



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



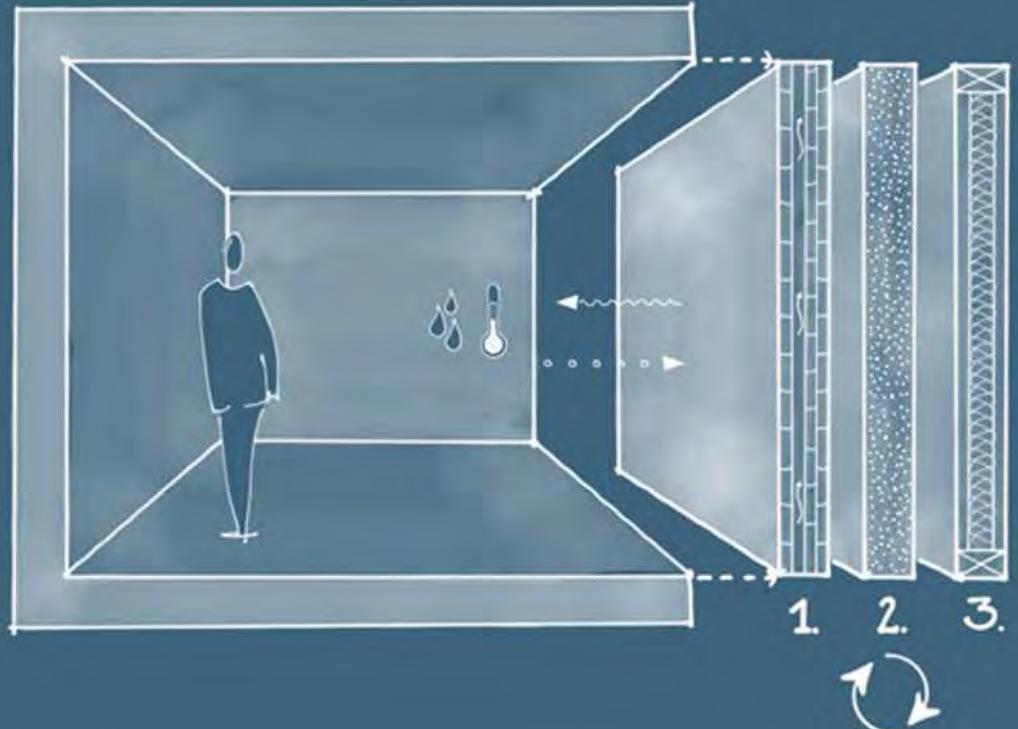
BBSR-
Online-Publikation
17/2022

Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile (PhyTAB)

von

Nina Flexeder
Nils Schumacher
Christian Hepf
Ahmad Nouman
David Briels
Zsofia Varga
Michael Kamml
Johannes Paulik
Valentin Übelhör

Prof. Stefan Winter
Prof. Thomas Auer



Potenziale hygrothermisch aktiver Bauteile (PhyTAB)

Energieeffiziente Raumkonditionierung mittels luftdurchströmter Massivholzelemente und hygroskopisch optimierter Oberflächen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.46

Projektlaufzeit: 02.2019 bis 08.2021

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München (TUM)
Nina Flexeder, M. Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)
nina.flexeder@tum.de

Nils Schumacher, M. Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)
nils.schumacher@tum.de

Christian Hepf, M. Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)
christian.hepf@tum.de

Ahmad Nouman, M. Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)
ahmad.nouman@tum.de

David Briels, M. Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)
david.briels@tum.de

Zsophia Varga, M. Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)
zsophia.varga@tum.de

Michael Kamml, B. Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

Johannes Paulik, B. Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

Valentin Übelhör, B. Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter (Projektleitung) (Lehrstuhl für Holzbau und Holzkonstruktion)

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)

Redaktion

Technische Universität München (TUM)
Nils Schumacher
Nina Flexeder

Stand

Juli 2022

Gestaltung

Technische Universität München (TUM)
Nils Schumacher
Nina Flexeder

Bildnachweis

Titelbild: Andrea Kaiser
Alle weiteren Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 280 ff.

