2018 am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion abgeschlossen wurde.

Wesentliche Bestandteile des Gesamtmodells sind:

- das Mehrzonen-Gebäudemodell (TYPE 56),
- ein allgemeiner Umrechnungs- und Eingabe-Type für zeitabhängige Variablen (Equation),
- den TYPE 360 incl. dessen Eingabemaske für diverse spezifische Systemparameter,
- eine Geometriedatei, welche das zweidimensionale Knotenmodell des Massivholzelements enthält (.fbh-Datei) sowie
- ein Ausgabemodul, mit dem die Simulationsergebnisse dargestellt werden.

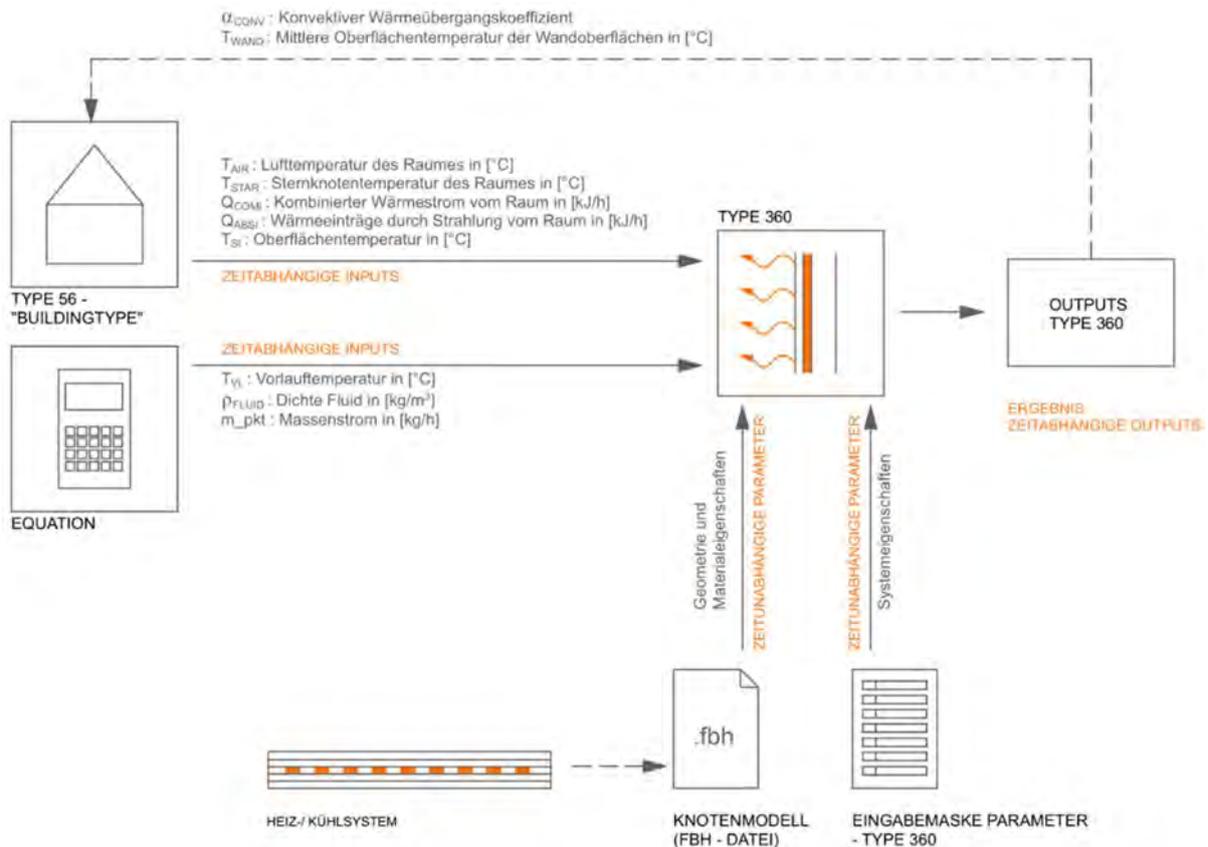


Abbildung 166: Einbindung des TYPE 360 in die TRNSYS-Simulationsumgebung

Je nach Anwendung kann eine Vielzahl weiterer Types in das Simulationsmodell integriert werden. Nachfolgend wird auf die Verknüpfung des thermisch aktivierten Massivholzelements mit dem Raummodell detailliert eingegangen.

Die eigentliche thermische Gebäudesimulation wird von dem „Buildingtype“ T56 ausgeführt. Dort werden alle Bauteilmodelle der raumumschließenden Oberflächen in Form eines Knotenmodells zu einem Raummodell verknüpft. Das Knotenmodell ist in unterschiedlich komplexen Varianten ausführbar. Im Weiteren wird das sogenannte Sternknotenmodell verwendet. Dabei werden alle Raumboflächen über einen imaginären Sternknoten mit dem Energiebilanzknoten der Raumluft verknüpft. Diese Bauteilverknüpfungen kombinieren den konvektiven und den radiativen Wärmeaustausch jeder Oberfläche mit dem Raum. Im radiativen Wärmeaustausch sind die langwellige Wärmestrahlung der Umgebung sowie die kurzwellige Solarstrahlung enthalten. Haupteinfluss ist die Emissivität der Oberfläche. Der konvektive Wärmeaustausch hängt wesentlich von der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und angrenzender Luft, der Neigung der Oberfläche sowie von der lokalen Luftgeschwindigkeit vor der Oberfläche ab. Die folgende Abbildung illustriert die Einbindung des Bauteilmodells des thermisch aktivierten Massivholzelements in das Sternknotenmodell des Raumes.

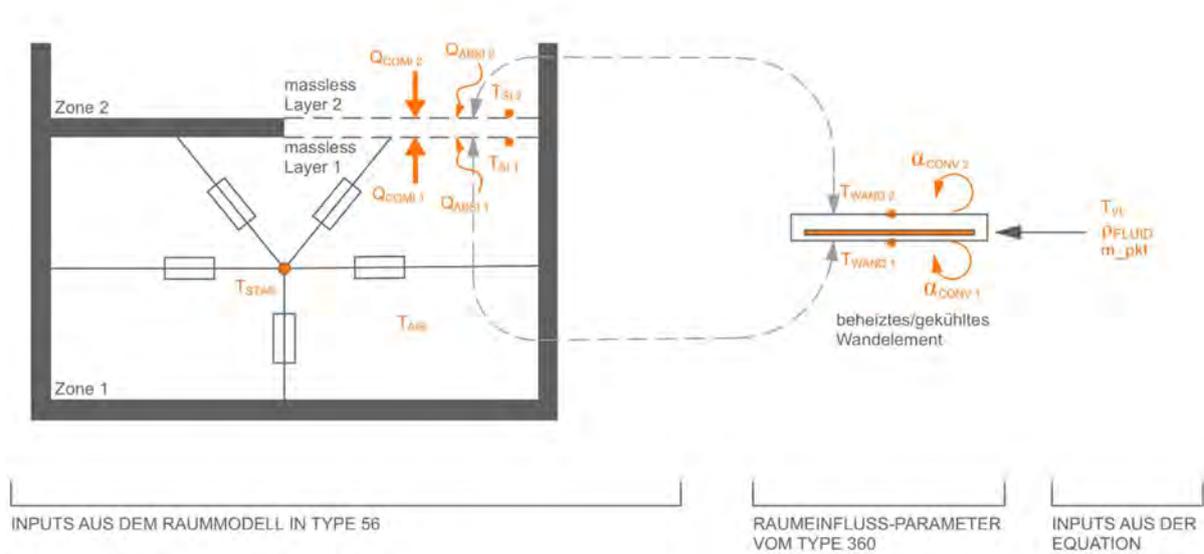


Abbildung 167: Grundriss der Zone und schematische Darstellung der Verknüpfung zwischen dem Raummodell und dem Bauteilmodell TYPE 360

Das thermisch aktivierte Bauteil wird wie jede andere Raumboberfläche mit dem Bilanzknoten des Raumes verknüpft. Dabei findet die Simulation der thermischen Prozesse des Bauteils nicht innerhalb des Building-Types, sondern ausgelagert in Type 360 statt. Wenn das Element, wie in Abbildung 167 gezeigt, als Trennwand zwischen zwei thermischen Zonen funktioniert, ist die Elementrückseite analog mit der zweiten Zone zu verbinden.

Die Schnittstelle zwischen dem Raummodell - Type 56 und dem Bauteilmodell - Type 360 besteht in der Verknüpfung der Oberflächentemperatur und der Wärmestromdichte an der Oberfläche. Da diese beiden Größen implizit voneinander abhängig sind, wird bei der Simulation in jedem Zeitschritt solange zwischen dem Bauteilmodell und dem Raummodell iteriert bis eine ausreichend konsistente Lösung des Gleichungssystems vorliegt.

Innerhalb des Bauteilmodells werden die thermodynamischen Vorgänge des thermisch aktivierten Massivholzelements berechnet.

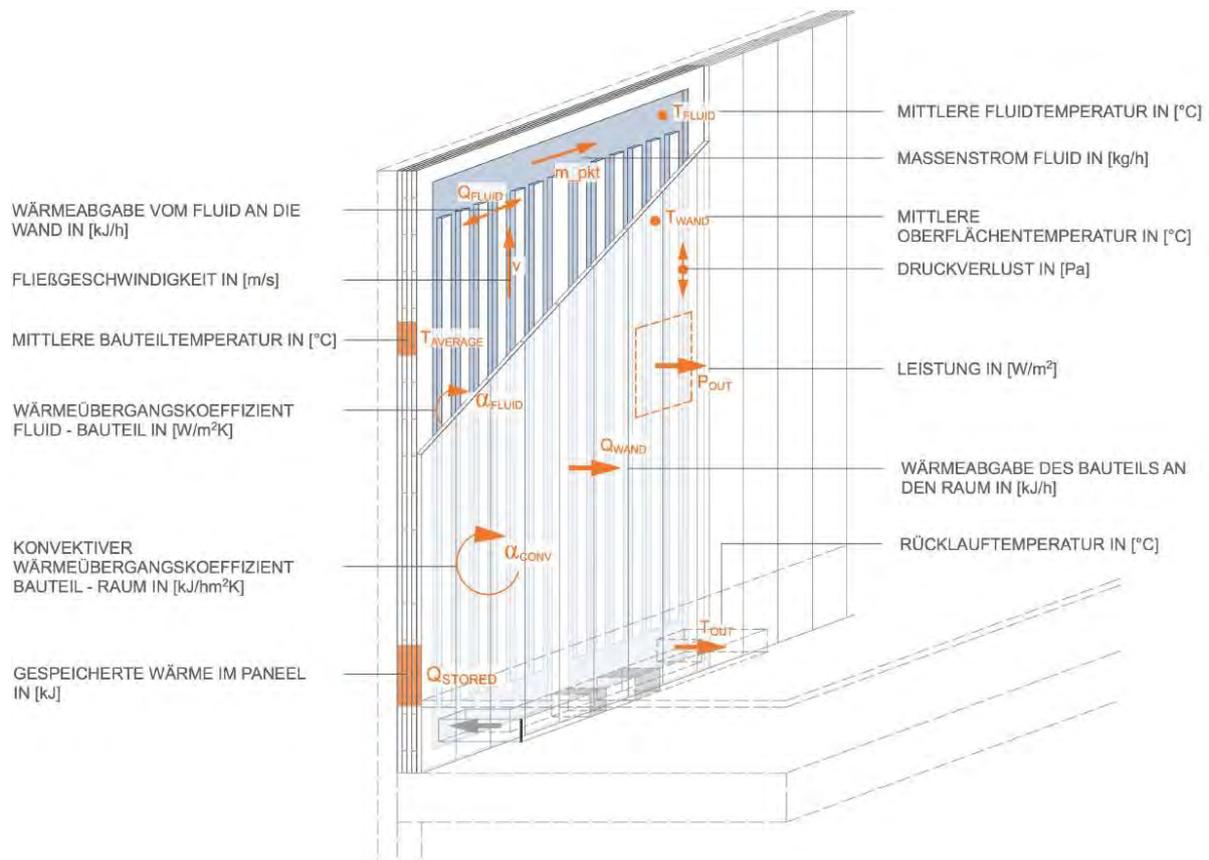


Abbildung 168: Thermodynamische Vorgänge des thermisch aktivierten Massivholzelements [45]

Abbildung 168 zeigt die thermischen Prozesse und Zustände welche in dem Simulationsmodell abgebildet werden.

Das thermische Modell muss die folgenden energetischen Prozesse abbilden:

- der Fluidkreislauf durch das Kanalsystem,
- den Wärmeübergang vom Fluid auf das Holzelement,
- die Wärmeausbreitung und Zwischenspeicherung im Holz sowie
- die Wärmeabgabe oder –Aufnahme an der Elementoberfläche.

Fluidkreislauf und Wärmeübergang auf das Holzelement

Die Luftführung durch das Massivholzelement entspricht, wie in 9.2.2 beschrieben, einer Serienschaltung der beiden harfenförmig aufgebauten Elementhälften. Diese Verschaltung bietet den Vorteil, dass beide Anschlussöffnungen im Sockelbereich des Elements liegen und dass sämtliche Strömungspfade durch das Element gleich lang sind. Die folgende Abbildung zeigt möglichen Schaltungen entsprechende Modi im Modell des TYPE 360.

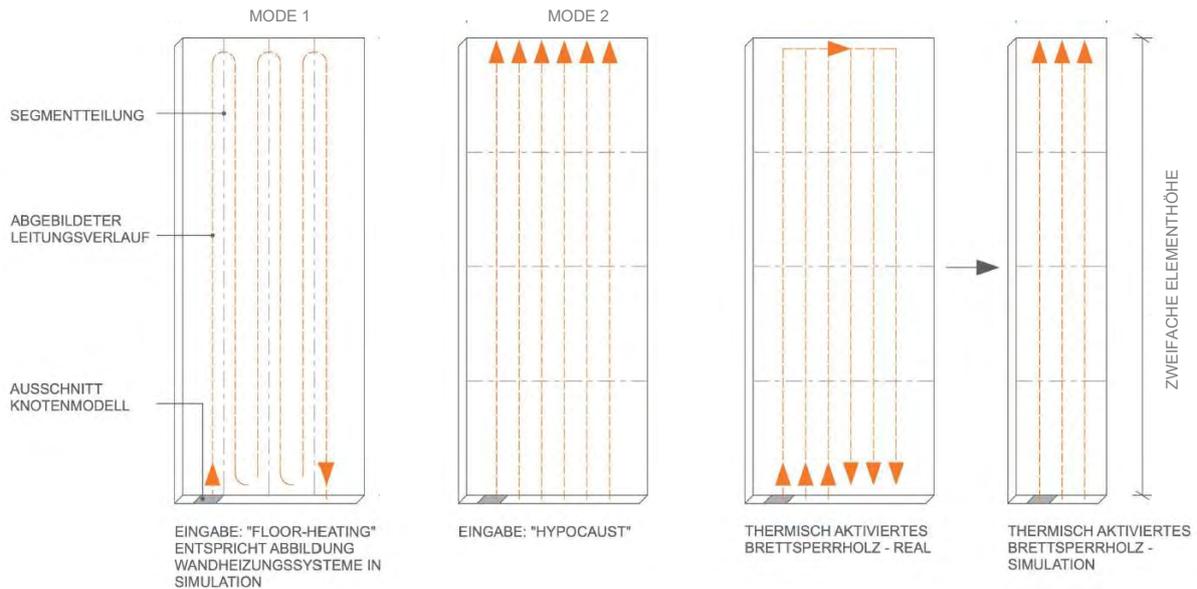


Abbildung 169: Mögliche Schaltbilder von Fluidkreisläufen des TYPE 360 [45]

In Type 360 können seriell mäandrierend (Abbildung ganz links) oder parallel durchströmte Elemente modelliert werden. Während ein wassergeführtes System mit hoher Wärmespeicherfähigkeit üblicherweise seriell geschaltet wird, bietet der Modus „Hypocaust“ die Möglichkeit eine parallele Durchströmung aller Kanäle mit Luft zu modellieren. Die reale Verschaltung der thermisch aktivierten Massivholzelemente entspricht dem in Abbildung 169 mittig rechts dargestellten Schema. Diese Schaltung entspricht einer Serie der beiden Elementhälften. Für die Modellierung dieser Schaltung wird gedanklich eine der Elementhälften „nach oben geklappt“. Bildlich ist dieses in der Abbildung ganz rechts dargestellt und wird durch die Halbierung der Elementbreite und Verdopplung der Elementhöhe eingegeben. Mit dieser Veränderung des Elementformates wird die tatsächliche Verschaltung der Luftkanäle annähernd korrekt abgebildet und die Berechnung der Strömungsweglänge und der lokalen Strömungsgeschwindigkeit möglich. Das Strömungsfeld des Wärmeüberträgermediums kann nun in Abhängigkeit seiner fluiddynamischen Eigenschaften abgebildet werden. Wie bei der Berechnung eines Wärmetauschers üblich, wird nun die äquivalente Fluidtemperatur berechnet aus der dann jener über die Kanallänge gemittelte Wärmefluss in das Material bestimmt werden kann. Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen wird je nach Gesamtlänge des Strömungsweges, dieser in mehreren Segmenten getrennt berechnet. Der Wärmeübergang vom Fluid auf das Holz wird aus der Rauigkeit der Holzoberfläche, dem Kanalquerschnitt sowie den fluiddynamischen Eigenschaften des Wärmeüberträgers berechnet.

Wärmeausbreitung und Zwischenspeicherung im Holz

Die zweidimensional betrachtete Wärmeausbreitung im Holz wird nach dem finiten-Differenzen-Ansatz mit den in Abbildung 170 illustrierten Knotenmodellen simuliert. Dabei wird für jedes Element eine Energiebilanz gebildet, die mit den benachbarten Elementen entsprechend der betreffenden Grenzflächen verknüpft wird. Mit dieser zweidimensionalen räumlichen Diskretisierung kann die Position der Luftkanäle im Holzelement eindeutig beschrieben und der Wärmefluss richtungsabhängig berechnet werden.