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Flexeder, Nina; Schumacher, Nils; Hepf, Christian; Nouman, Ahmad; Briels, David; Varga, Zsophia; Kamml, Michael; Paulik, Johannes; Übelhör, Valentin; Winter, Stefan; Auer, Thomas: Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile (PhyTAB): Energieeffiziente Raumkonditionierung mittels luftdurchströmter Massivholzelemente und hygroskopisch optimierter Oberflächen. BBSR-Online-Publikation 17/2022, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Kurzfassung | 7 |
| Abstract | 8 |
| Einführung | 9 |
| Hintergrund des Forschungsvorhabens | 9 |
| Zielsetzung | 11 |
| Vorgehensweise und Methodik | 12 |
| Kapitel I – Einsatzszenarien und Anforderungen eines thermisch aktivierten Massivholzes | 13 |
| Baukonstruktion des thermisch aktivierten Massivholzes | 13 |
| Weiterentwicklung der Massivholzbauweise | 16 |
| Bauordnungsrechtliche Grundlagen | 17 |
| Anwendung des thermisch aktivierten Massivholzes in unterschiedlichen Gebäudeklassen | 18 |
| Energiekonzepte | 19 |
| Anforderungen aus der Bauphysik | 22 |
| Produktionsvarianten von thermisch aktiviertem Massivholz | 27 |
| Montagehinweise für thermisch aktiviertes Massivholz | 32 |
| Betrieb von thermisch aktivierten Massivholzelementen | 35 |
| Rückbaubarkeit von thermisch aktiviertem Massivholz | 37 |
| Kapitel II – Optimierung der Heiz- und Kühlleistung | 41 |
| Modifikation der Luftkanäle | 41 |
| Position der Kanalschicht im Bauteil | 41 |
| Strömungsweggeometrie und Strömungsweganordnung | 43 |
| Systemtemperaturen | 48 |
| Oberflächenbeschaffenheit | 56 |
| Anbindung an die Wärme- und Kälteversorgung | 60 |
| Einfluss durch den Nutzer | 70 |
| Kapitel III – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung | 71 |
| Grundlegende Untersuchungen des Enthalpieeffekts | 71 |
| Über die Wirkung hygrokopischer Baustoffe in Innenräumen | 77 |
| Labormessungen zur Feuchtepufferung verschiedener Materialien | 82 |
| Experimenteller Nachweis der Bauteilerwärmung durch Sorptionsenthalpie | 96 |
| Variantenstudie zur TAM-Beplankung via hygrothermischer Bauteilsimulation | 106 |
| Anwendung einer realistischen Bauteilsimulation | 113 |
| Kapitel IV – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche | 141 |
| Planung von Langzeitfeldversuchen in verschiedenen Testkuben | 141 |
| Baukonstruktive Planung und Umsetzung der Umbauten in Kubus Ost und West | 145 |
| Systematisierung und Schichtenaufbau der Fassadentestelemente für die Messungen in Kubus Ost und West | 152 |
| Entwicklung des übergeordneten Messkonzepts und Konfiguration der Messtechnik | 160 |
| Messkonzept: Übersicht über die Stromversorgung, die Installation, Konfiguration und die Programmierung der Messgeräte in Kubus Ost und West | 167 |

| | |
|--|------------|
| Datenverarbeitung, Validierung der Simulation und Integration und Programmierung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik | 175 |
| Kapitel V – Langzeitfeldversuche in Testkuben | 179 |
| Hygrothermisches Verhalten des Brettsperrholzkubus im Realmaßstab infolge eines gesteuerten isothermen Feuchtesprungs (Kubus Kösching) | 179 |
| Dynamische Messungen mit aktiver Steuerung im reduzierten Maßstab (Kubus Ost) | 181 |
| Experimenteller Vergleich verschiedener Brettsperrholzoberflächen anhand von Fassadentestelementen im Feldversuch (Kubus Ost) | 196 |
| Untersuchung der klimaregulierenden Langzeitwirkung durch die Hygrkopizität der Brettsperrholzwände im Realmaßstab (Kubus Kösching) | 203 |
| Maßgebliche Unterschiede beim Vergleich von Labor- und Feldmessungen | 210 |
| Dynamische Messungen im Testkubus West | 214 |
| Kapitel VI – Planung und Auslegung thermisch aktivierbarer Massivholzelemente für konkrete Einsatzszenarien | 231 |
| Ausarbeitung von Mustersystemlösungen und -details der Bautechnik für die in Kapitel I definierten Anforderungen | 231 |
| Ausarbeitung von Mustersystemlösungen und -details der Anlagentechnik für die in Kapitel I definierten Anforderungen | 243 |
| Kapitel VII – Konzepte für Produktion, Montage, Betrieb und Rückbau | 245 |
| Lebenszyklusbetrachtung für die in Kapitel VI erarbeiteten Lösungen | 245 |
| Intensiver Austausch mit den beteiligten Unternehmen zu produktions- und montagespezifischen Anforderungen | 263 |
| Kapitel VIII – Dokumentation und Verbreitung der Ergebnisse | 265 |
| Veröffentlichungen und Präsentationen während der Projektlaufzeit | 265 |
| Verbreitung der Ergebnisse in Publikationen und Konferenzbeiträgen | 265 |
| Kapitel IX – Ausblick | 268 |
| Mitwirkende | 269 |
| Kurzbiographien | 271 |
| Verzeichnisse | 274 |
| Literaturverzeichnis | 274 |
| Verzeichnis der zitierten Gesetze, Verordnungen, Normen, Europäischen Technischen Bewertungen (ETA) und Richtlinien | 279 |
| Verzeichnis der zitierten unveröffentlichten Abschlussarbeiten | 281 |
| Abbildungsverzeichnis | 282 |
| Tabellenverzeichnis | 295 |

Anlagen

| | |
|---|-------------|
| Anlagen zu Kapitel III – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung | A 1 |
| Stationäre Labormessungen zur Sorptivität verschiedener Baustoffe | A 1 |
| Ergebnisse der Laborversuche zum hygrothermischen Effekt | A 18 |
| | |
| Anlagen zu Kapitel IV – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche | A 42 |
| Details zur Messtechnik und der in Kubus Ost und West verbauten Elektrotechnik | A 42 |
| Auswahl des Messsystems für die Temperaturmessung | A 42 |
| Auswahl des Messsystems für die Luftfeuchtemessung | A 49 |
| Auswahl des Messsystems für die Wärmestrommessung | A 51 |
| Ausführungsdetails des baukonstruktiven Umbaus der Testkuben auf der Solarstation | A 62 |
| | |
| Verzeichnisse zu den Anlagen | A 81 |
| Literaturverzeichnis | A 81 |
| Abbildungsverzeichnis | A 88 |
| Tabellenverzeichnis | A 91 |

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Potenziale hygrothermisch aktiver Bauteile“ (PhyTAB) wird insbesondere das Potential von hygroskopisch aktiven Oberflächen (HAO) untersucht mit dem Ziel, dieses Wissen auf die Weiterentwicklung der thermisch aktiven Massivholzbauteile (TAM) anzuwenden.

Eine systematische Literaturrecherche legt die Grundlagen für Labormessungen zur Quantifizierung des sogenannten hygrothermischen Effekts an Oberflächen. Die Erwärmung von Holz- und Lehmoberflächen durch das Freiwerden von Sorptionsenthalpie nach Wasserdampfadsorption kann zunächst in Laborexperimenten klar nachgewiesen werden und wird in diesem Forschungsprojekt auf Testkörpern unter den Einflüssen der freien Witterung übertragen.

Hierbei wurden zwei Messkuben entworfen, geplant und in die Praxis umgesetzt und mit einem entsprechenden Mess-, Versorgungs- und Elektrokonzept versehen, um das hygroskopische Verhalten detektieren zu können. Diese werden verwendet, um mittels simulierter Variantenstudien eine theoretische Vorauswahl an Materialien zu treffen und Empfehlungen für Regelzyklen zur hygrothermisch optimierten Nutzung der TAM-Oberfläche abzugeben.

Aufseiten der hygroskopisch aktiven Oberflächen zeigt sich, dass mit dem gewählten Versuchsaufbau die hygrothermischen Prozesse abgebildet werden können. Hierbei weisen die verschiedenen Bauteilaufbauten ein unterschiedliches Verhalten auf. Die innenseitige Erwärmung einer Brettsperrhölzkonstruktion nach einem isothermen Feuchtesprung lässt sich messbar mithilfe der adaptierten Methoden aus den Laborversuchen erfolgreich nachweisen. Der Vergleich einer unbehandelten mit einer lasierten Brettsperrhölzoberfläche beweist die Unterschiede im instationären hygrischen sowie hygrothermischen Verhalten. Im Hinblick auf die Schwankungen der Innenraumtemperatur in der Mitte des Testkubus lassen sich in ausgewählten Messzeiträumen geringe thermische Pufferungseffekte durch Sorptionswärme nachweisen. In einem weiteren Langzeitvergleich zeigt sich, dass die Modifikation einer Brettsperrhölzkonstruktion mit innenseitiger Lehmplatte und -putz vor allem Pufferungseffekte durch die Erhöhung der thermischen Masse bringt. Insgesamt lässt sich der hygrothermische Effekt respektive die thermische Pufferwirkung von hygroskopischen Oberflächen in den freibewitterten Klimatestkuben wesentlich geringfügiger nachweisen, als in den vorangegangenen Laborexperimenten. Die hygrothermischen Simulationen zeigen zudem, dass der hygrothermische Effekt thermische Effekte ergänzt und sich somit unter aktiver Konditionierung durch Befeuchtung die Oberflächentemperatur zusätzlich steigern lässt. Dies kann für weitere Forschungsvorhaben die Basis bilden, um den Einfluss von thermisch aktiven Oberflächen auf den Innenraum eines Gebäudes weiter zu untersuchen.

Die Ergebnisse des Projekts in Bezug auf das thermisch aktivierte Massivholzelement zeigen, dass ein Einbau des Elements bis zur Gebäudeklasse 5 möglich ist, sofern das Massivholzelement bauaufsichtlich zugelassen ist. Die Anbindung an die anschließende Gebäudestruktur sowie an die anlagentechnische Versorgung kann mit Verbindungsmitteln nach aktuellem Stand der Technik ausgeführt werden und benötigt keiner zusätzlichen Untersuchungen. Ein Wandaufbau mit Fassade, Dämmung und dem thermisch aktivierten Massivholz kann die aktuellen Anforderungen an den Wärmeschutz, Brandschutz, Schallschutz etc. erfüllen. Eine Betrachtung des ökologischen Lebenszyklus nach DIN EN 15804:2020-03 wurde für die Module A1 – A3, A5, C2 – C4 und D durchgeführt.

Abstract

Within the research project "Potentials of hygrothermally activated building components" (PhyTAB)- the potential of hygroscopically active surfaces (HAO) in particular- is being investigated with the aim of applying this knowledge to further developments of a thermally activated solid timber components (TAM).

A literature review sets the foundation for laboratory measurements to quantify the so-called hygrothermal effect on surfaces. The heating of wood and clay surfaces due to the release of sorption enthalpy after water vapor adsorption can clearly demonstrated in laboratory experiments. In this research project, these investigations will be transferred to observations under real conditions in a test chamber subjected to the influence of the local weather conditions.