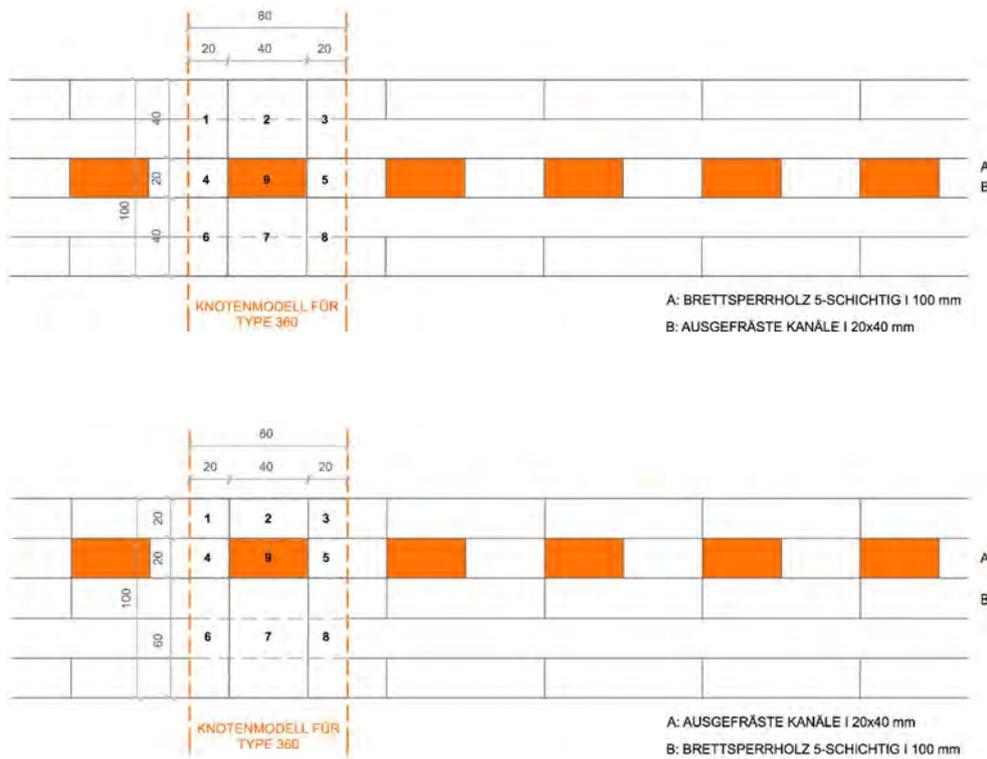


Abbildung 170: Geometrieingabe zur Modellierung des Aufbaus von Prototyp A (oben) und Prototyp B (unten)

Das Knotenmodell ist in der .fbh-Datei determiniert und beinhaltet Informationen zur Geometrie des Knotengitters sowie den thermischen Eigenschaften der dargestellten Materialien. Damit kann sowohl die zweidimensionale Ausbreitung als auch die temporäre Wärmespeicherung in den Elementen des Knotenmodells bilanziert werden. Die Leimfugen zwischen den Schichten werden aufgrund der geringer Stärke und Masse im thermischen Modell nicht betrachtet. An der Oberfläche des Bauteils werden die Temperaturen und Wärmeflüsse der einzelnen Elemente zu Mittelwerten verrechnet um diese mit dem Raummodell in Type 56 verknüpfen zu können.

Wärmeabgabe oder –Aufnahme an der Elementoberfläche

Nachdem die wärmeübertragenden Prozesse bis an die Elementoberfläche beschrieben wurden, bleibt die Modellierung des Wärmeübergangs von der Holzoberfläche zum Raum. Dieser Wärmeübergang muss differenziert in den vorkommenden Wärmeübertragungsarten Konvektion und Strahlung berechnet werden. Der konvektive Wärmeaustausch ist abhängig von der Neigung der Oberfläche sowie von der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der angrenzenden Luft und der Geschwindigkeit der Luft. Diese Werte liegen in der Simulation für jeden Zeitschritt oder konstant vor und ermöglichen eine detaillierte Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten Alpha und des daraus resultierenden Wärmeflusses. Neben der konvektiven Wärmeübertragung wird mittels elektromagnetischer Strahlung Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. Physikalisch betrachtet besteht diese Strahlung aus der langwelligen Wärmestrahlung der Umgebung sowie der kurzwelligen direkten und indirekten Solarstrahlung.

9.5.3 Validierung des numerischen Modells

Messdaten zur Modellvalidierung

Zur Validierung des Bauteilmodells wurden die Messwerte des Versuchsaufbaus mit den Daten der Simulation verglichen. Dabei wurde das Gesamtmodell so aufgebaut, dass mögliche Abweichungen auf die Parameter und Variablenwerte des Bauteilmodells eingegrenzt werden können. Der grafischen

Oberfläche des TRNSYS-Simulationsstudios in Abbildung 171 können die Bestandteile des Validierungsmodells entnommen werden.

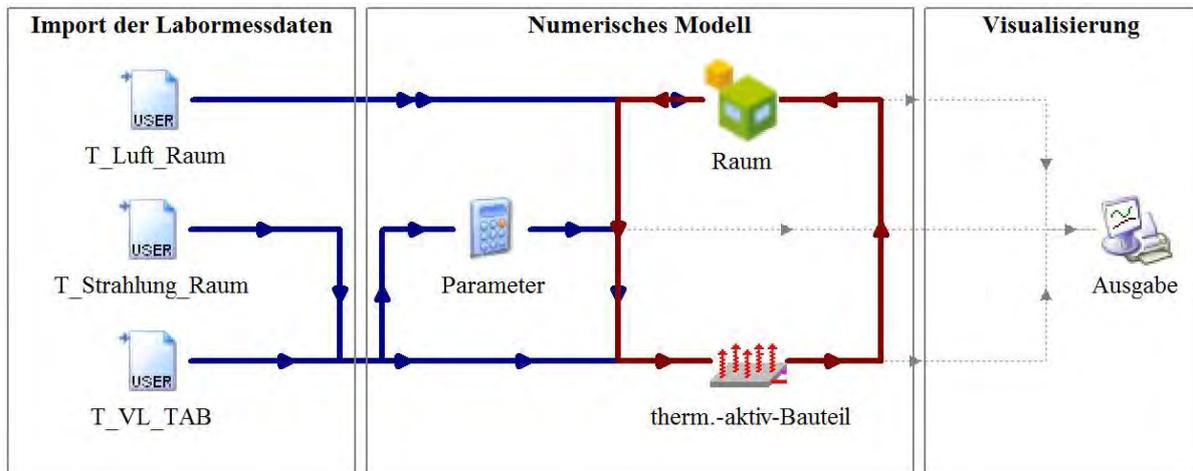


Abbildung 171: Aufbau des numerischen Validierungsmodells TRNSYS 17 Simulationsstudio

Wesentliches Merkmal dieses Validierungsmodells sind die Datenlese-Module für die Lufttemperatur und die mittlere Strahlungstemperatur des Laborraumes sowie der gemessenen Lufttemperatur an der Einströmöffnung. So ist sichergestellt, dass das numerische Bauteilmodell mit den exakt gleichen klimatischen Randbedingungen betrieben wird wie der reale Versuchsaufbau. Nur so ist ein Vergleich der Bauteilmessdaten mit den Bauteilsimulationsdaten sinnvoll.

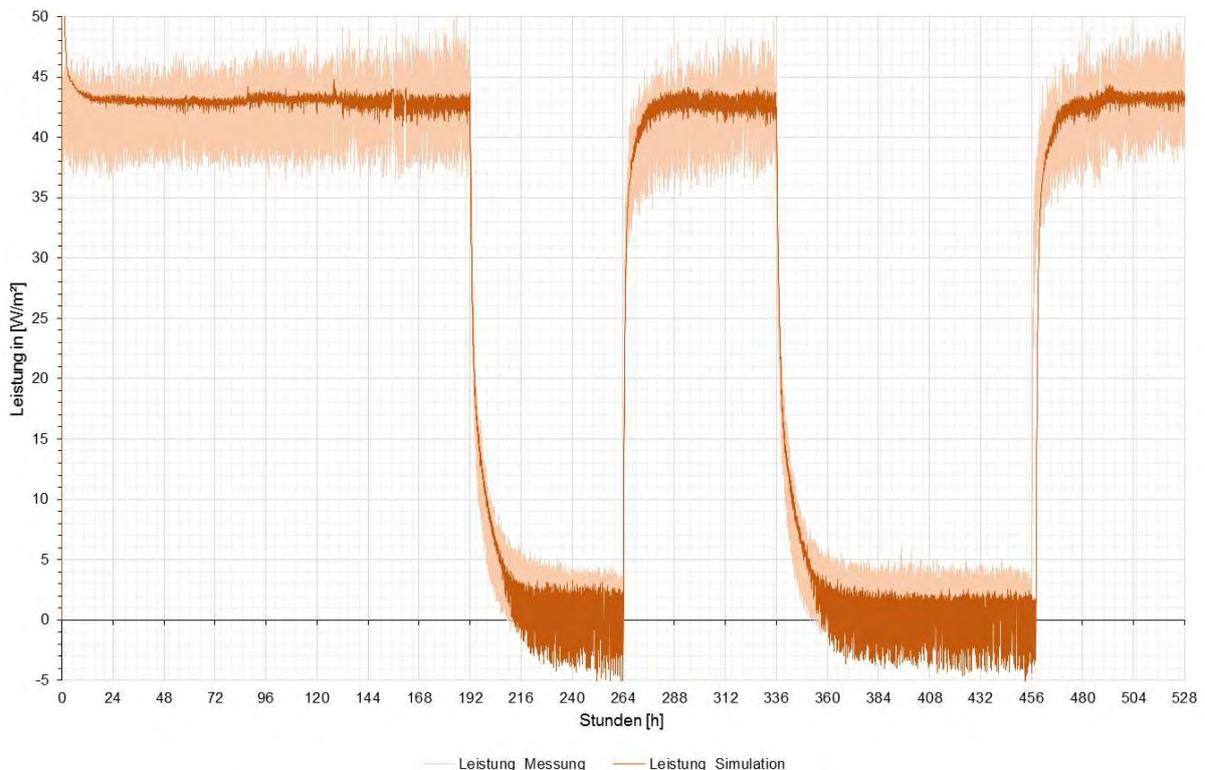


Abbildung 172: Dynamische Validierung – Vergleich der thermischen Leistung

Der erste Vergleich zwischen Simulations- und Messwerten betrifft den Heizversuch welcher bereits im Rahmen der Versuchsergebnisauswertung vorgestellt wird. Hier werden die gemessenen und simulierten mittleren thermischen Leistungen übereinandergelegt. Während des Heizbetriebs ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen. Auch die gemessenen Zustandsänderungen bei den vier

gezeigten Lastwechseln können sehr gut mit dem Simulationsmodell abgebildet werden. Der erste Abschaltvorgang in Abbildung 172 soll mit der folgenden Abbildung vergrößert dargestellt werden.

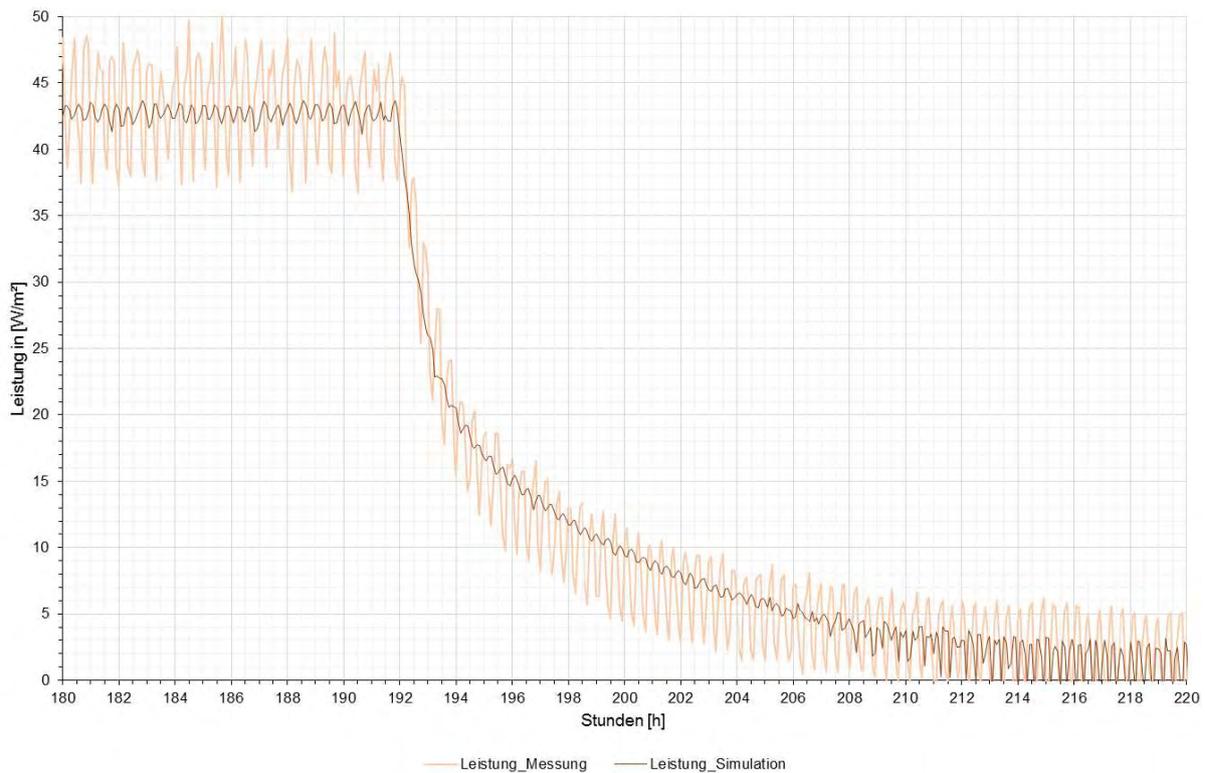


Abbildung 173: Dynamische Validierung – Vergleich der thermischen Leistung – Abklingkurve

Die größere zeitliche Auflösung in Abbildung 173 lässt erkennen, dass die Simulationsdaten leicht zeitversetzt gegenüber den Messdaten liegen. Diese zeitliche Verschiebung resultiert aus der zeitlichen Diskretisierung des Simulationsmodells, bzw. des Messintervalls. Sowohl die Rechenzeitschrittweite des numerischen Modells als auch das Messintervall des Versuchs sind auf 5-Minutenschritte eingestellt. Während der physische Aufbau im Labor den zeitlichen Schwankungen der Raumlufttemperatur unmittelbar und stetig ausgesetzt ist, sind die in das Modell importierten Messdaten im Maximalfall fünf Minuten zeitverzögert. Der daraus resultierende zeitliche Versatz der Simulationsergebnisse wird jedoch als unkritisch eingeschätzt.

Auffällig ist auch, dass die Schwankungsamplitude der Simulationsdaten deutlich geringer ausfällt als die der Messdaten. Auch diese Abweichung wird zu einem Teil mit der zeitlichen Diskretisierung der Simulation erklärt. Zum anderen bewirkt die räumliche Diskretisierung des Knotengitters eine gewisse Mittelung über der Materialschichtstärke der ersten Brettsperrholzschicht. Es wird vermutet, dass eine unendlich kleine Zeitschrittweite sowie ein unendlich fein aufgelöstes Knotengitter eine in etwa gleiche Schwankung der Simulationsergebnisse bewirken würde. Jedoch steht dieser Nutzen einem enormen Rechenaufwand entgegen und kann nicht empfohlen werden.

Die zeitlichen Mittelwerte beider Graphen in Abbildung 173 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. In der Simulation wird aus den Energieströmen die vom Raum und vom Bauteilinneren in die Oberfläche fließenden, über eine Bilanzierung, die Oberflächentemperatur berechnet.

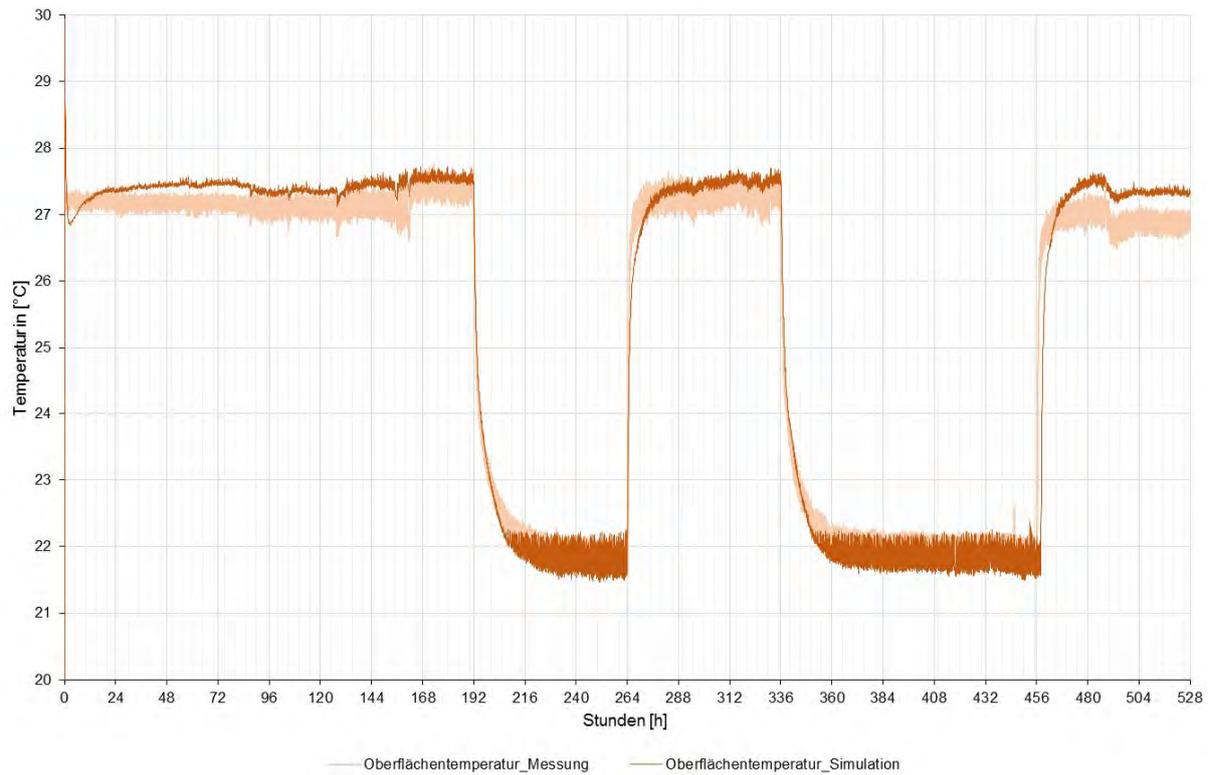


Abbildung 174: Dynamische Validierung – Vergleich der Oberflächentemperaturen

Die Daten der Oberflächentemperaturen zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Die Abweichung der Simulationsdaten von den Messdaten liegt über große Bereiche sogar innerhalb der Messunsicherheit der Temperatursensoren von 0,3 K.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde zum einen der Einfluss der thermischen Speicherfähigkeit von Gebäuden auf den Nutzenergiebedarf für Heizen, das sommerliche Überhitzungspotential und die thermische Behaglichkeit untersucht.

Zu diesem Zweck wurden an unterschiedlichen Standorten in Deutschland insgesamt vier Versuchskuben mit Außenwänden aus Ziegel-, Porenbeton- und Kalksandstein-Mauerwerk sowie Brettsperrholzelementen errichtet. Unter Anwendung verschiedener gesteuerter Heizungs- und Lüftungsprogramme wurden während eines Jahres Messdaten aus den Versuchskuben gesammelt und ausgewertet. Parallel wurden zu den realen Kuben Simulationsmodelle erstellt. Zur Validierung der Modelle wurden die Simulationsergebnisse mit den zugehörigen Messdaten abgeglichen. Daraufaufgehend wurden thermische Simulationen für ein repräsentatives Mehrfamilienhaus [20] erstellt. Im Rahmen einer Variantenuntersuchung wurden unterschiedliche praxistaugliche Konstruktionen der opaken Bauteile und verschiedene Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz angesetzt. Für zwei ausgewählte Räume des Wohngebäudes wurden die Simulationsergebnisse ausgewertet und Schlussfolgerungen daraus abgeleitet. Auf Basis der Ergebnisse wurden Wärmespeicherfähigkeitsindices zur Berechnung des Unterschieds bzgl. Heiz-Nutzenergiebedarf, Übertemperaturgradstunden und thermischer Behaglichkeit zwischen einer schweren Bauweise und einer leichten Bauweise mit einer grundflächenbezogenen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} von $50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ entwickelt.

Die Forschungsarbeit hat zu der Erkenntnis geführt, dass der Nutzenergiebedarf für Heizen umso niedriger ist, je höher die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} eines Gebäudes ist. Für Gebäude mit extrem schwerer im Vergleich zu extrem leichter Bauweise wurde ein um bis zu 9 % geringerer jährlicher Heiz-Nutzenergiebedarf ermittelt. Es ist zu überlegen, ob dieser Effekt normativ oder im Rahmen der EnEV eine Berücksichtigung finden sollte. Außerdem hat sich gezeigt, dass bei Nichtvorhandensein von baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz umso weniger sommerliche Überhitzung zu erwarten ist, desto höher die thermische Speicherfähigkeit der verbauten Konstruktionen ist. Weiterhin ist beim Verzicht des Einsatzes von außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen insbesondere während der Sommerperiode eine verbesserte thermische Behaglichkeit zu erwarten beim Einbau von Bauteilen mit einer hohen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C'_{wirk} . Bei Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz entsprechend DIN 4108-2 [12] konnte kein maßgeblicher Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit von Gebäuden auf das sommerliche Überhitzungspotential und die thermische Behaglichkeit nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen haben darüber hinaus gezeigt, dass noch weiterer Forschungsbedarf gegeben ist. Insbesondere sind weitere Untersuchungen sinnvoll, um den Gültigkeitsbereich und die Genauigkeit der entwickelten Wärmespeicherfähigkeitsindices zu erweitern. Aktuell sind diese vorgesehen für standardmäßige neu zu errichtende und energetisch sanierte Wohngebäude ohne Nachtabsenkung der Heizungsanlage unter Einhaltung der Hauptanforderungen der aktuell gültigen EnEV 2016 (Begrenzung Jahres-Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverluste) ohne Innendämmung sowie abgehängte oder thermisch abgedeckte Decken. Zu diesem Zweck sind auf der einen Seite weitere Simulationsuntersuchungen außerhalb der Projektlaufzeit vorgesehen. Auf der anderen Seite ist in Abstimmung mit den Projektpartnern geplant, die Forschung an den Versuchskuben fortzuführen.

Die bestehenden Kuben bilden eine hervorragende Basis für weitere Untersuchungen, da Messtechnik bereits verbaut ist und somit kein Austausch von Sensorik notwendig ist. Außerdem können mit Hilfe der installierten regelbaren Lüftungs- und Heiztechnik unterschiedliche reale Nutzerszenarien wie z.B. Senioren- oder Singlehaushalte nachgestellt werden. Darüber hinaus stehen die Versuchskuben an unterschiedlichen Standorten in Deutschland, so dass weitere wissenschaftliche Erkenntnisse unter realen Bedingungen an mehreren Klimaregionen gewonnen werden können. Insbesondere bilden die Kuben mit verschiedenen Außenwandkonstruktionen die Möglichkeit, weitere messtechnische

Untersuchungen zum Wärmedämmverhalten unter realen Klimabedingungen durchzuführen. Mit Hilfe der Auswertung von Wärmestromdichtemessungen können beispielsweise Rückschlüsse zur Abweichung des realen Energieverbrauchs unter instationären Randbedingungen im Vergleich zum berechneten Energiebedarf unter stationären Bedingungen gewonnen werden.

Die bisherige Forschungsarbeit sowie zukünftige neue Erkenntnisse werden in der Fachwelt mittels bereits geplanter Publikationen Verbreitung finden.

Die Umsetzbarkeit von luftgeführten thermisch aktivierten Massivholzelementen als Flächenheizungs- und Kühlungssystem wurde in dem durchgeführten Forschungsprojekt nachgewiesen. Bei der Herstellung der Elemente kann weitgehend auf vorhandene Produktionsanlagen zurückgegriffen werden. Verfahrenstechnischer Optimierungsbedarf besteht beim Aufbringen des Klebers sowie beim Fräsen der integrierten Kanäle. Durch die Wahl von leistungsfähigeren Zerspanungswerkzeugen würde der Fräsvorgang stark beschleunigt. Für die Produktion sollten in allen Schichten schmalseitenverleimte Brettlagen verwendet werden.

Für den Einsatz als Wandelement eignet sich ein doppelharfenförmiges Kanalarrangement. Diese Aufteilung bietet den Vorteil, dass die Erschließung der Elemente im Fußbodenaufbau erfolgen kann. Für hohe Leistungen und kurze thermische Ansprechzeiten sollten die Kanäle in geringer Tiefe unter der Holzoberfläche liegen. Eine notwendige Mindeststärke stellt die Luftdichtheit sicher und sollte mindestens eine schmalseitenverleimte ungestörte Brettlamellenlage betragen.

Die maximal erreichbare Heiz- und Kühlleistung des getesteten Prototyp B ist abhängig von der Vorlauftemperatur und wird begrenzt von der sich einstellenden Holzfeuchte. Versuche und Simulationen haben gezeigt, dass eine Heizleistung von 47 Watt je m²-Elementfläche bei Raumlufttemperaturen von 20 °C und 50 % r.F. ohne Beeinträchtigung der Brettsperrholzelemente dauerhaft möglich ist. Dafür werden Vorlauftemperaturen der Systemluft von max. 45 °C benötigt. Bei extrem trockenem Umgebungsklima von unter 30 % r.F. sollte die dauerhaft zulässige Heizleistung reduziert werden, um Schwindrisse an der Elementoberfläche zu vermeiden.

Im Kühlbetrieb sollte eine dauerhafte Systemleistung von 24 Watt je m²-Elementfläche nicht überschritten werden, um Holzfeuchten über 20 M-% zu vermeiden.

Das entwickelte numerische Simulationsmodell wurde durch einen Abgleich mit den Labormessdaten validiert und steht für die weitere Optimierung des Systems und die Auslegung der thermisch aktivierten Massivholzelemente für konkrete Einsatzszenarien zur Verfügung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hier insbesondere in der strömungstechnischen Optimierung des Kanalsystems und der darauf abgestimmten Entwicklung einer standardisierten Luftkonditionierungseinheit für die Systemluft.

11 Literatur

- [1] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Auswirkungen der Entwicklung zu Niedrigstenergiegebäuden auf die Gebäudehülle. In: Fouad, N. A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2017. Gebäudehülle und Fassaden, S. 45–76. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2017.
- [2] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Standard von Niedrigstenergiegebäuden in Deutschland. Mauerwerk 21 (2017), Heft 5, S. 273–286.
- [3] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Niedrigstenergiegebäude - Entwicklung eines Standards und einer Berechnungsmethode für die Gebäudeenergieeffizienz. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2017.
- [4] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Niedrigstenergiegebäude-Standard in Deutschland. In: Kornadt, O.; Carrigan, S.; Hoffmann, S. et al. (Hrsg.): Bauphysiktag Kaiserlautern 2017. Bauphysik in Forschung und Praxis. Bauphysiktag Kaiserlautern 2017, Kaiserslautern, 25.-26.10.2017, S. 115–120. Eigenverlag der Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2017.
- [5] Hofmann, M.; Geyer, C.; Kornadt, O.: Auswertung von Raumklimamessungen und Bestimmung typischer Taupunkttemperaturen in natürlich belüfteten Wohnzimmern. Bauphysik 39 (2017), Heft 3, S. 151–158.
- [6] Heimerdinger, C.; Nagel, L.; Kornadt, O.: Effiziente Innendämmung mit hoher thermischer Speicherfähigkeit. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2017.
- [7] Heimerdinger, C.; Nagel, L.; Kornadt, O.: Effiziente Innendämmung mit hoher thermischer Speicherfähigkeit. In: Kornadt, O.; Carrigan, S.; Hoffmann, S. et al. (Hrsg.): Bauphysiktag Kaiserlautern 2017. Bauphysik in Forschung und Praxis. Bauphysiktag Kaiserlautern 2017, Kaiserslautern, 25.-26.10.2017, S. 25–28. Eigenverlag der Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2017.
- [8] Schild, K.; Willems, W. M.: Wärmeschutz. Grundlagen - Berechnung - Bewertung. Detailwissen Bauphysik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [9] DIN EN ISO 13786:2008-04: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO 13786:2007).
- [10] Deutscher Bundestag; Deutscher Bundesrat: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. EnEV, Heft 2013, 2014.
- [11] DIN V 18599-2:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- [12] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [13] Xella Deutschland GmbH: Ytong Planblock. <https://www.ytong-silka.de/ytong-planblock.php> (Abruf: 19.03.2018).
- [14] Xella Deutschland GmbH: Silka Ratio Planstein. <https://www.ytong-silka.de/silka-ratio-planstein.php> (Abruf: 19.03.2018).
- [15] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.
- [16] DIN EN ISO 7730:2006-05: 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 (ISO 7730:2005).
- [17] Kolmetz, S.: Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen. Ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung von Raumtemperaturen in Gebäuden im Sommer und deren Häufigkeit, Dissertation. Universität Kassel, Kassel, 1996.

- [18] Fanger, P. O.: Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Kopenhagen, 1970.
- [19] University of Wisconsin–Madison: TRNSYS Frequently Asked Questions. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/faq/faq.htm> (Abruf: 12.04.2018).
- [20] Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.: Typengebäude MFH. Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.
- [21] DIN V 18599-10:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- [22] Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S.: Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. Edition Detail, München, op. 2017.
- [23] Mestek, P., Werther, N., & Winter, S.: Bauen mit Brettsperrholz. Tragende Massivholzelemente für Wand, Decke und Dach. Informationsdienst Holz 2012 (2012), Heft 1.
- [24] Winter, S.; Mestek, P.; Werther, N.: Holzbau Handbuch. Bauen mit Brettsperrholz. Informationsdienst Holz (2010), Reihe 4, Teil 6, Folge 1.
- [25] Binderholz GmbH: Produktdaten Binderholz Brettsperrholz. <https://www.binderholz.com/> (Abruf: 15.03.2018).
- [26] Foglia, H.; Sonderegger, W.; Niemz, P. et al.: Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit neuartiger Holzwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2004.02. 2006 (2006).
- [27] Schneider, A.; Engelhardt, F. (Hrsg.): Vergleichende Untersuchung über die Wärmeleitfähigkeit von Holzspan- und Rindenplatten. Holz als Roh- und Werkstoff, 1977.
- [28] Suleiman, B.; Larfeldt, M. J.; Leckner, B. et al.: Thermal conductivity and diffusivity of wood. Science, Journal of the International Academy of Wood, Wood Science and Technology (1999).
- [29] Cammerer, J.; Achziger, J. (Hrsg.): Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Forschungsvorhaben Nr. BI5-800183-4. IRB-Verl., Stuttgart, 1984.
- [30] Sonderegger, W.; Hering, S.; Mannes, D. et al. (Hrsg.): Quantitative determination of bound water diffusion in multilayer boards by means of neutron imaging. Springer Verlag, 2010.
- [31] Hausladen, G.; Tichelmann, K.: Ausbau-Atlas. Integrale Planung, Innenausbau, Haustechnik. Edition Detail. Birkhäuser, Basel, Berlin [u.a.], 2009.
- [32] Stadtverwaltung Weißenburg i. Bay.: Römische Thermen. <https://www.weissenburg.de/impressum/> (Abruf: 15.03.2018).
- [33] Schwenk, C.; Maas, A.: Betonkernaktivierung mit Luft am Beispiel eines ENOB- Projektes – Vergleichende Systemsimulation (2014).
- [34] Maschinenfabrik Gg. Kiefer GmbH: Produktbeschreibung zur Luftgeführten Betonkernaktivierung Concretcool. <https://www.kieferklima.de/produkte/betonkerntemperierung-concretcool/> (Abruf: 17.04.2018).
- [35] Wehsener, J.; Schulz, T.; Gecks, J. et al.: Untersuchungen zu mehrlagigen Massivholzplatten als Heiz- und Kühlelement. Bauphysik 38 (2016), Heft 3, S. 129–134.
- [36] Gecks, J.; Plagge, R.: Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage, 2015.
- [37] Tinkerforge GmbH: Produktdaten zu Tinkerforge Mess-, Steuerungs- und Regelungskomponenten. <https://www.tinkerforge.com> (Abruf: 17.04.2018).
- [38] Scantronik Mugrauer GmbH: Produktdaten zum Scantronik Holzfeuchte-Messsystem. www.scantronik.de/ (Abruf: 17.04.2018).
- [39] KIMO Instruments: Produktdaten zum Kimo-Thermoanemometer. <http://kimo-instruments.com/en/portable/vt-110-vt-115> (Abruf: 17.04.2018).

- [40] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH: Produktdaten zum Almemo-Messsystem.
<http://www.ahlborn.com> (Abruf: 17.04.2018).
- [41] Künzel, H.: Simulationssoftware WUFI 2D (Wärme und Feuchte instationär). <https://wufi.de>
(Abruf: 17.04.2018).
- [42] Henschen, S.: Messtechnisch und simulationsgestützte Untersuchung des instationären
hygrothermischen Verhaltens von thermisch aktivierten Brettsperrholzelementen. Master's
Thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München,
2018.
- [43] Transsolar Energietechnik GmbH: Simulationssoftware TRNSYS 17, Transient System Simulation
Tool. <http://www.trnsys.com/> (Abruf: 10.03.2017).
- [44] Fort, K.: Type 360: Floor heating and hypocaust.
http://trnsys.de/download/en/ts_type_360_en.pdf (Abruf: 21.03.2018).
- [45] Baumgartner, T.: Thermisch aktivierte Massivholzelemente - Analyse und Systemvergleich
mittels thermischer Gebäudesimulation. Master's Thesis, Technische Universität München,
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München, 2018.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufstellort Ziegel-Kubus	9
Abbildung 2:	Aufstellort Porenbeton- und Kalksandstein-Kubus	10
Abbildung 3:	Aufstellort Brettsperrholzkubus	10
Abbildung 4:	Errichteter Ziegel-Kubus	11
Abbildung 5:	Errichteter Porenbeton-Kubus	11
Abbildung 6:	Errichteter Kalksandstein-Kubus	12
Abbildung 7:	Errichteter Brettsperrholzkubus.....	12
Abbildung 8:	Installierter elektrischer Rippenrohrheizkörper.....	14
Abbildung 9:	Außenansicht auf Zuluftrohr	15
Abbildung 10:	Innenansicht auf Zuluftrohr.....	15
Abbildung 11:	Innenansicht auf Zuluftrohr.....	15
Abbildung 12:	Ansicht auf Thermoanemometer	16
Abbildung 13:	Außenansicht auf Abluftrohr	16
Abbildung 14:	Innenansicht auf Abluftrohr	16
Abbildung 15:	Innenansicht auf Abluftrohr	17
Abbildung 16:	Innenansicht auf Abluftrohr	17
Abbildung 17:	Innenansicht auf Leuchtmittel.....	17
Abbildung 18:	Präparierter Ziegel-Mauerstein.....	18
Abbildung 19:	Präparierter Porenbeton-Mauerstein	18
Abbildung 20:	Präparierter Kalksandstein-Mauerstein	19
Abbildung 21:	Behaglichkeitsmessstand.....	19
Abbildung 22:	Wetterstation Wöllstein.....	20
Abbildung 23:	Wetterstation Emstal	20
Abbildung 24:	Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	21
Abbildung 25:	Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Ziegel-Kubus	22
Abbildung 26:	Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Ziegel-Kubus	24
Abbildung 27:	Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus	24
Abbildung 28:	Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	25
Abbildung 29:	Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus	26
Abbildung 30:	Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Ziegel-Kubus.....	27
Abbildung 31:	Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	27
Abbildung 32:	Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	28
Abbildung 33:	Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus	28
Abbildung 34:	Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus	29
Abbildung 35:	Nachtsabsenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	29

Abbildung 36:	Nachtabenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	30
Abbildung 37:	Nachtabenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus	30
Abbildung 38:	Nachtabenkung Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Ziegel-Kubus	31
Abbildung 39:	Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch und Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	31
Abbildung 40:	Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	32
Abbildung 41:	Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Porenbeton-Kubus	33
Abbildung 42:	Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Porenbeton-Kubus	34
Abbildung 43:	Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus	35
Abbildung 44:	Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	35
Abbildung 45:	Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus	36
Abbildung 46:	Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Porenbeton-Kubus	37
Abbildung 47:	Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	37
Abbildung 48:	Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	38
Abbildung 49:	Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus	38
Abbildung 50:	Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus	39
Abbildung 51:	Nachtabenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	39
Abbildung 52:	Nachtabenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	40
Abbildung 53:	Nachtabenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus	40
Abbildung 54:	Nachtabenkung Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Porenbeton-Kubus	41
Abbildung 55:	Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch und Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	41
Abbildung 56:	Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus	42
Abbildung 57:	Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Kalksandstein-Kubus	43
Abbildung 58:	Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Kalksandstein-Kubus	44
Abbildung 59:	Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus	44

Abbildung 60:	Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus.....	45
Abbildung 61:	Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus.....	46
Abbildung 62:	Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Kalksandstein-Kubus	47
Abbildung 63:	Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus.....	47
Abbildung 64:	Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus.....	48
Abbildung 65:	Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus.....	48
Abbildung 66:	Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus.....	49
Abbildung 67:	Nachtsabsenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus	49
Abbildung 68:	Nachtsabsenkung Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Kalksandstein-Kubus.....	50
Abbildung 69:	Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch und Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus	51
Abbildung 70:	Jahresverlauf – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus.....	52
Abbildung 71:	Sommerverlauf – ermittelte operative Raumtemperatur, gemessene Außenlufttemperatur und Grenzwert für Übertemperaturgradstunden für den Brettsperrholz-Kubus.....	53
Abbildung 72:	Sommerliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Brettsperrholz-Kubus	54
Abbildung 73:	Tagesverlauf Sommer – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus.....	54
Abbildung 74:	Winterliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus.....	55
Abbildung 75:	Winterliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus.....	55
Abbildung 76:	Künstliches Aufheizen und Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) für den Brettsperrholz-Kubus.....	56
Abbildung 77:	Künstliches Aufheizen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus.....	57
Abbildung 78:	Künstliches Abkühlen – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus.....	57
Abbildung 79:	Künstliches Aufheizen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus.....	58
Abbildung 80:	Künstliches Abkühlen – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus.....	58
Abbildung 81:	Nachtsabsenkung Heizung im Winter – gemessene Raumluft- und Außenlufttemperatur für den Brettsperrholz-Kubus	59
Abbildung 82:	Nachtsabsenkung der Heizung im Winter – gemessene Temperatur im Querschnitt der Nord-Ost-Außenwand des Brettsperrholz-Kubus	60
Abbildung 83:	Heizperiodenverlauf – gemessener Energieverbrauch des Brettsperrholz-Kubus 60	