For this purpose, two measuring cubes are designed, planned and put into practice. An appropriate measurement, supply and electrical concept forms the basis for the experiments. This implementation serves the function to detect the hygroscopic behaviour. The setup of these cubes enables a theoretical preselection of materials by simulations and provides recommendations for the control strategies for the hygrothermally-optimized use of the TAM surface.

Drawing on the conclusion of the hygroscopically active surfaces, the results suggest that the hygrothermal processes can be reproduced with the selected test setup. Here, the different component structures exhibit different behaviours. The heating of the inside of a cross-laminated timber construction after an isothermal moisture jump can be successfully measured using the methods adapted from the laboratory tests. The comparison of an untreated and a varnished cross-laminated timber surface proves the discrepancy in the transient hygric as well as hygrothermal behaviour. With regard to the fluctuations of the interior temperature in the centre of the test cube, minor thermal buffering effects can be observed allocated to the sorption heat in certain measurement periods. A further long-term comparison shows that the modification of a cross-laminated timber construction with an interior clay building board and plaster mainly creates buffering effects based on the increase of the thermal mass. Overall, the hygrothermal effects (the thermal buffering effects of hygroscopic surfaces) are traceable to a much smaller extent in the outdoor test cubes than recorded in the previous laboratory experiments. The hygrothermal simulations also show that the hygric effect complements the thermal effects of the materials and that the surface temperature can thus be additionally increased under active conditioning by humidification. This could form the basis for further research projects to investigate the influence from thermally active surfaces on the interior of a building.

The results of the project with regard to the thermally activated solid timber element outline that it is possible to install the element up to building class 5, under the condition that the building authorities approve the solid timber element. The connection to the adjoining building structure as well as to the building technology is feasible in lines with the current state of the art and does not require any additional investigations. A wall structure with façade, insulation and the thermally activated solid timber element can meet the current requirements for thermal insulation, fire protection, noise protection, etc. A consideration of the ecological life cycle according to DIN EN 15804:2020-03 was carried out for the modules A1 - A3, A5, C2 - C4 and D in this report.

Einführung

Hintergrund des Forschungsvorhabens

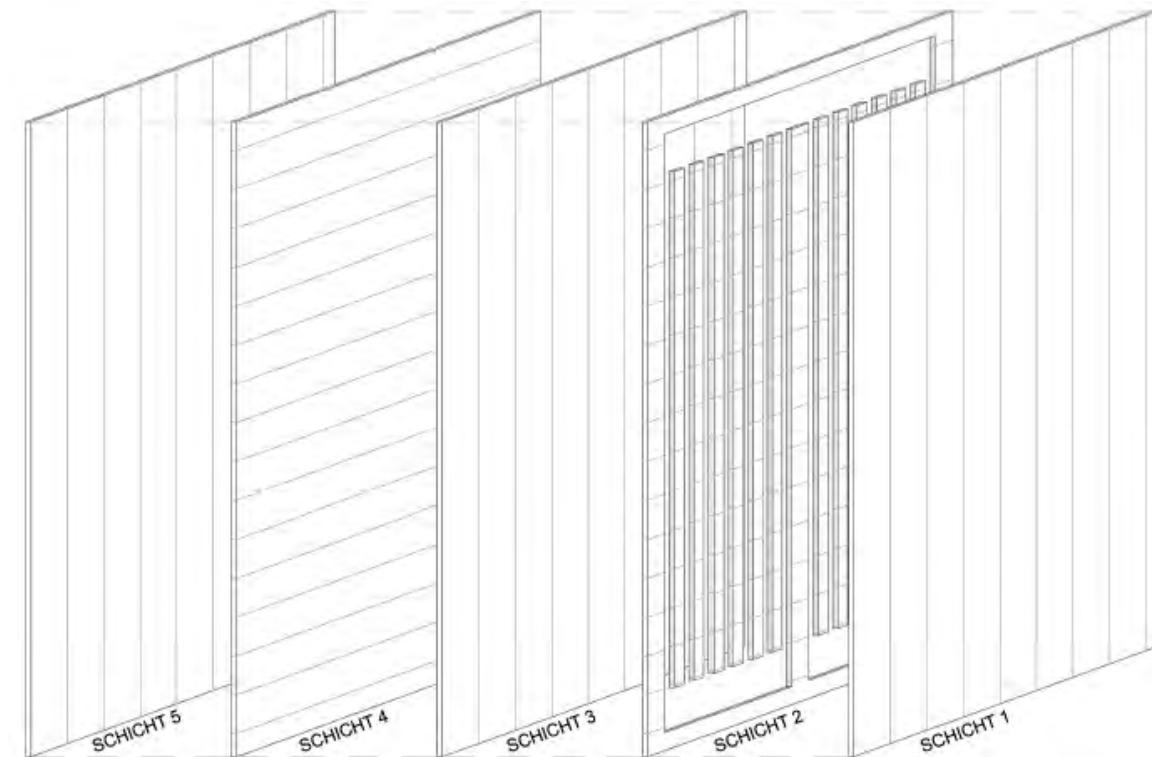
Nils Schumacher

Auf den Bereich Wohnen entfällt etwa ein Viertel des Endenergieverbrauchs in Deutschland und davon wieder ca. 70% auf den Bereich Raumwärme (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2020). Daraus wird deutlich, dass die Entwicklung einer energieeffizienten Raumkonditionierung einen erheblichen Teil zur Energieeinsparung beitragen kann und somit der CO₂-Austoß weiter gesenkt wird. „*Denn die sauberste Kilowattstunde ist die, die gar nicht erst erzeugt werden muss*“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Hintergrundpapier Energieeffizienz, 2016). (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Hintergrundpapier Energieeffizienz, 2016, S. 1)