Abbildung 84:	Jahresverlauf – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	62
Abbildung 85:	Künstliches Abkühlen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus.....	62
Abbildung 86:	Sommerliches Aufheizen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus.....	62
Abbildung 87:	Nachtsabsenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Ziegel-Kubus	63
Abbildung 88:	Jahresverlauf – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus.....	63
Abbildung 89:	Künstliches Abkühlen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	63
Abbildung 90:	Sommerliches Aufheizen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	64
Abbildung 91:	Nachtsabsenkung Heizung in Übergangszeit – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Porenbeton-Kubus	64
Abbildung 92:	Jahresverlauf – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus.....	64
Abbildung 93:	Künstliches Abkühlen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus	65
Abbildung 94:	Sommerliches Aufheizen – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus	65
Abbildung 95:	Nachtsabsenkung Heizung im Winter – gemessene und simulierte Raumlufttemperatur und gemessene Außenlufttemperatur für den Kalksandstein-Kubus.....	65
Abbildung 96:	Ansicht Eingang (Ost) – TypengebäudeMFH [20].....	66
Abbildung 97:	Ansicht Seite 1 (Nord) – TypengebäudeMFH [20].....	67
Abbildung 98:	Ansicht Garten (West) – TypengebäudeMFH [20]	67
Abbildung 99:	Ansicht Seite 2 (Süd) – TypengebäudeMFH [20].....	68
Abbildung 100:	Schnitt – TypengebäudeMFH [20].....	68
Abbildung 101:	Simulationsmodell – TypengebäudeMFH.....	69
Abbildung 102:	Grundriss 1.OG – TypengebäudeMFH (in Anlehnung an [20]).....	71
Abbildung 103:	Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	80
Abbildung 104:	Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	81
Abbildung 105:	Simulationsergebnisse monatlicher Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – beide Räume gemittelt.....	82
Abbildung 106:	Simulationsergebnisse monatlicher Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz) – beide Räume gemittelt.....	82
Abbildung 107:	Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	83
Abbildung 108:	Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	83
Abbildung 109:	Simulationsergebnisse PPD (Jahr / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum.....	84
Abbildung 110:	Simulationsergebnisse PPD (Winter / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum.....	85
Abbildung 111:	Simulationsergebnisse PPD (Sommer / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum.....	85

Abbildung 112:	Simulationsergebnisse PPD (Übergangszeit / ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	85
Abbildung 113:	Simulationsergebnisse PPD (Jahr / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	86
Abbildung 114:	Simulationsergebnisse PPD (Winter / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum.....	86
Abbildung 115:	Simulationsergebnisse PPD (Sommer / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum.....	87
Abbildung 116:	Simulationsergebnisse PPD (Übergangszeit / mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	87
Abbildung 117:	Entwicklung Wärmespeicherfähigkeitsindex für den Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz)	89
Abbildung 118:	Entwicklung Wärmespeicherfähigkeitsindex für den Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz)	89
Abbildung 119:	Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für die sommerliche Überhitzung (ohne sommerlichen Wärmeschutz)	91
Abbildung 120:	Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für die sommerlich gemittelte thermische Behaglichkeit (ohne sommerlichen Wärmeschutz)	92
Abbildung 121:	Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für die jährlich gemittelte thermische Behaglichkeit (ohne sommerlichen Wärmeschutz)	92
Abbildung 122:	(BSP, X-Lam).....	94
Abbildung 123:	Wandtafeln aus Brettsperrholz eines Einfamilienhauses [23]	94
Abbildung 124:	Herstellungsprozess von Brettsperrholz [23]	95
Abbildung 125:	Gemessene Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Brettsperrholzelemente bei unterschiedlichen Materialfeuchten	97
Abbildung 126:	Vertikale Profile des Feuchtegehalts durch die Proben der Serie 1 mit 1, 3 und 5 Klebefugen während des Diffusionsprozesses (feine Linien = experimentelle Werte; fette Linien = berechnete Kurven); (a-c) UF, (d-f) 1K-PUR [30].....	99
Abbildung 127:	Schema der historischen Hypokaustenheizung der Römer, rechts Römisches Thermalbad der Stadt Weißenburg in Bayern [32].	100
Abbildung 128:	Das System Concretcool der Firma Kiefer [34].....	100
Abbildung 129:	Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage aus einem Forschungsprojekt des Internationalen Vereins für Technische Holzfragen e. V. [35].....	101
Abbildung 130:	Ausgewählte Einsatzszenarien thermisch aktivierter Massivholzelemente, v. l. Innenwand in einer Nutzungseinheit, Innenwand zwischen zwei Nutzungseinheiten, Außenwand	102
Abbildung 131:	Mäanderförmige Serien-schaltung der Kanäle mit einseitiger Erschließung im Sockelbereich.....	107
Abbildung 132:	Harfenförmige Parallel-schaltung mit diagonaler Erschließung, horizontale Einzelkanäle	107
Abbildung 133:	Harfenförmige Parallel-schaltung mit diagonaler Erschließung, vertikale Einzelkanäle	108
Abbildung 134:	Harfenförmige Serien-Parallelschaltung mit Erschließung im Sockelbereich, vertikale Einzelkanäle	108
Abbildung 135:	Prototyp A mit der Luftführenden Schicht in Brettlamellenlage drei	110
Abbildung 136:	Prototyp B mit der Luftführenden Schicht in Brettlamellenlage zwei	111
Abbildung 137:	113
Abbildung 138:	Abundbemaßung für die Herstellung der Prototypen A und B [25].....	114
Abbildung 139:	Produktionsfolge Fräsen der Kanäle, Kleberauftrag, Zusammenklappen, Verpressen und Aushärten [25].....	114

Abbildung 140:	Vor dem Abbund durch das Portalbearbeitungszentrum wird das Werkstück auf dem Träger fixiert	115
Abbildung 141:	Das Layout für den Abbund wird mittels G-Code dreidimensional vorgegeben.	115
Abbildung 142:	Der Abbund der Halbelemente erfolgt mit einem 30mm Nutfräser. Bei quer zur Faserrichtung verlaufenden Fräskanälen ist auf die Schmalseitenverleimung zu achten um eine Sperrwirkung gegen Abscherungen zu bewirken.....	116
Abbildung 143:	Das Fräsen der Kanäle in Schicht zwei hat auch quer zur Faserrichtung dort problemlos funktioniert wo die Lamellen schmalseitenverleimt sind. Als problematisch hat sich der der nicht schmalseitenverleimte Stoß zwischen den Massivholzplatten herausgestellt. Siehe Abbildung 145.....	116
Abbildung 144:	Die Maßhaltigkeit der Abbundanlage liegt im Bereich $< 1/10$ mm. Stichprobenartig konnte diese Toleranz bestätigt werden. Zur späteren Positionierung der Messsensoren wurden die Stege markiert.	117
Abbildung 145:	Die querliegende Schicht zwei wurde aus schmalseitenverleimten Massivholzplatten hergestellt. Der Stoß dieser Platten besteht aus der in der linken Abbildung gezeigten V-Nut. Die Folge waren Abscherungen, welche beim Fräsen der Kanäle in Schicht zwei in Höhe der V-Nut aufgetreten sind.....	117
Abbildung 146:	Die Abscherungen in Schicht zwei wurden zunächst auf ein definiertes Maß ausgefräst und dann durch das Einkleben von Füllstücken versiegelt. Vor dem Verkleben wurden diese plangeschliffen.	117
Abbildung 147:	Um Undichtigkeiten durch die V-Nut im zweiten Halbelement zu vermeiden wird diese versiegelt.....	118
Abbildung 148:	Der Auftrag des Klebers erfolgt manuell auf das rückseitige Halbelement. Die benötigte Zeit für diesen manuellen Vorgang betrug ca. fünf Minuten.	118
Abbildung 149:	Verpressen und Aushärten der Halbelemente im hydraulischen Pressbett.	119
Abbildung 150:	Problemstelle V-Nut in den Querlagen	119
Abbildung 151:	Visualisierung der Versuchskonfiguration – Links: Vorderansicht, Mitte: Rückansicht, Rechts: Vorderansicht mit ausgeblendeter erster Schicht am Prototyp B; nicht dargestellt ist die Stirnseitendämmung oben und an den Seiten	121
Abbildung 152:	Versuchskonfiguration mit Prototyp A – Links: Vorderansicht, rechts: Rückansicht	122
Abbildung 153:	Hydraulik- und Regelungsschema der Systemluftkonditionierung	122
Abbildung 154:	Versuchsaufbau mit Prototyp B und Klimamessstation	123
Abbildung 155:	Datenpunkte im Systemluftkreislauf und an der Elementoberfläche	124
Abbildung 156:	Datenpunkte in den Massivholzelementen, hier in Prototyp A	125
Abbildung 157:	Bestimmung des Volumenstromes im Systemluftkreislauf bei Prototyp B	126
Abbildung 158:	Messdaten zum Heizbetrieb an Prototyp B; TVL=45,0 °C; TOP,Raum=21,6 °C, ..	127
Abbildung 159:	Zeitliche Entwicklung der Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang im Querschnitt des Massivholzelements.....	128
Abbildung 160:	Probeentnahme nach dem Test des Prototyp A zur Bestimmung der Holzfeuchte und Begutachtung der Kanalinnenseiten	129
Abbildung 161:	Holzfeuchtemessung über dem Querschnitt vom Prototyp B	130
Abbildung 162:	2D-Modell der hygrothermischen Simulation in WUFI-2D [41]	132
Abbildung 163:	Abhängigkeit zwischen spezifischer Heizleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungsklima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte [42]	132
Abbildung 164:	Abhängigkeit zwischen spezifischer Kühlleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungsklima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte [42]	133

Abbildung 165:	links: Modell des Temperaturverlaufs einer Rohrleitung innerhalb eines Bauteils; rechts: Temperaturfeld um ein Rohrelement innerhalb eines thermisch aktivierten Bauteils [43]	135
Abbildung 166:	Einbindung des TYPE 360 in die TRNSYS-Simulationsumgebung	136
Abbildung 167:	Grundriss der Zone und schematische Darstellung der Verknüpfung zwischen dem Raummodell und dem Bauteilmodell TYPE 360	137
Abbildung 168:	Thermodynamische Vorgänge des thermisch aktivierten Massivholzelements [45]	138
Abbildung 169:	Mögliche Schaltbilder von Fluidkreisläufen des TYPE 360 [45]	139
Abbildung 170:	Geometrieeingabe zur Modellierung des Aufbaus von Prototyp A (oben) und Prototyp B (unten)	140
Abbildung 171:	Aufbau des numerischen Validierungsmodells TRNSYS 17 Simulationsstudio ...	141
Abbildung 172:	Dynamische Validierung – Vergleich der thermischen Leistung	141
Abbildung 173:	Dynamische Validierung – Vergleich der thermischen Leistung – Abklingkurve ..	142
Abbildung 174:	Dynamische Validierung – Vergleich der Oberflächentemperaturen	143
Abbildung 175:	Grundriss Ziegel-Kubus	158
Abbildung 176:	Schnitt A Ziegel-Kubus	159
Abbildung 177:	Schnitt B Ziegel-Kubus	159
Abbildung 178:	Grundriss Porenbeton-Kubus	160
Abbildung 179:	Schnitt A Porenbeton-Kubus	161
Abbildung 180:	Schnitt B Porenbeton-Kubus	161
Abbildung 181:	Grundriss Kalksandstein-Kubus	162
Abbildung 182:	Schnitt A Kalksandstein-Kubus	163
Abbildung 183:	Schnitt B Kalksandstein-Kubus	163
Abbildung 184:	Grundriss Ziegel-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren	165
Abbildung 185:	Schnitt A Ziegel-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren	166
Abbildung 186:	Schnitt B Ziegel-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren	167
Abbildung 187:	Grundriss Porenbeton-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren	168
Abbildung 188:	Schnitt A Porenbeton-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren.....	169
Abbildung 189:	Schnitt B Porenbeton-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren.....	170
Abbildung 190:	Grundriss Kalksandstein-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren	171
Abbildung 191:	Schnitt A Kalksandstein-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren.....	172
Abbildung 192:	Schnitt B Kalksandstein-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren.....	173

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wandaufbau Ziegel-Kubus	13
Tabelle 2:	Wandaufbau Porenbeton-Kubus.....	13
Tabelle 3:	Wandaufbau Kalksandstein-Kubus.....	13
Tabelle 4:	Wandaufbau Brettsperrholz-Kubus.....	14
Tabelle 5:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1	72
Tabelle 6:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1.....	72
Tabelle 7:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2	72
Tabelle 8:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2.....	73
Tabelle 9:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 1.....	73
Tabelle 10:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 1	73
Tabelle 11:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 2.....	74
Tabelle 12:	Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 2.....	74
Tabelle 13:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 3.....	74
Tabelle 14:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 3	75
Tabelle 15:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 1	75
Tabelle 16:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 1.....	75
Tabelle 17:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 2	76
Tabelle 18:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 2.....	76
Tabelle 19:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Leichtbauweise	76
Tabelle 20:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Leichtbauweise	77
Tabelle 21:	Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum.....	78
Tabelle 22:	Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	78
Tabelle 23:	Simulationsergebnisse PPD (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West-Raum ..	78
Tabelle 24:	Simulationsergebnisse PPD (ohne sommerlichen Wärmeschutz) – Nord-Raum.....	79
Tabelle 25:	Simulationsergebnisse Nutzenergiebedarf für Heizen (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum.....	79
Tabelle 26:	Simulationsergebnisse sommerliche Überhitzung (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West- und Nord-Raum	79
Tabelle 27:	Simulationsergebnisse PPD (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Süd-West-Raum	79
Tabelle 28:	Simulationsergebnisse PPD (mit sommerlichen Wärmeschutz) – Nord-Raum.....	80
Tabelle 29:	Vor- und Nachteile einer Luftgeführten Bauteilaktivierung.....	103
Tabelle 30:	Vor- und Nachteile einer wassergeführten Bauteilaktivierung.....	103
Tabelle 31:	Bewertungsmatrix zur Wahl des Wärmeüberträgermediums.....	104
Tabelle 32:	Materialfeuchtemessung nach Ende des Heizbetriebes an Prototyp A.....	129
Tabelle 33:	Außenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1	174
Tabelle 34:	Innenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1.....	174
Tabelle 35:	Deckenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1	174
Tabelle 36:	Fußbodenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1.....	175
Tabelle 37:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1 ...	175
Tabelle 38:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1.....	175
Tabelle 39:	Außenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2	176
Tabelle 40:	Innenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2.....	176
Tabelle 41:	Deckenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2.....	176
Tabelle 42:	Fußbodenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2.....	176
Tabelle 43:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2 ...	177
Tabelle 44:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2.....	177
Tabelle 45:	Außenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 1	177
Tabelle 46:	Innenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 1	178

Tabelle 47:	Deckenaufbau – Ziegel-Bauweise 1.....	178
Tabelle 48:	Fußbodenaufbau – Ziegel-Bauweise 1	178
Tabelle 49:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 1.....	179
Tabelle 50:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 1	179
Tabelle 51:	Außenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 2	179
Tabelle 52:	Innenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 2	180
Tabelle 53:	Deckenaufbau – Ziegel-Bauweise 2.....	180
Tabelle 54:	Fußbodenaufbau – Ziegel-Bauweise 2	180
Tabelle 55:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 2.....	181
Tabelle 56:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 2	181
Tabelle 57:	Außenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 3	181
Tabelle 58:	Innenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 3	182
Tabelle 59:	Deckenaufbau – Ziegel-Bauweise 3.....	182
Tabelle 60:	Fußbodenaufbau – Ziegel-Bauweise 3	182
Tabelle 61:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 3.....	183
Tabelle 62:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 3	183
Tabelle 63:	Außenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 1	183
Tabelle 64:	Innenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 1.....	184
Tabelle 65:	Deckenaufbau – Porenbeton-Bauweise 1	184
Tabelle 66:	Fußbodenaufbau – Porenbeton-Bauweise 1.....	184
Tabelle 67:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 1	185
Tabelle 68:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 1.....	185
Tabelle 69:	Außenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 2	185
Tabelle 70:	Innenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 2.....	186
Tabelle 71:	Deckenaufbau – Porenbeton-Bauweise 2	186
Tabelle 72:	Fußbodenaufbau – Porenbeton-Bauweise 2.....	186
Tabelle 73:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 2	187
Tabelle 74:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 2.....	187
Tabelle 75:	Außenwandaufbau – Leichtbauweise	187
Tabelle 76:	Innenwandaufbau – Leichtbauweise.....	188
Tabelle 77:	Deckenaufbau – Leichtbauweise.....	188
Tabelle 78:	Fußbodenaufbau – Leichtbauweise	188
Tabelle 79:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Leichtbauweise	189
Tabelle 80:	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Leichtbauweise	189