Für eine energieeffiziente Raumkonditionierung ist es von herausragender Bedeutung, die thermische Speicherfähigkeit der zu aktivierenden und umgebenden Bauteile zu berücksichtigen (Kornadt et al., 2018). Im Rahmen des 2018 abgeschlossenen Forschungsvorhabens “Wärmespeicherfähigkeitsindex” wurden diese Speicherpotenziale untersucht und dargelegt, inwieweit vorgefertigte thermisch aktivierte Bauteile aus Brettsperrholz die Beheizung und Klimatisierung von Räumen gewährleisten können.

Im Forschungsvorhaben wird ein Massivholzelement (Brettschichtholz) thermisch aktiviert. Die thermische Aktivierung erfolgt mittels im Brettsperrholz eingefräster Holzkanäle. Nachdem die Kanäle in die bestehende Schicht gefräst wurden, werden diese mit einer zusätzlichen Deckschicht wieder verschlossen. Im Forschungsvorhaben werden verschiedene Deckschichten verbaut, um die Wärmespeicherfähigkeit der Materialien in Bezug auf das Heizsystem zu untersuchen. Durch das Aufbringen der Deckschicht entsteht ein für sich abgeschlossenes Kanalsystem.

Abbildung 1 Deckplatte auf Massivholzelement mit gefrästen Kanälen, (Pape, 2020)



Im Betrieb wird durch die entstehenden geschlossenen Kanäle Luft geleitet. So kann im Winter durch das Bauteil geheizt und im Sommer gekühlt werden.

Ein weiterer Einflussfaktor für die Energieeffizienz von Raumkonditionierungen ist das Lastmanagement der Energiezufuhr durch die Haustechnik. Es wird untersucht, welche Möglichkeiten sich durch Wärmespeicherfähigkeit der unterschiedlichen Oberflächenmaterialien für eine intelligente Haustechnik ergeben.

Zielsetzung

Nina Flexeder, David Briels, Nils Schumacher

Mit diesem Fortführungsprojekt werden die Ergebnisse des Vorgängerprojektes „Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente“ (Kornadt et al., 2018) fundiert und die Potentiale weiter verbessert.

Im Rahmen des Projekts „Potenziale hygrothermisch aktiver Bauteile“ (PhyTAB) wird insbesondere das Potential von hygroskopisch aktiven Oberflächen (HAO) untersucht mit dem Ziel, dieses Wissen auf die Weiterentwicklung der thermisch aktiven Massivholzbauteile (TAM) anzuwenden.

Dazu werden die thermisch aktiven Massivholzbauteile (TAM) in Bezug auf die Herstellverfahren, Strömungsweggeometrie und optimale spezifische Einbindung der Bauteile an die Gebäudetechnik optimiert. Es werden für verschiedene Einsatzszenarien der TAM Planungsgrundlagen geschaffen und produktspezifische Anforderungen von der Herstellung bis zum Rückbau weiterentwickelt. Für die Optimierungen der Heiz- und Kühlleistung sowie die Einbindung des Systems an die Versorgungsstruktur des Gebäudes werden Simulationen erfolgen.

Des Weiteren werden die thermischen Effekte durch die Bauteile weiter optimiert. Phänomene wie das Freiwerden von Enthalpie an den hygroskopisch aktiven Oberflächen werden durch thermodynamische Simulationen und dynamische Messungen nachgewiesen. Dabei werden zunächst verschiedene Materialien bzw. Oberflächen (z.B. Holz, Lehm, Ziegel) grundlegend betrachtet und untersucht. Hierzu sind Vorversuche an verschiedenen Oberflächen in den Klimakammern sowie Langzeitfeldversuche in zwei frei bewitterten Klimatestkuben geplant. Diese an der TU München bereits vorhandenen Testkuben wurden umgebaut und mit einem austauschbaren Wandelement für den Einsatz unterschiedlicher Materialien sowie umfangreicher Messtechnik versehen. Durch das Monitoring von hygroskopisch aktiven Oberflächen im periodisch konditionierten Innenraum wird erforscht, inwiefern die hygrothermische Masse von Oberflächenmaterialien Energieeinsparungen bei der Gebäudeklimatisierung ermöglichen.

Bei niedriger Raumluftfeuchte und höheren Temperaturen, beispielsweise tagsüber durch solare Einstrahlungen, desorbiert Feuchtigkeit aus hygrothermisch aktiven Oberflächen und wirkt somit kühlend. Nachts, bei niedrigeren Lufttemperaturen und höherer relativer Feuchte adsorbiert wiederum Feuchte aus der Luft an der Bauteiloberfläche und deren Oberflächentemperatur steigt. Dieser idealisiert selbstregulierende Prozess wird in Versuchen messtechnisch überprüft und mittels Simulationen werden die Potentiale weiter quantifiziert.