14 Anhänge

Anhang 1: Entwurfszeichnungen zu den Versuchskuben

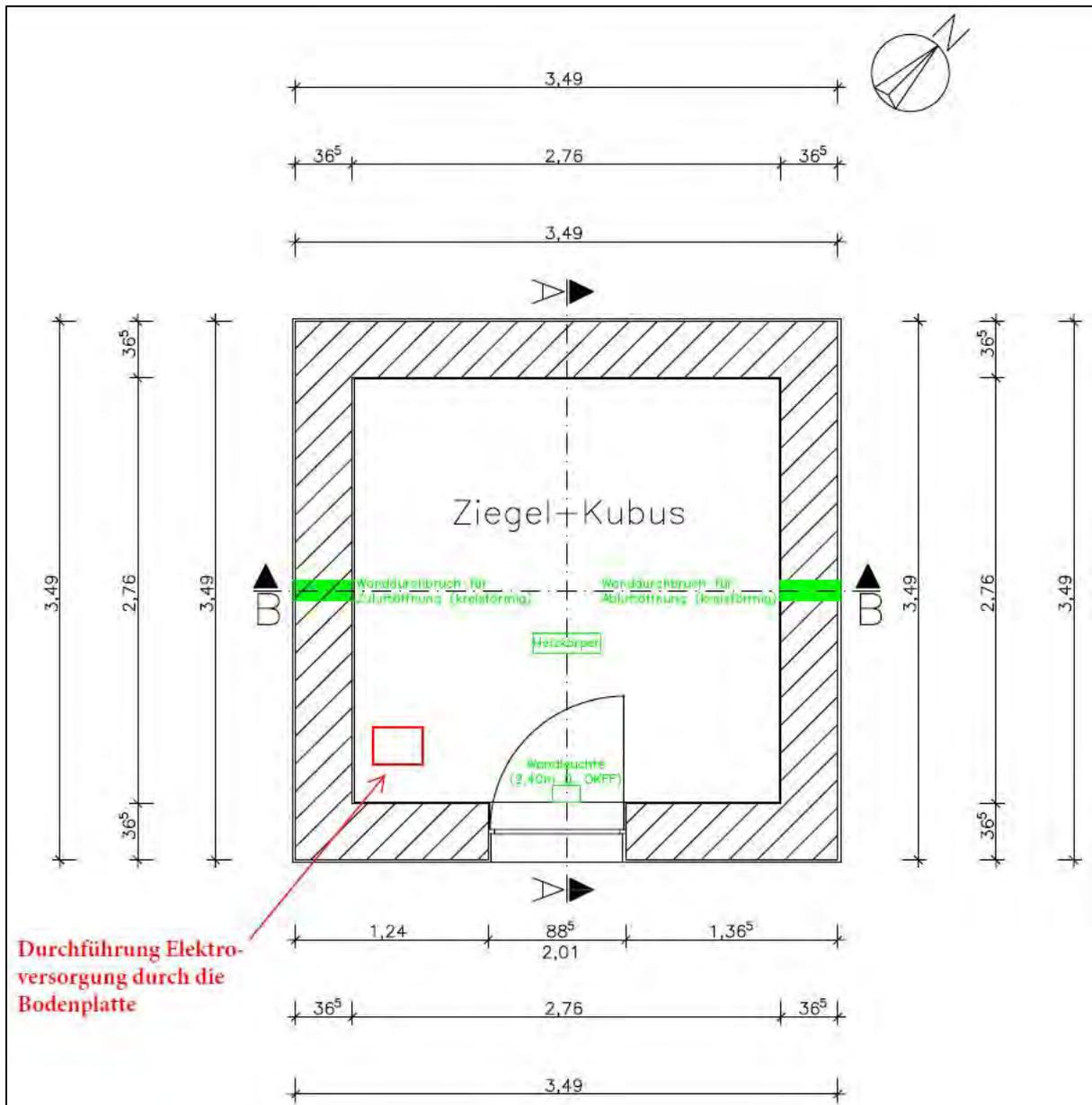


Abbildung 175: Grundriss Ziegel-Kubus

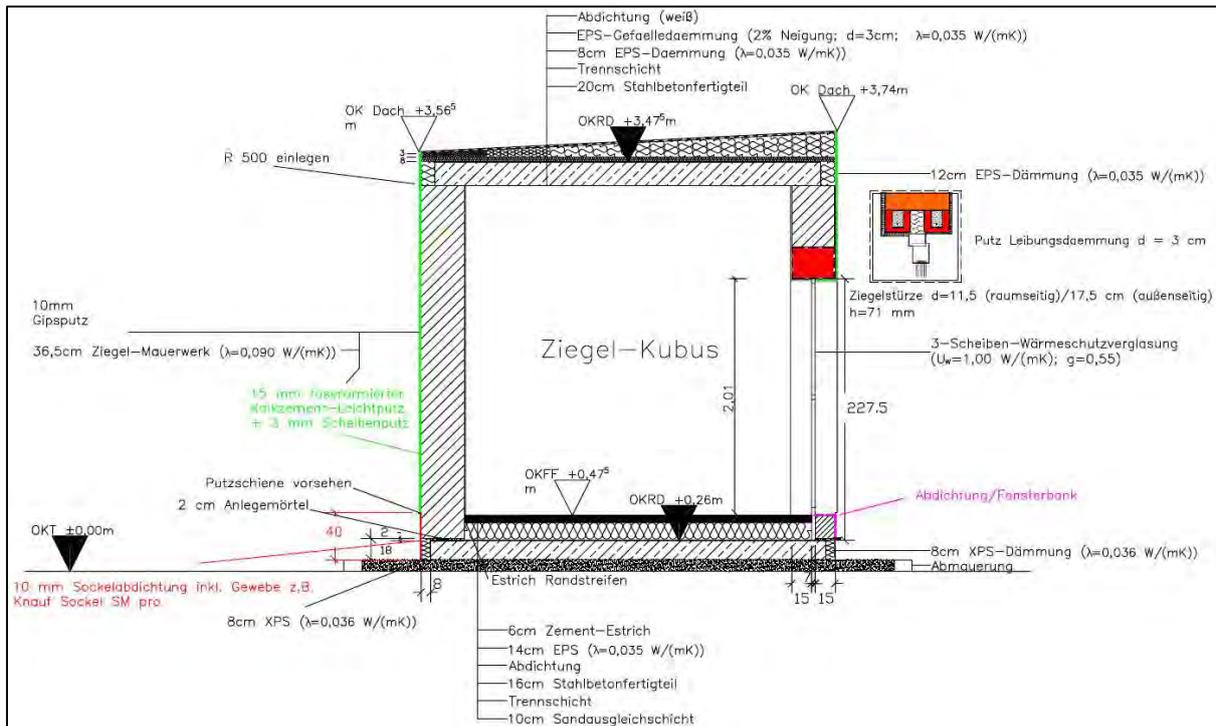


Abbildung 176: Schnitt A Ziegel-Kubus

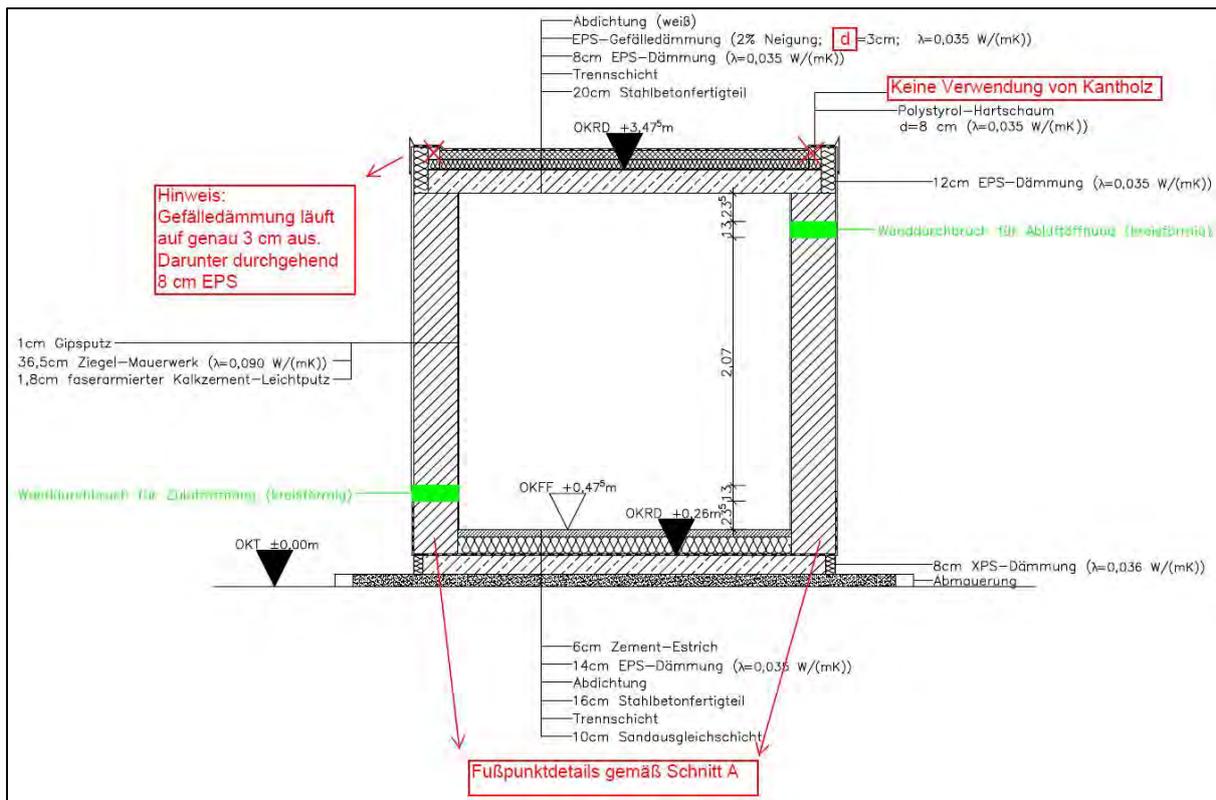


Abbildung 177: Schnitt B Ziegel-Kubus

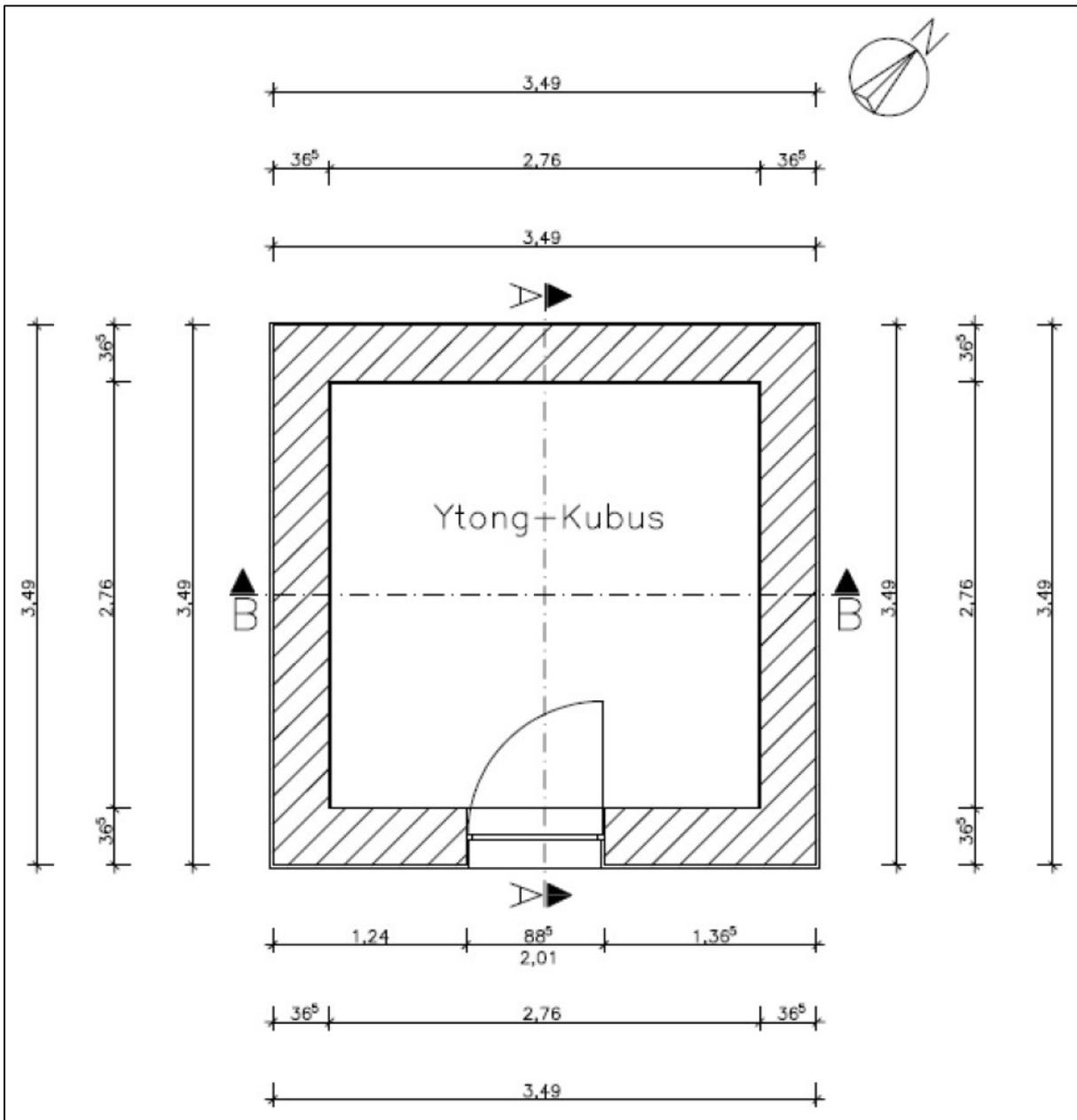


Abbildung 178: Grundriss Porenbeton-Kubus

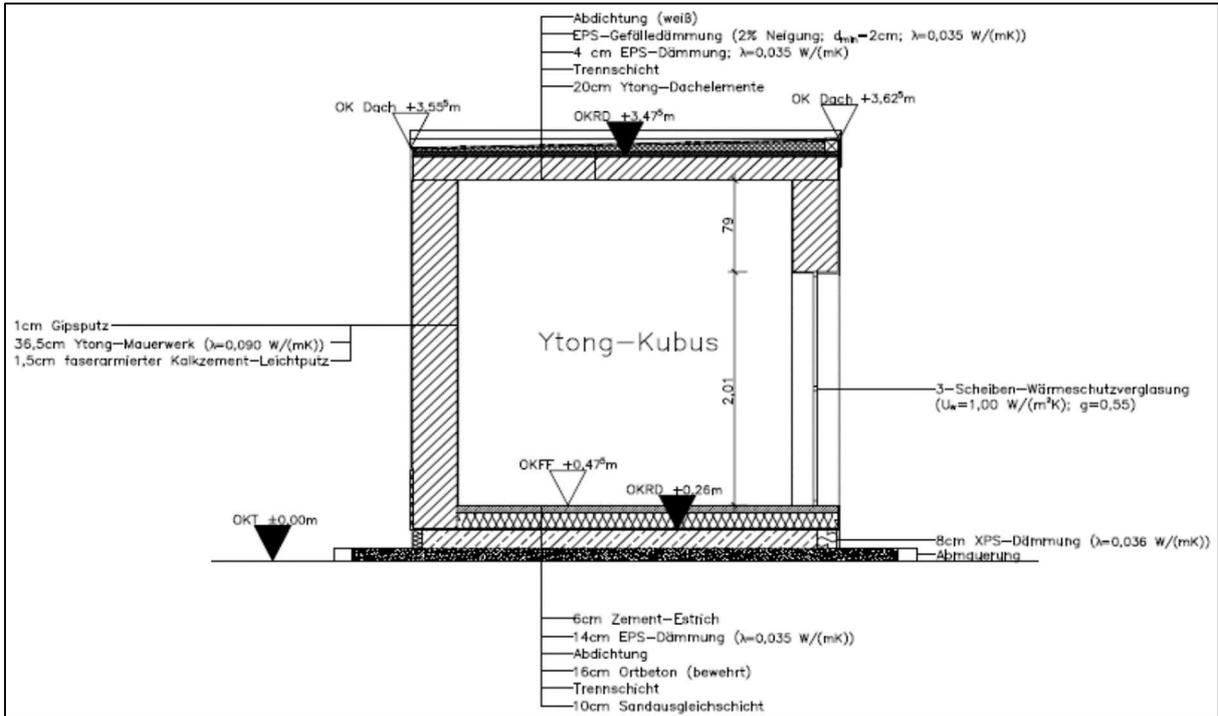


Abbildung 179: Schnitt A Porenbeton-Kubus

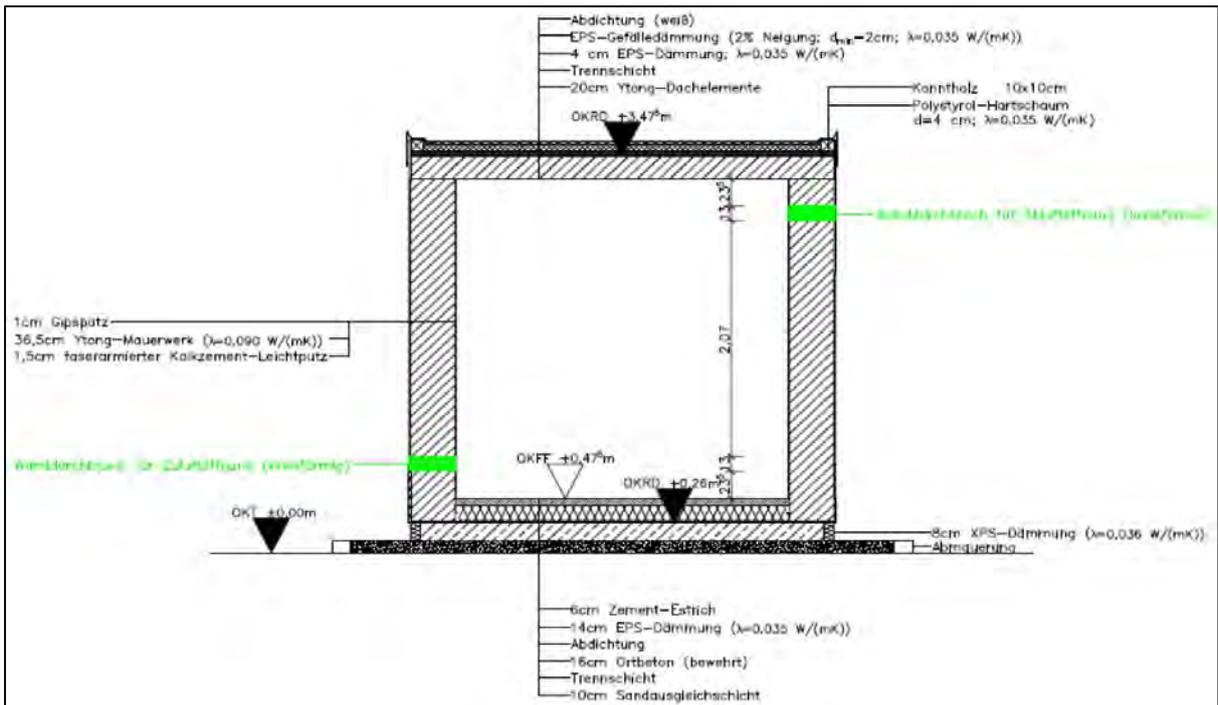


Abbildung 180: Schnitt B Porenbeton-Kubus

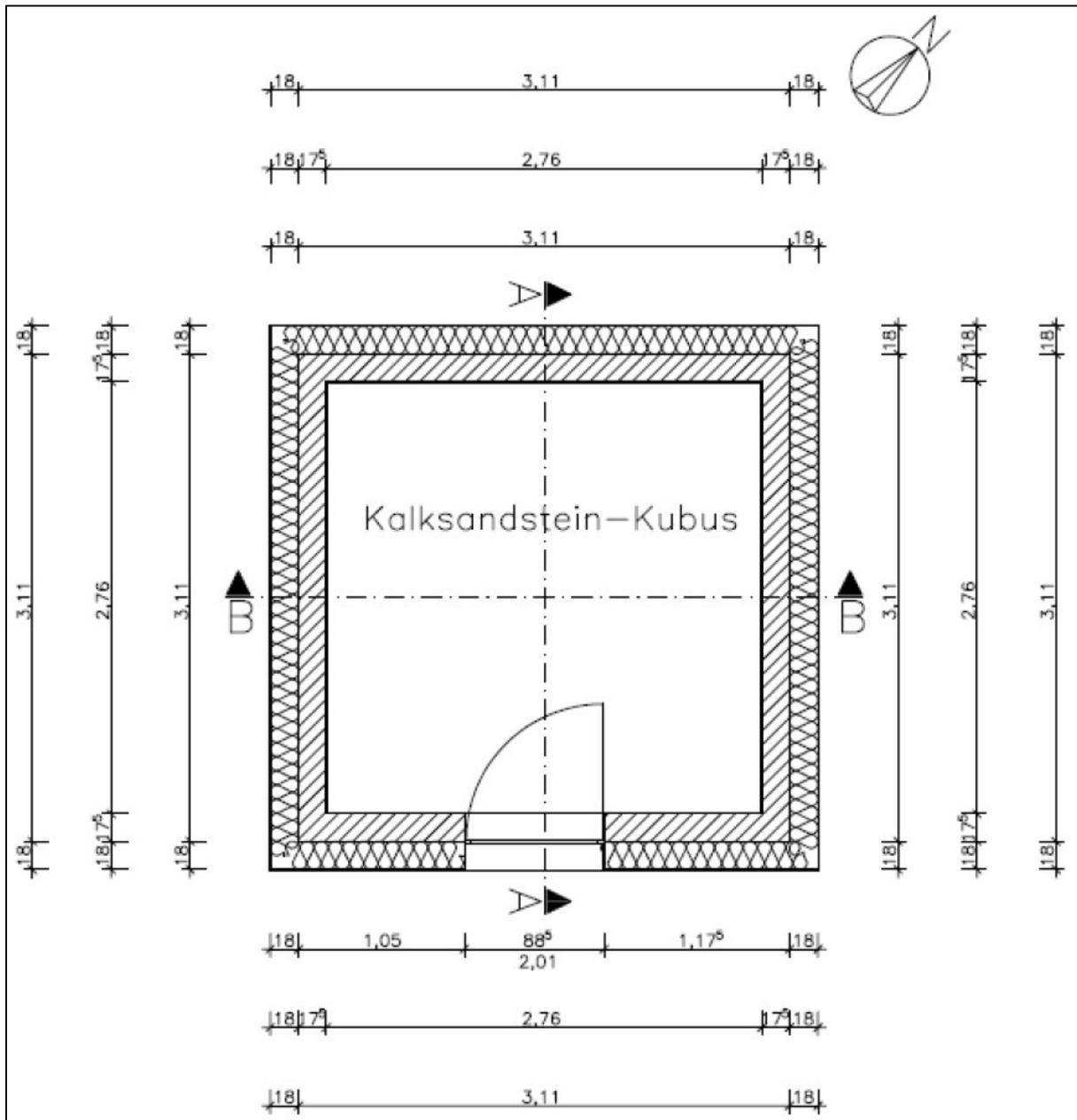


Abbildung 181: Grundriss Kalksandstein-Kubus

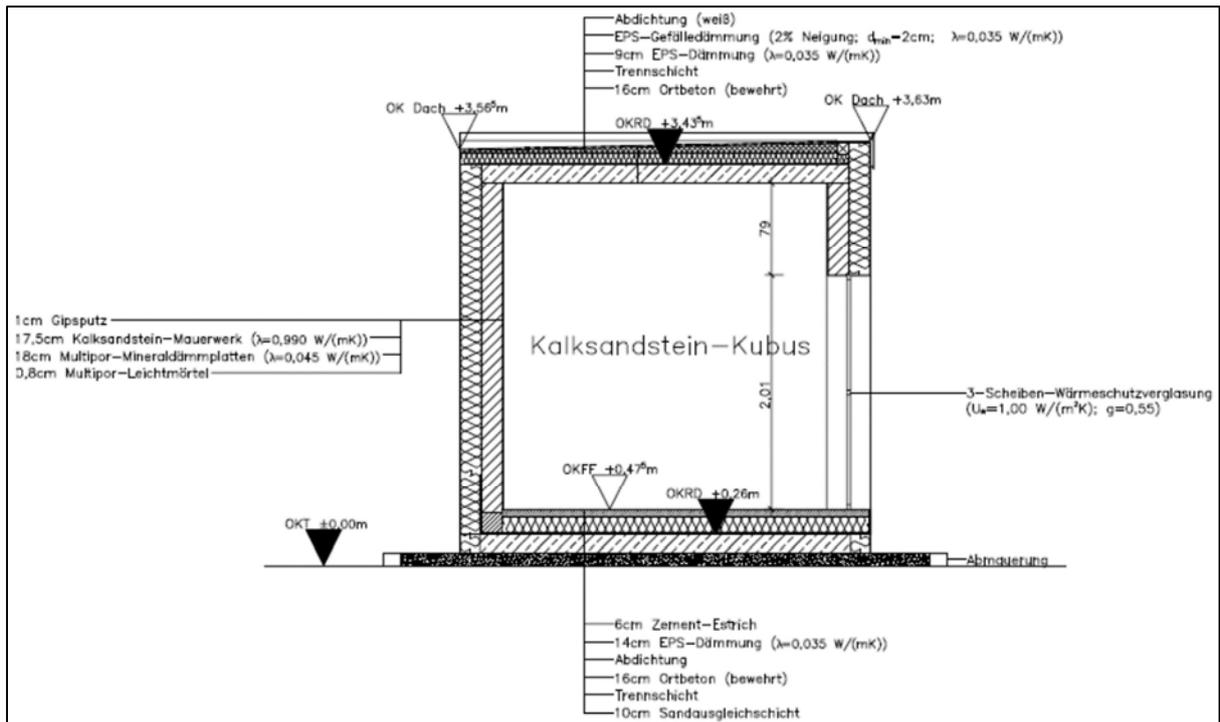


Abbildung 182: Schnitt A Kalksandstein-Kubus

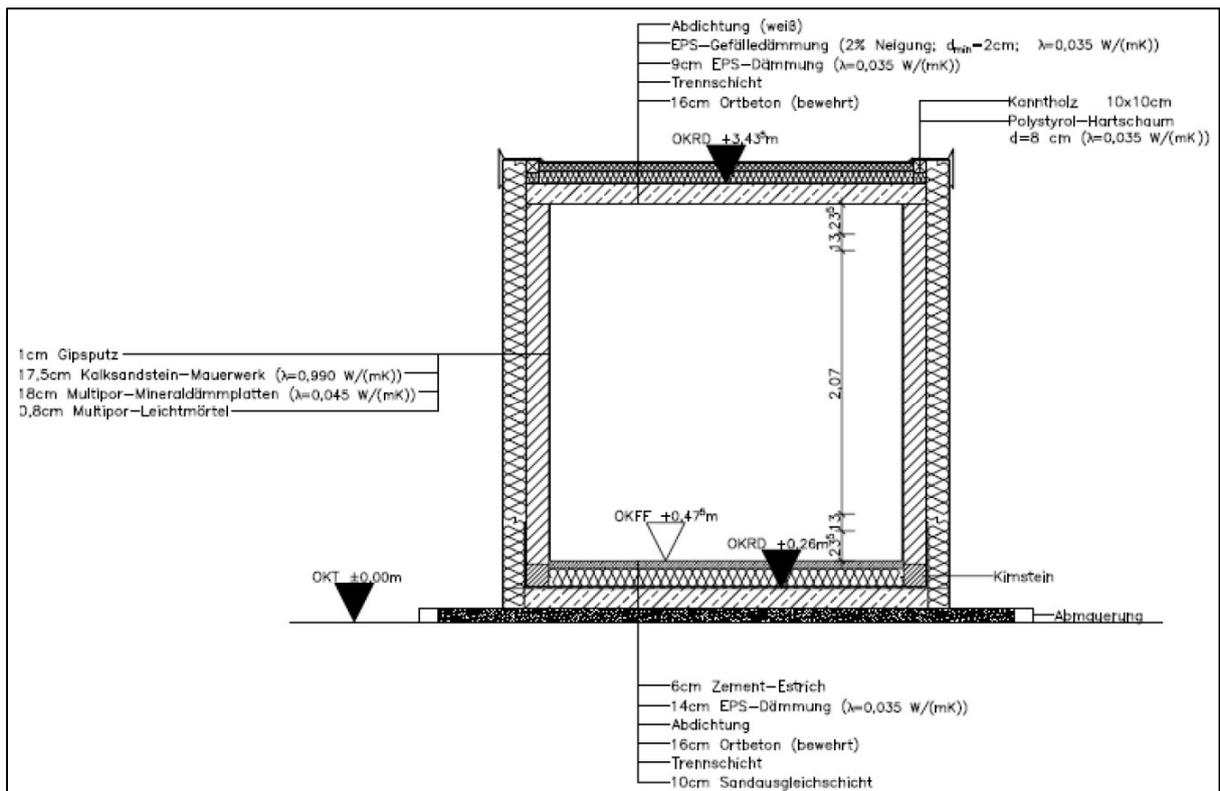


Abbildung 183: Schnitt B Kalksandstein-Kubus

Anhang 2: Detailinfos zur technischen Gebäudeausrüstung

Heizung

- 1x Rippenrohrheizkörper RRH 1000 der Firma Kraemer&Kraus
- Leistung: 1000 W
- gekoppelt mit der Regelungsbox
- Leistung und daraus resultierend die Temperatur wird geregelt auf Basis eines Pt100-Temperaturfühlers (raummittig im Behaglichkeitsmessstand in Höhe von 0,60 m platziert; verkauft durch TinkerForge)
- Lage: mittig zwischen geöffneter Fenstertür und Behaglichkeitsmessstand

Lüftung

- 2x kreisförmiger Wanddurchbruch DN 130
- Wanddurchbruch Zuluft: 0,235 m oberhalb OKFF in Süd-West-Wand; versehen mit raumseitig auskragendem 1 m KG-Rohr DN 125
- Zuluft-Rohr außenseitig mit nach unten gebogenem KG-Formstück DN 125 versehen
- Zuluft-Rohr raumseitig über nach oben gebogenem KG-Formstück DN 125 und Gummi-Rohrverbinder mit Wickelfalzrohr DN 125 verbunden