Vorgehensweise und Methodik

Nina Flexeder, David Briels, Nils Schumacher

Für die Bearbeitung wurde das Projekt in sieben fachliche Arbeitspakete und ein koordinatives Arbeitspaket gegliedert. Der folgende Arbeitsplan fasst stichpunktartig die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen zusammen:

Arbeitspaket 1 – Einsatzszenarien und Anforderungen

Gebäudeklassen, Bauweisen, Energiekonzepte, Anforderungen aus der Bauphysik, Baukonstruktion, Bauordnungsrecht, Produktion, Montage, Betrieb und Rückbau

Arbeitspaket 2 – Optimierung der Heiz- und Kühlleistung

Modifikation der Luftkanäle, Position im Bauteil, Strömungsweggeometrie und -anordnung, Systemtemperaturen, Oberflächenbeschaffenheit, Anbindung an die Wärme- und Kälteversorgung, Steuerungs-/Regelungsalgorithmen, Einfluss des Nutzers

Arbeitspaket 3 – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung hygroskopisch aktiver Oberflächen

Raumklimasimulation zur Quantifizierung der hygroskopischen Enthalpie-Effekte auf die thermische Behaglichkeit im Sommer sowie den Heiz- und Kühlenegiebedarf, Modifikation der Oberflächenbeschaffenheit bei Holz- und Lehmoberflächen, Messtechnische Ermittlung fehlender Kennwerte im Labor, Messtechnische Validierung im Labor

Arbeitspaket 4 – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche

Vorbereitung der Solarstation, Anpassung und Einrichtung der Klimatestkuben, Planung und Umsetzung des Umbaus, Planung und Fertigung der zu testenden Wandelemente, Anpassung und Einrichtung des bestehenden Brettsperrholz-Testkubus, Konzeption der neuen Infrastruktur, Erstellung eines adaptiven Messkonzepts, Entwicklung des Sensorikkonzepts, Installation und Konfiguration der Versorgungs- und Messtechnik, Programmierung der Messtechnik, Testbetrieb und Optimierung der Messtechnik

Arbeitspaket 5 – Langzeitfeldversuche in Testkuben

Wartung und Anpassung der Versorgungs- und Messtechnik, Messdatenaufbereitung, Validierung / Kalibrierung der Simulationsmodelle, Umsetzung der MSR in der Programmierung, Durchführung der Messungen, Wartung und Anpassung der Versorgungs- und Messtechnik, Kreuzvalidierung zum bestehenden Kubus 1.0, Planung und Umsetzung von Varianten, Umbau Kubus 1.1

Arbeitspaket 6 – Planung und Auslegung thermisch aktivierbarer Massivholzelemente für konkrete Einsatzszenarien

Ausarbeitung von Mustersystemlösungen und -details von der Bau- und der Anlagentechnik für die in AP 1 definierten Anforderungen

Arbeitspaket 7 – Produktion, Montage, Betrieb und Rückbau

Lebenszyklusbetrachtung für die in AP6 erarbeiteten Lösungen, intensiver Austausch mit den beteiligten Unternehmen zu produktions- und montagespezifischen Anforderungen, Erarbeitung von Wartungs- Erneuerungs- und Rückbaukonzepten

Arbeitspaket 8 – Dokumentation und Verbreitung der Ergebnisse

Publizieren von Artikeln und Veröffentlichungen, Vorstellung auf Kongressen und Kolloquien

Kapitel I – Einsatzszenarien und Anforderungen eines thermisch aktivierten Massivholzes