- Wickelfalzrohr versehen mit Absperrklappe
- Absperrklappe verbunden mit Klappenantrieb Belimo LM230ASR
- Wanddurchbruch Abluft: 0,235 m unterhalb UKD in Nord-Ost-Wand; außenseitig versehen mit Ventilator DN 100 der Luft aus Kubus herausaugt
- Außenwand-Ventilator mit Hilfe von Kompriband mit KG-Rohr DN 125 verbunden
- KG-Rohr raumseitig über Gummi-Rohrverbinder mit Wickelfalzrohr DN 125 verbunden
- Wickelfalzrohr versehen mit Absperrklappe
- Absperrklappe verbunden mit Klappenantrieb Belimo LM230ASR
- Regelung: raumseitig auskragendes Zuluftrohr versehen mit Thermoanemometer (Ahlborn FVAD35TH5) u.a. zur Messung der Luftgeschwindigkeit; Thermoanemometer über Messwerterfassungsanlage verbunden mit Regelungsbox; Außenwand-Ventilator verbunden mit Regelungsbox; Absperrklappen verbunden mit Regelungsbox; Regelungsbox steuert mit Hilfe von Luftgeschwindigkeitsmessdaten Außenwand-Ventilator (aus und an) und Absperrklappen (geschlossen bis 90° geöffnet möglich) und reguliert somit den Luftwechsel im Kubus

Beleuchtung

- Leuchtmittel: 1x LED-Lampe (matt) von Philips
- Leistung: 11 W (entspricht ca. 75-W-Glühlampe)
- Lichtstrom: 1055 lm
- Lichtfarbe: 2700 K (warmweiß)
- Fassung: E27
- Hülle: ovaler Metallkorb mit Glas
- Regelung: händisch über Lichtschalter
- Lage: mittig oberhalb der Fenstertür

Anhang 3: Entwurfszeichnungen zur Lage der Bauteil-Tempersensoren

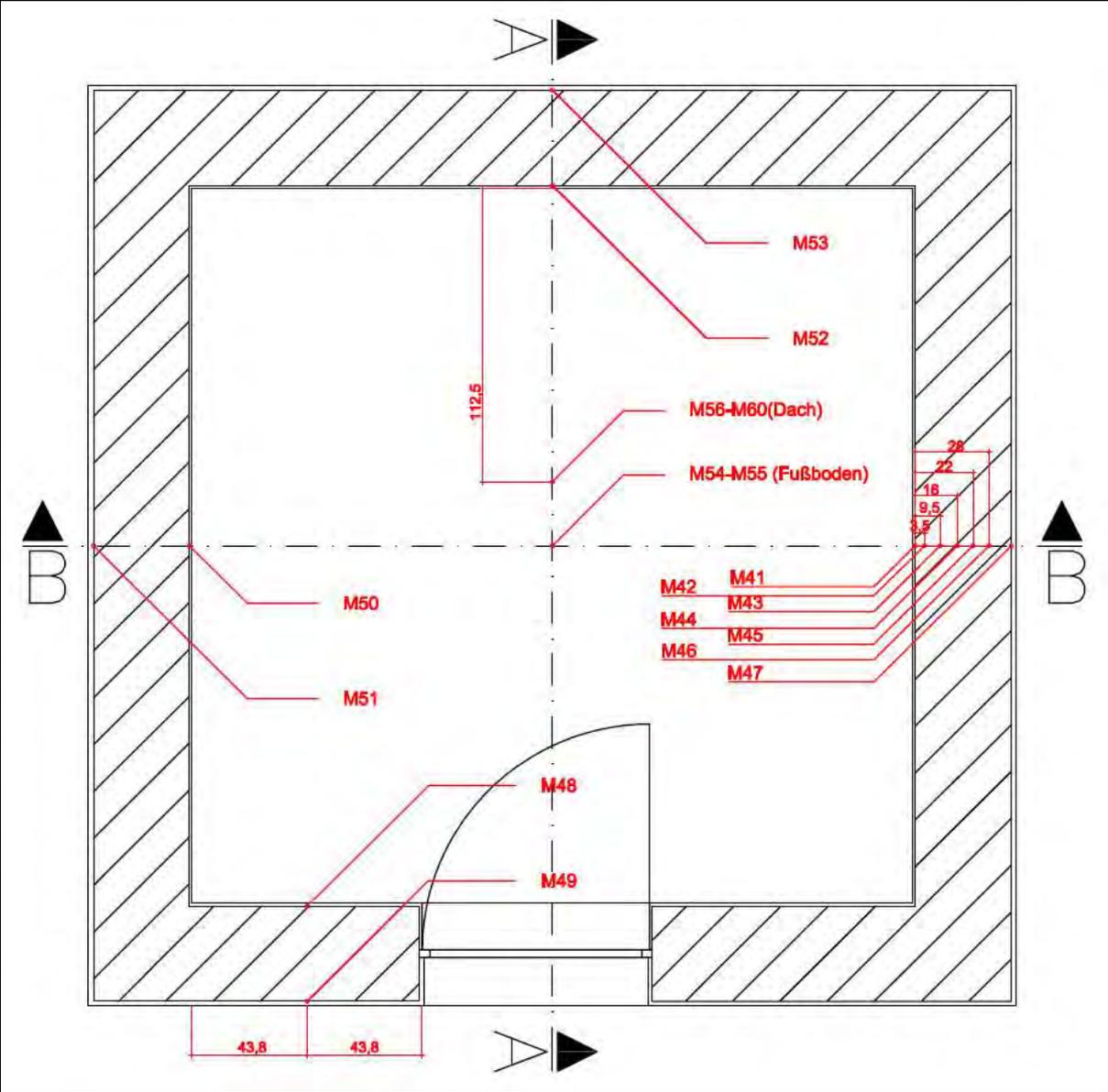


Abbildung 184: Grundriss Ziegel-Kubus – Lage Bauteil-Tempersensoren

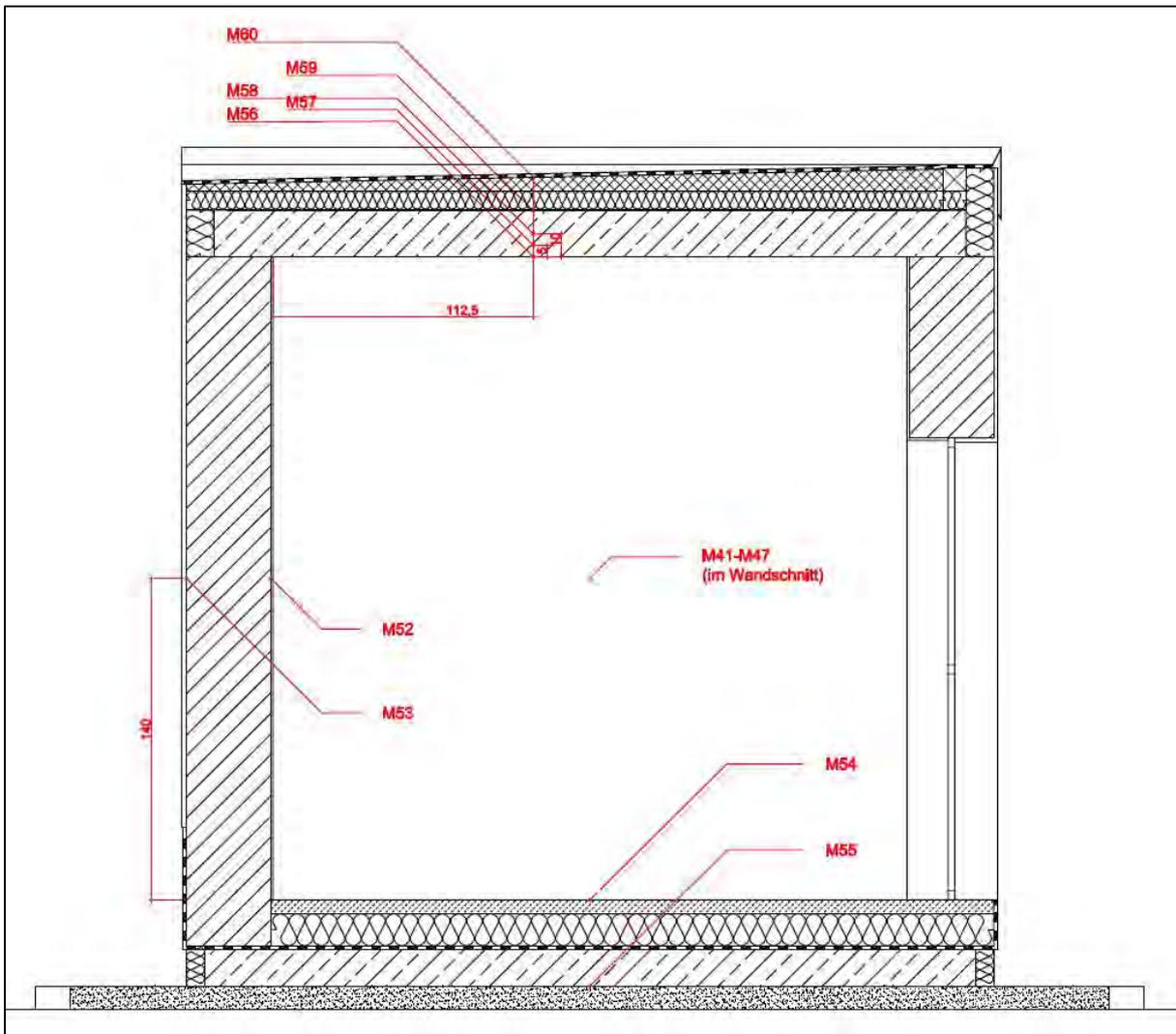


Abbildung 185: Schnitt A Ziegel-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren

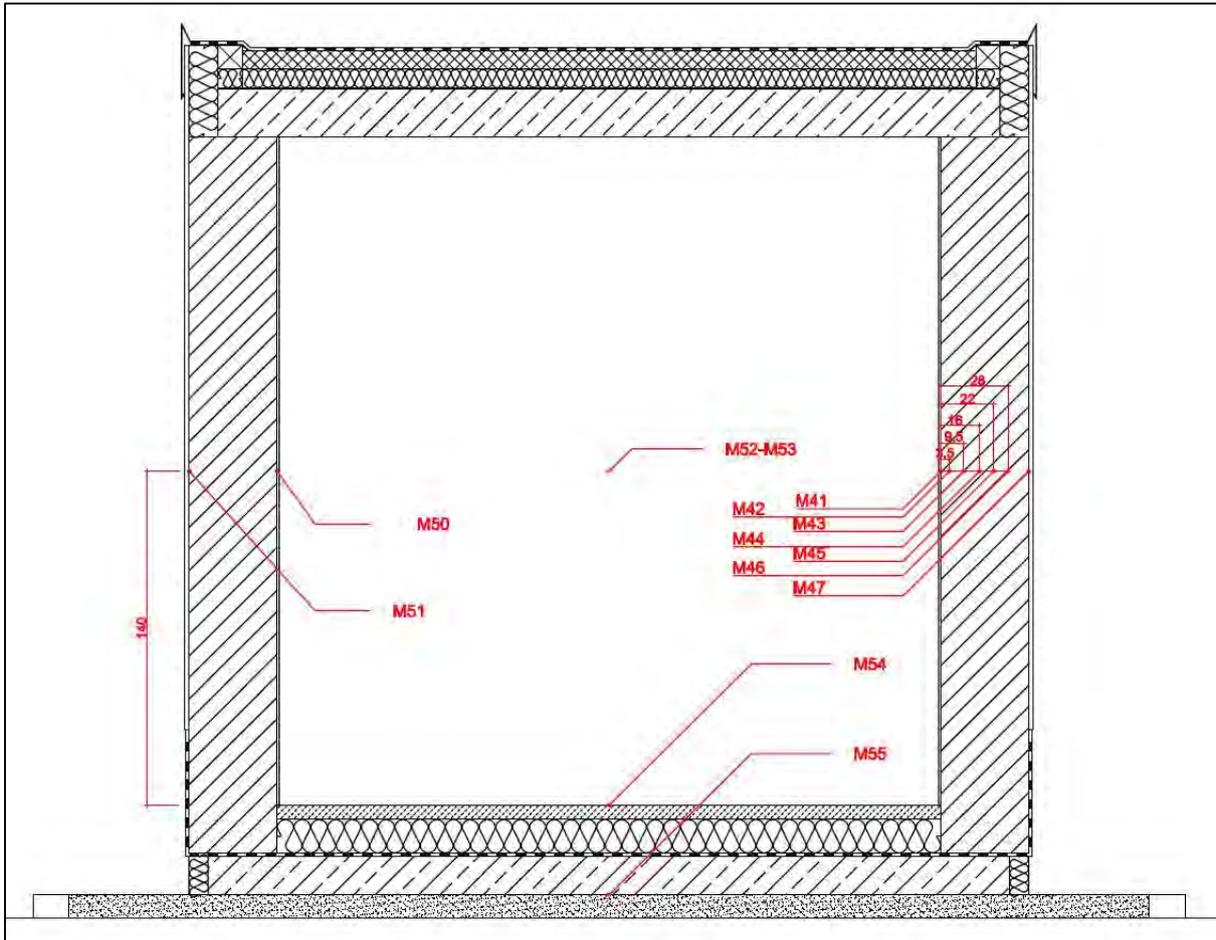


Abbildung 186: Schnitt B Ziegel-Kubus – Lage Bauteil-Temperatur Sensoren

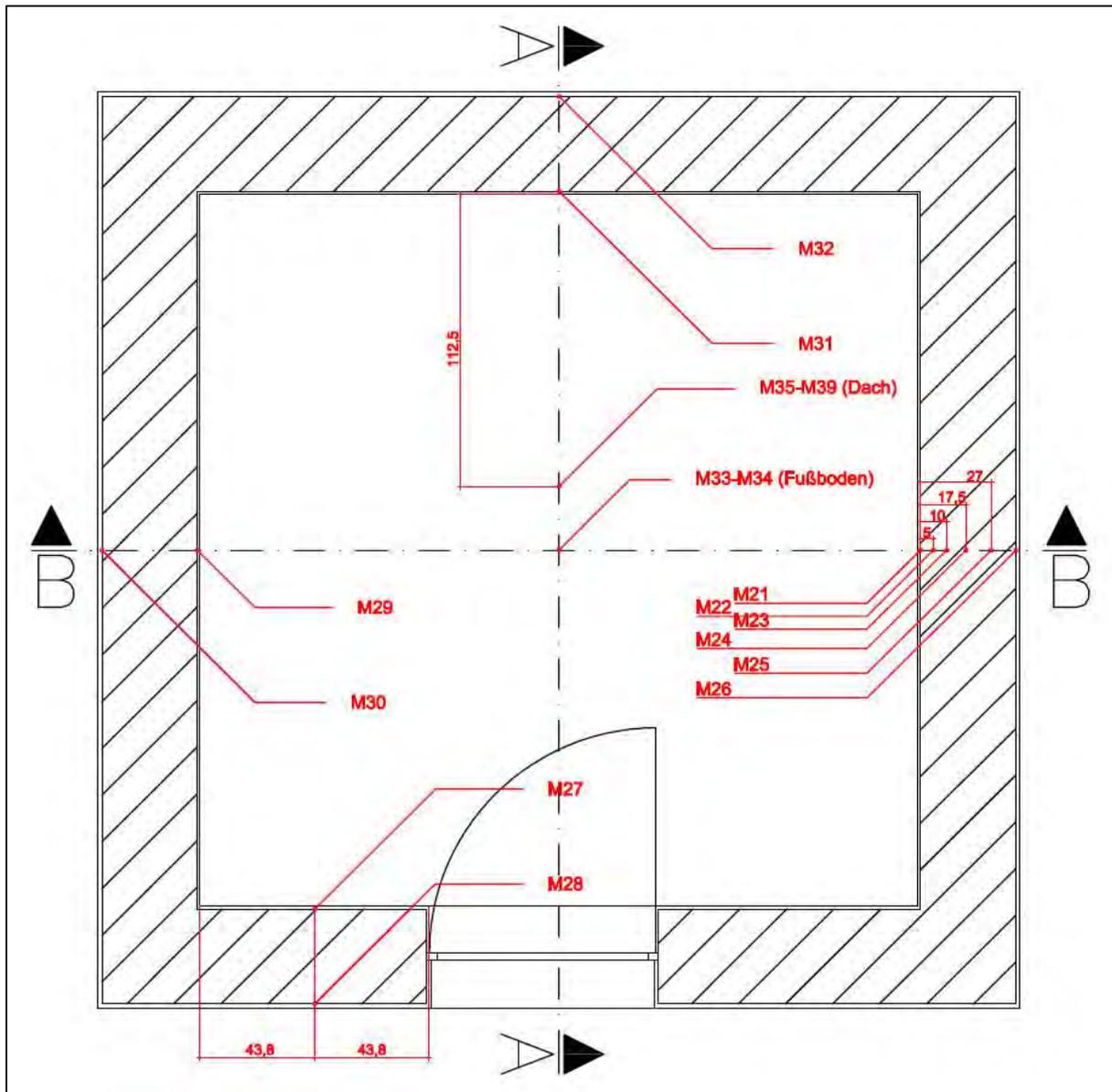


Abbildung 187: Grundriss Porenbeton-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren

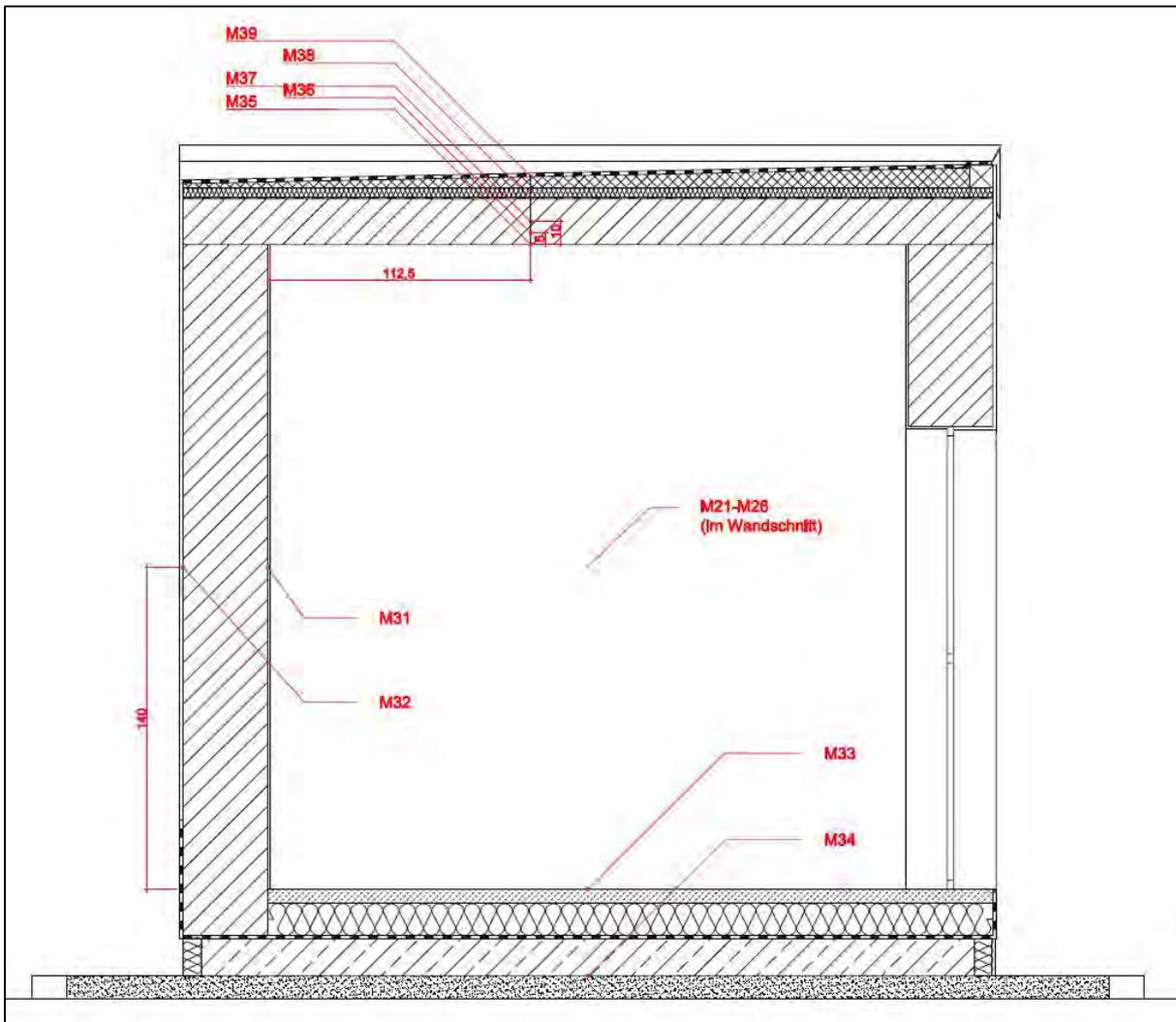


Abbildung 188: Schnitt A Porenbeton-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren

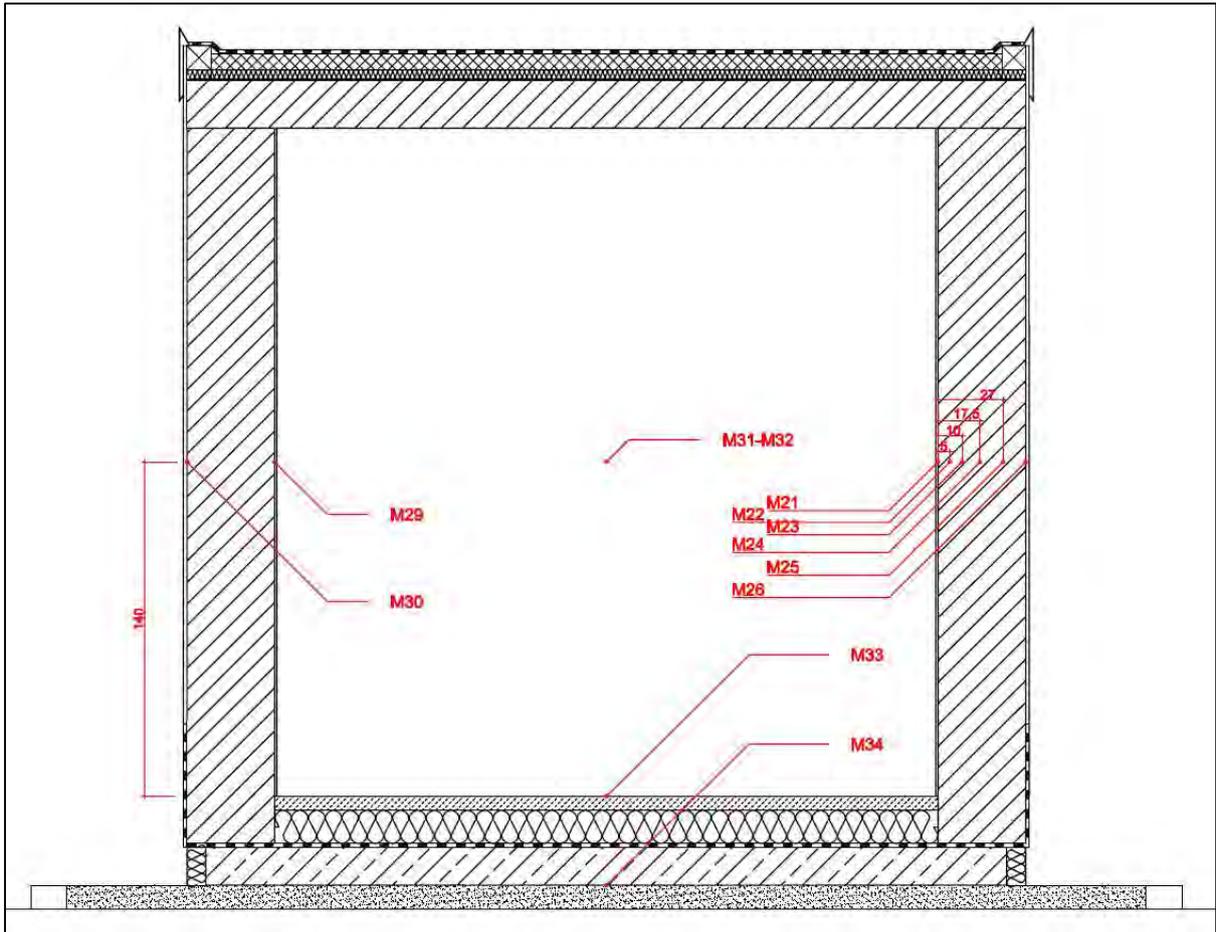


Abbildung 189: Schnitt B Porenbeton-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren

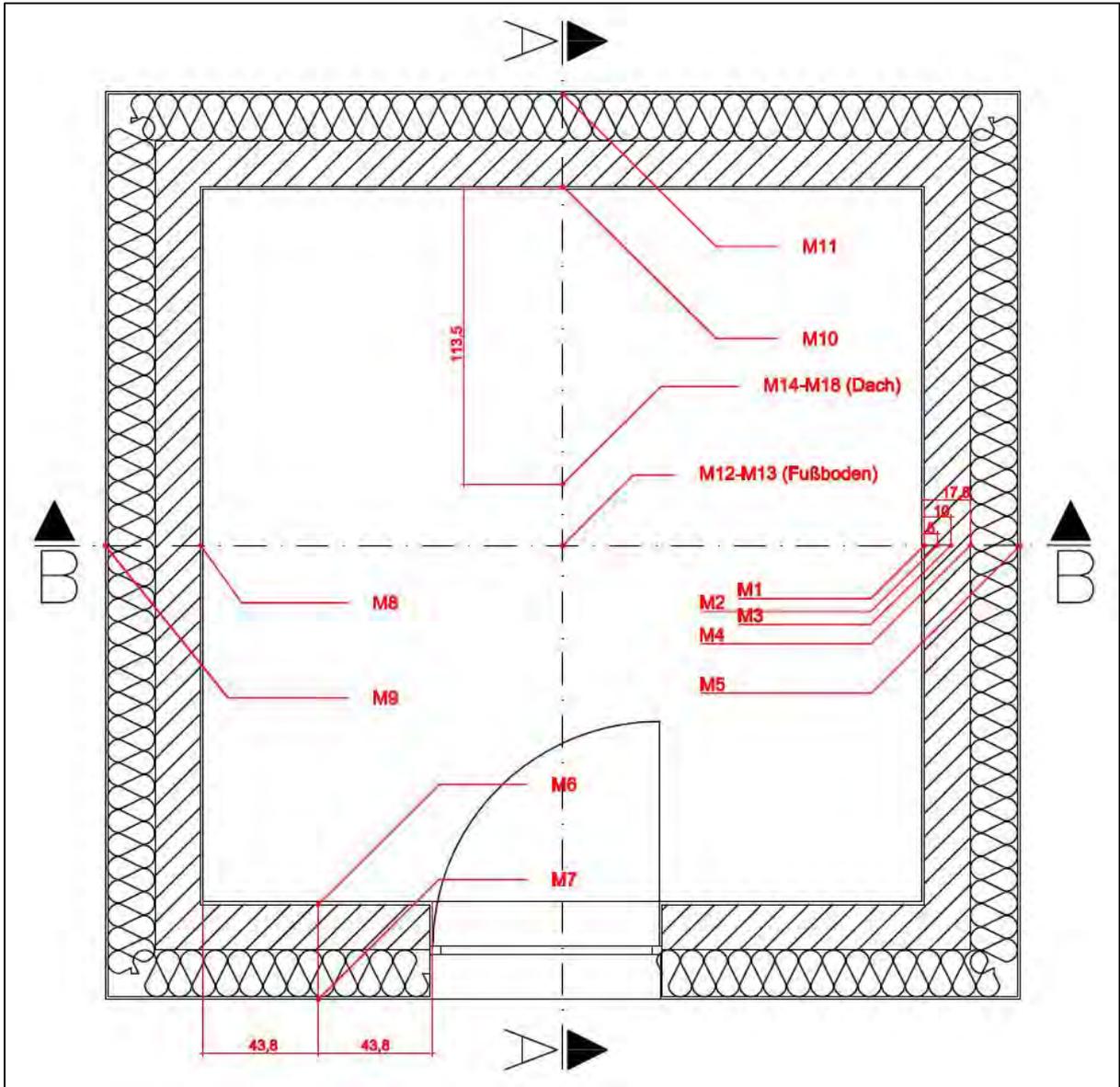


Abbildung 190: Grundriss Kalksandstein-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren