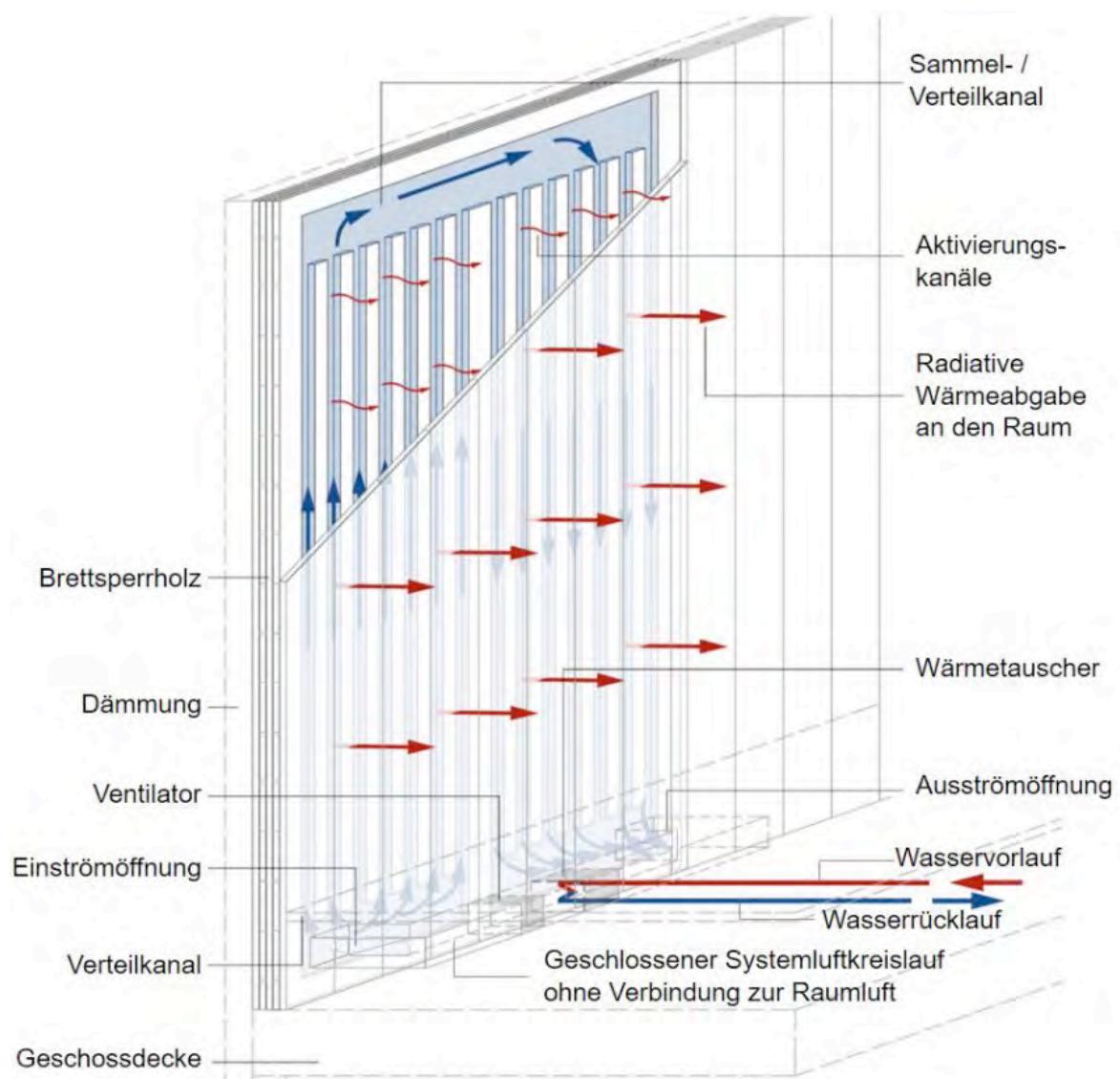
Gebäudeklassen, Bauweisen, Energiekonzepte, Anforderungen aus der Bauphysik, Baukonstruktion, Bauordnungsrecht, Produktion, Montage, Betrieb und Rückbau

Baukonstruktion des thermisch aktivierten Massivholzes

Nils Schumacher

Ein thermisch aktiviertes Massivholzelement – im Folgenden als TAM bezeichnet – ist ein Vollholzprodukt, dass das, ebenso wie ein standardisiertes Brettsperrholzelement mehrschichtig aus Brettschnittholz aufgebaut ist. Es ist eine funktionale Weiterentwicklung von Brettsperrholz um die Fähigkeit einer aktiven Raumkonditionierung. (Mindrup, 2019)

Abbildung 2 Schema eines luftführenden thermisch aktivierten Massivholzelements (Mindrup, 2019)



Die Begriffsdefinition „Thermisch aktivierte Massivholzelement“ stammt ebenfalls von Mindrup, der in seiner Dissertation nach einem einheitlichen Begriff in der bestehenden Literatur für „thermoaktive Bauteilsysteme“ gesucht hat. Nach (Kalz & Koenigsdorff, 2016) fallen unter thermisch aktivierte Bauteile „[...] alle Rohrsysteme zur Heizung und zur Kühlung, die in Betonbauteile oder andere Massivbauteile integriert sind oder sich in einem, ohne zwischenliegende Wärmedämmung, auf derartigen Bauteilen aufgebrachten Putz oder Estrich befinden und so Oberflächen und Speichermasse der Bauteile gleichermaßen nutzen.“ Weitere ähnlich lautende Definitionen stammen von (Glück, 1999) und (Pfafferott et al., 2015).

Im Sinne der oben genannten Definitionen werden als „thermisch aktivierte Bauteilsysteme“ alle raumabschließenden Bauteile bezeichnet, welche „durch aktive interne Temperierung zur Raumklimakonditionierung unter Einbindung ihrer thermischen Speichermasse benutzt werden. Sie wirken dabei gleichzeitig als aktive Wärmeübertragungsfläche und als passiver thermischer Speicher. Die Wärmeübertragung zwischen Bauteil und Raum funktioniert dabei primär über Strahlung und nachrangig über Konvektion.“ (Mindrup, 2019)