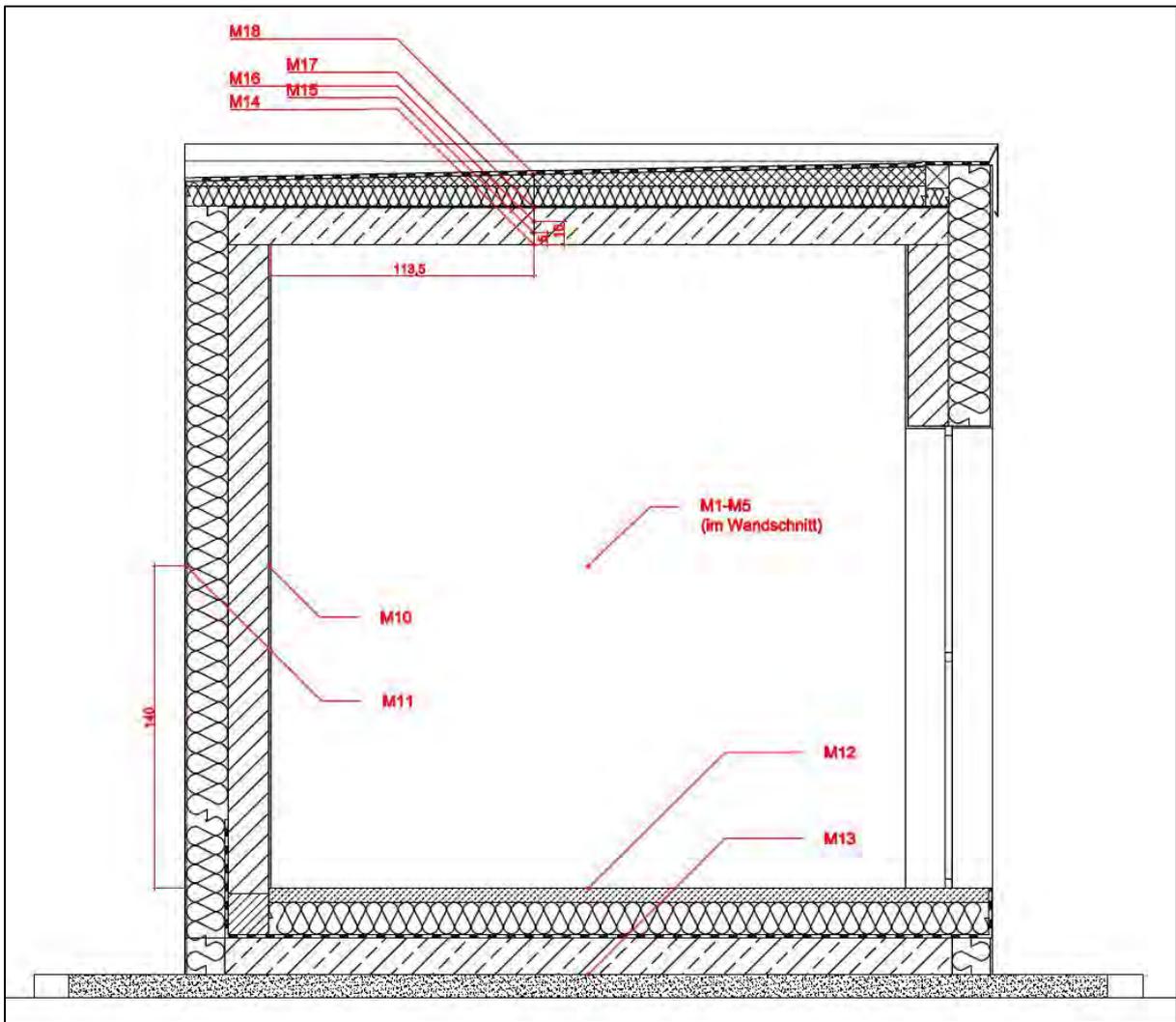


Abbildung 191: Schnitt A Kalksandstein-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren

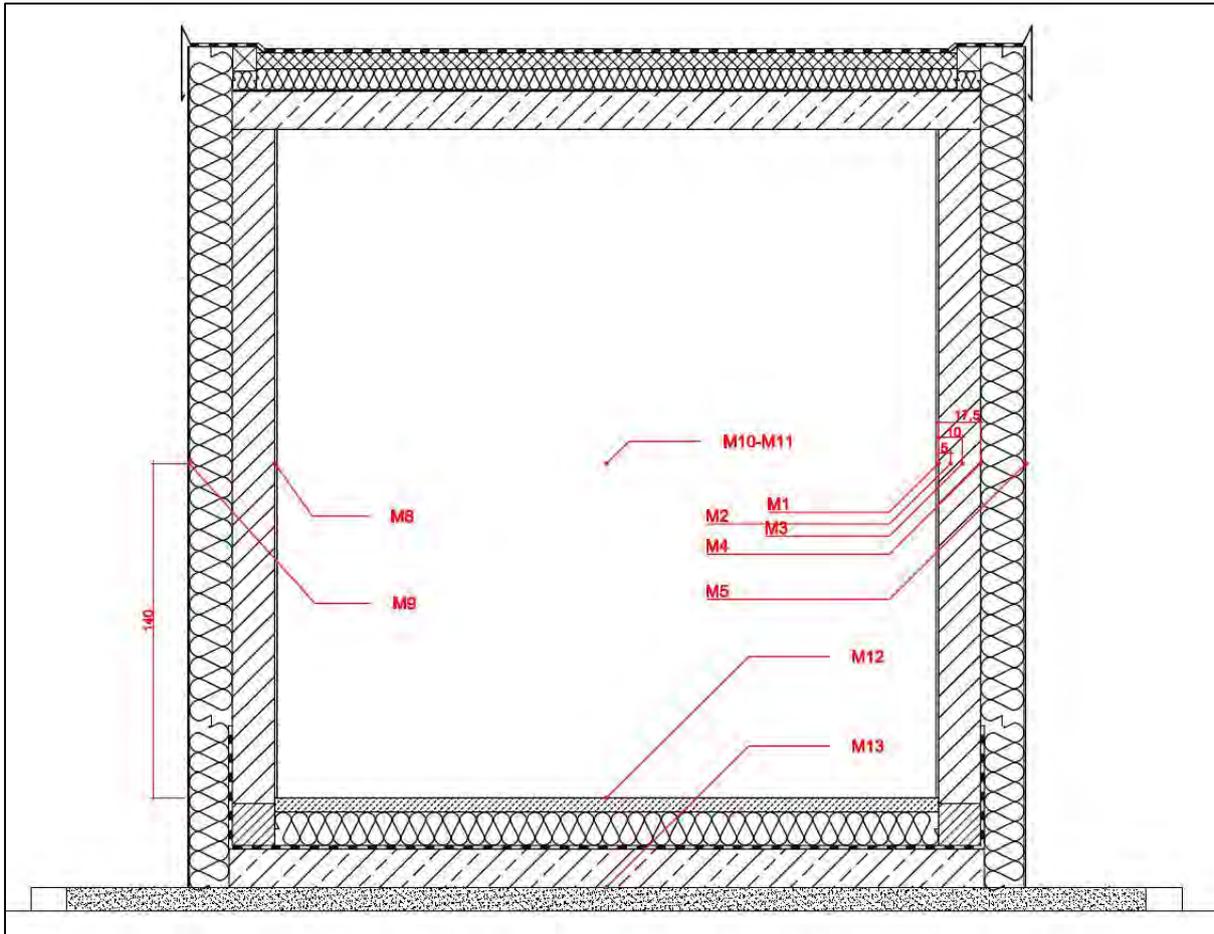


Abbildung 192: Schnitt B Kalksandstein-Kubus – Lage Bauteil-Temperatursensoren

Anhang 4: Untersuchte Bauteilaufbauten des Modellgebäudes

Tabelle 33: Außenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Kalksandstein	0,175	1,300	2200	1000
	3	Dämmung	0,180	0,045	-	1300
	4	Außenputz	0,008	0,470	1400	1000
d = 0,373 m			U = 0,23 W/(m²K)		C_{wirk} = 59 Wh/(m²K)	

Tabelle 34: Innenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Kalksandstein	0,175	1,300	2200	1000
	3	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
d = 0,195 m			U = 2,36 W/(m²K)		C_{wirk} = 57 Wh/(m²K)	

Tabelle 35: Deckenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 64 Wh/(m²K)	

Tabelle 36: Fußbodenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
↑ unten / oben ↓	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 33 Wh/(m²K)	

Tabelle 37: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	58,9	512
Außenwand W	10,93	58,9	644
Innenwand N	8,00	57,4	459
Innenwand O	16,27	57,4	933
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 5079 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 195 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 38: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	58,9	337
Innenwand O	7,38	57,4	423
Innenwand S	7,22	57,4	414
Innenwand W	7,38	57,4	423
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2657 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 244 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 39: Außenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Kalksandstein	0,175	0,990	1800	1000
	3	Dämmung	0,180	0,045	-	1300
	4	Außenputz	0,008	0,470	1400	1000
d = 0,373 m			U = 0,23 W/(m²K)		C_{wirk} = 49 Wh/(m²K)	

Tabelle 40: Innenwandaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Kalksandstein	0,175	0,990	1800	1000
	3	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
d = 0,195 m			U = 2,15 W/(m²K)		C_{wirk} = 48 Wh/(m²K)	

Tabelle 41: Deckenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 64 Wh/(m²K)	

Tabelle 42: Fußbodenaufbau – Kalksandstein-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 33 Wh/(m²K)	

Tabelle 43: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C' _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	48,9	425
Außenwand W	10,93	48,9	534
Innenwand N	8,00	47,6	381
Innenwand O	16,27	47,6	775
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 4647 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 178 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 44: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Kalksandstein-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C' _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	48,9	280
Innenwand O	7,38	47,6	352
Innenwand S	7,22	47,6	344
Innenwand W	7,38	47,6	352
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2386 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 219 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 45: Außenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Ziegel	0,365	0,090	700	1000
	3	Außenputz	0,018	0,250	1000	1000

$$d = 0,393 \text{ m}$$

$$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$C'_{\text{wirk}} = 21 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 46: Innenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Ziegel	0,175	0,680	1600	1000
	3	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
d = 0,195 m			U = 1,83 W/(m²K)		C_{wirk} = 43 Wh/(m²K)	

Tabelle 47: Deckenaufbau – Ziegel-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 64 Wh/(m²K)	

Tabelle 48: Fußbodenaufbau – Ziegel-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 33 Wh/(m²K)	

Tabelle 49: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C' _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	21,4	186
Außenwand W	10,93	21,4	234
Innenwand N	8,00	42,8	342
Innenwand O	16,27	42,8	696
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 3989 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 153 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 50: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C' _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	21,4	123
Innenwand O	7,38	42,8	316
Innenwand S	7,22	42,8	309
Innenwand W	7,38	42,8	316
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2122 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 195 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 51: Außenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Ziegel	0,365	0,090	700	1000
	3	Außenputz	0,018	0,250	1000	1000

$$d = 0,393 \text{ m}$$

$$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$C'_{\text{wirk}} = 21 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 52: Innenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Ziegel	0,175	0,410	850	1000
	3	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
d = 0,195 m			U = 1,40 W/(m²K)		C_{wirk} = 25 Wh/(m²K)	

Tabelle 53: Deckenaufbau – Ziegel-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 64 Wh/(m²K)	

Tabelle 54: Fußbodenaufbau – Ziegel-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 33 Wh/(m²K)	

Tabelle 55: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	21,4	186
Außenwand W	10,93	21,4	234
Innenwand N	8,00	24,6	196
Innenwand O	16,27	24,6	399
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 3547 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 136 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 56: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	21,4	123
Innenwand O	7,38	24,6	181
Innenwand S	7,22	24,6	177
Innenwand W	7,38	24,6	181
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1721 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 158 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 57: Außenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 3

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
↑ innen / außen ↓	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Ziegel	0,365	0,090	700	1000
	3	Außenputz	0,018	0,250	1000	1000

$$d = 0,393 \text{ m}$$

$$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$C'_{\text{wirk}} = 21 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 58: Innenwandaufbau – Ziegel-Bauweise 3

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Ziegel	0,175	0,410	850	1000
	3	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
d = 0,195 m			U = 1,40 W/(m²K)		C_{wirk} = 25 Wh/(m²K)	

Tabelle 59: Deckenaufbau – Ziegel-Bauweise 3

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Ziegel	0,210	0,580	850	1000
d = 0,300 m			U = 0,79 W/(m²K)		C_{wirk} = 24 Wh/(m²K)	

Tabelle 60: Fußbodenaufbau – Ziegel-Bauweise 3

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Ziegel	0,210	0,580	850	1000
d = 0,300 m			U = 0,79 W/(m²K)		C_{wirk} = 33 Wh/(m²K)	

Tabelle 61: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Ziegel-Bauweise 3

Bauteil	Fläche [m ²]	C' _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	21,4	186
Außenwand W	10,93	21,4	234
Innenwand N	8,00	24,6	196
Innenwand O	16,27	24,6	399
Decke	26,04	23,6	615
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 2498 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 96 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 62: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Ziegel-Bauweise 3

Bauteil	Fläche [m ²]	C' _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	21,4	123
Innenwand O	7,38	24,6	181
Innenwand S	7,22	24,6	177
Innenwand W	7,38	24,6	181
Decke	10,89	23,6	257
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1282 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 118 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 63: Außenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Porenbeton	0,365	0,090	325	1000
	3	Außenputz	0,018	0,250	1000	1000

$$d = 0,393 \text{ m}$$

$$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$C'_{\text{wirk}} = 12 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 64: Innenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Porenbeton	0,175	0,180	650	1000
	3	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
d = 0,195 m			U = 0,79 W/(m²K)		C_{wirk} = 20 Wh/(m²K)	

Tabelle 65: Deckenaufbau – Porenbeton-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 64 Wh/(m²K)	

Tabelle 66: Fußbodenaufbau – Porenbeton-Bauweise 1

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,045	-	1450
	3	Stahlbeton	0,200	2,300	2300	1000
d = 0,290 m			U = 1,00 W/(m²K)		C_{wirk} = 33 Wh/(m²K)	

Tabelle 67: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C' wirk [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	12,0	104
Außenwand W	10,93	12,0	131
Innenwand N	8,00	19,7	158
Innenwand O	16,27	19,7	320
Decke	26,04	63,9	1664
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 3245 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 125 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 68: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 1

Bauteil	Fläche [m ²]	C' wirk [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	12,0	69
Innenwand O	7,38	19,7	145
Innenwand S	7,22	19,7	142
Innenwand W	7,38	19,7	145
Decke	10,89	63,9	696
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1560 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 143 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 69: Außenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
↑ innen / außen ↓	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Porenbeton	0,365	0,090	325	1000
	3	Außenputz	0,018	0,250	1000	1000

$$d = 0,393 \text{ m}$$

$$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$C'_{\text{wirk}} = 12 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 70: Innenwandaufbau – Porenbeton-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
	2	Porenbeton	0,175	0,180	650	1000
	3	Innenputz	0,010	0,700	1400	1000
d = 0,195 m			U = 0,79 W/(m²K)		C_{wirk} = 20 Wh/(m²K)	

Tabelle 71: Deckenaufbau – Porenbeton-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,040	-	1450
	3	Porenbeton	0,200	0,140	550	1000
d = 0,290 m			U = 0,41 W/(m²K)		C_{wirk} = 15 Wh/(m²K)	

Tabelle 72: Fußbodenaufbau – Porenbeton-Bauweise 2

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Estrich	0,060	1,400	2000	1000
	2	Dämmung	0,030	0,040	-	1450
	3	Porenbeton	0,200	0,140	550	1000
d = 0,290 m			U = 0,41 W/(m²K)		C_{wirk} = 33 Wh/(m²K)	

Tabelle 73: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Porenbeton-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	12,0	104
Außenwand W	10,93	12,0	131
Innenwand N	8,00	19,7	158
Innenwand O	16,27	19,7	320
Decke	26,04	15,3	398
Fußboden	26,04	33,3	868
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1979 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 76 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 74: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Porenbeton-Bauweise 2

Bauteil	Fläche [m ²]	C _{wirk} [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	12,0	69
Innenwand O	7,38	19,7	145
Innenwand S	7,22	19,7	142
Innenwand W	7,38	19,7	145
Decke	10,89	15,3	166
Fußboden	10,89	33,3	363
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1031 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 95 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 75: Außenwandaufbau – Leichtbauweise

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	Gipsfaserplatte	0,013	0,320	1000	1100
	2	Gipsplatte	0,013	0,250	800	1050
	3	OSB-Platte	0,015	0,130	650	1700
	4	Dämmung	0,120	0,036	80	900
	5	OSB-Platte	0,015	0,130	650	1700
	6	Dämmung	0,022	0,040	-	1450

$$d = 0,197 \text{ m}$$

$$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$C'_{\text{wirk}} = 11 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 76: Innenwandaufbau – Leichtbauweise

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen / innen →	1	OSB-Platte	0,015	0,130	650	1700
	2	Dämmung	0,100	0,035	-	1450
	3	OSB-Platte	0,015	0,130	650	1700
d = 0,130 m			U = 0,30 W/(m²K)		C' _{wirk} = 5 Wh/(m²K)	

Tabelle 77: Deckenaufbau – Leichtbauweise

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Trockenestrich	0,025	0,210	900	1050
	2	Dämmung	0,030	0,035	-	1450
	3	Schüttung	0,040	0,700	1800	1000
	4	Holz	0,024	0,120	450	1600
d = 0,119 m			U = 0,70 W/(m²K)		C' _{wirk} = 25 Wh/(m²K)	

Tabelle 78: Fußbodenaufbau – Leichtbauweise

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← unten / oben →	1	Trockenestrich	0,025	0,210	900	1050
	2	Dämmung	0,030	0,035	-	1450
	3	Schüttung	0,040	0,700	1800	1000
	4	Holz	0,024	0,120	450	1600
d = 0,119 m			U = 0,70 W/(m²K)		C' _{wirk} = 7 Wh/(m²K)	

Tabelle 79: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Süd-West-Raum – Leichtbauweise

Bauteil	Fläche [m ²]	C' wirk [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand S	8,69	11,3	99
Außenwand W	10,93	11,3	124
Innenwand N	8,00	4,6	37
Innenwand O	16,27	4,6	75
Decke	26,04	24,8	646
Fußboden	26,04	6,6	171
Fenster	6,65	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 1151 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 26,04 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 44 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

Tabelle 80: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit Nord-Raum – Leichtbauweise

Bauteil	Fläche [m ²]	C' wirk [Wh/(m ² K)]	C _{wirk} [Wh/K]
Außenwand N	5,73	11,3	65
Innenwand O	7,38	4,6	34
Innenwand S	7,22	4,6	33
Innenwand W	7,38	4,6	34
Decke	10,89	24,8	270
Fußboden	10,89	6,6	71
Fenster	3,49	-	-
Tür	2,00	-	-

$$C_{\text{wirk,gesamt}} = 508 \text{ Wh/K}$$

$$A_{\text{NGF}} = 10,89 \text{ m}^2$$

$$C'_{\text{wirk,gesamt}} = 47 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$