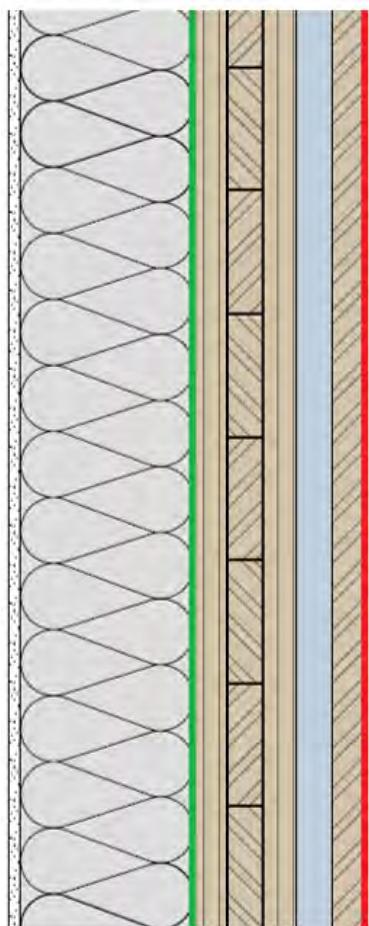
Aufbau

Das TAM setzt sich aus einem Grundprodukt, einem flächigen und massivem Brettsperrholzelement (BSP oder X-Lam) sowie einer Luftkanalschicht und einer Deckschicht zusammen (Abbildung 2).

Je nach Produktionsvariante ist die Luftkanalschicht Teil der äußersten Brettsperrholzsicht und wird aus dieser herausgefräst oder es ist eine zusätzliche Schicht die additiv auf das Brettsperrholz aufgebracht wird. Die Anzahl der Bretterschichten des Brettsperrholzes richtet sich nach den bauphysikalischen und statischen Anforderungen, die an das fertige Bauteil gestellt werden (siehe Unterkapitel: Anforderungen aus der Bauphysik). Eine Mindestanzahl von drei rechtwinklig zueinander verklebten Bretterschichten ist jedoch notwendig um ein formstabiles sowie luftdichtes Grundprodukt herzustellen. Die Wandungen der Luftkanalschicht bestehen ebenso wie das Brettsperrholz aus Schnittholz. Die bisher verwendete und übliche Holzart ist Tanne/Fichte. Als Deckschicht kommen Vollholzplatten sowie Dreischichtplatten, bisher ebenfalls aus Nadelholz zur Anwendung. Eine Weiterentwicklung des TAM stellt der Einsatz von weiteren Bauplatten wie Lehmplaatten und Gipsplaatten als Decksicht dar. Potenziale dieser Plattenwerkstoffe wurden im Forschungsvorhaben untersucht und dienen der theoretischen und praktischen Weiterentwicklung.

Um das thermisch aktivierte Massivholz eindeutig beschreiben zu können, werden die Oberflächen in hygrothermisch aktivierte Oberfläche (HAO), nach (Pierburg) und hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche (HnAO) unterteilt (Abbildung 3).

Abbildung 3 Position der hygrothermisch aktiven Oberfläche und der hygrothermisch nicht aktiven Oberfläche auf dem TAM (eigene Dartstellung)



HAO = hygrothermisch aktivierte Oberfläche

HnAO = hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche

Die hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche ist die Oberfläche die am weitesten von der Luftkanalschicht entfernt liegt. Sie soll planmäßig nicht aktiviert werden, je nach Betriebsdauer des TAM ist dies jedoch ebenfalls möglich. Die Namen für die jeweilige Oberfläche dienen daher eher der Begriffsdefinition.

Weiterentwicklung der Massivholzbauweise

Nils Schumacher

Das Bauen mit thermisch aktiviertem Massivholz bedeutet eine Weiterentwicklung des Bauens mit Massivholz wie z.B. Brettsperrholz. Die Massivholzbauweise wird wie der Holztafelbau, der Blockbohlenbau und der Holzskelettbau unter dem Begriff der Holzbauweisen zusammengefasst.

Gegenüber traditionellen Bauweisen wie der Stahlbetonbauweise und der Stahlbauweise bringt das Bauen mit thermisch aktiviertem Massivholz folgende wesentliche Vorteile mit sich:

- Wie bei der Brettsperrholzproduktion ist eine witterungsunabhängige Herstellung von standardisierten Wandbauteilen möglich. Dabei besitzt das TAM bereits selbst einen sehr hohen Vorfertigungsgrad, da die technische Einheit zur Raumkonditionierung im Bauteil bereits integriert ist.
- Sämtliche Brettschnittholzbauteile aus denen das TAM gefertigt wird sind technisch getrocknet und bringen daher keine zusätzliche Feuchte in das Bauwerk ein.
- Durch die kreuzweise Anordnung der Brettschichten des Brettsperrholzes als Grundprodukt des TAM's und dem damit verbundene Absperreffekt führen nur zu sehr geringen Quell- und Schwindverformungen in Plattenebene.
- Bauteilabmessungen des TAM's richten sich lediglich an die produktionsbedingten Größt- und Transportmaße. Es wird jedoch empfohlen, sich an der Maßordnung der DIN 4172:2015-09 zu orientieren, da sich die Bauindustrie bereits an diese angepasst hat. Auch sollte gewährleistet werden, dass die Verbindungsmittelabstände eingehalten werden können.
- Durch die flächige Lastabtragung können geringe Bauteilhöhen bei niedrigem Eigengewicht realisiert werden. Die Luftkanalschicht sowie die Deckschicht tragen dabei zum Lastabtrag bei, sofern sie flächig mit dem Grundprodukt verklebt sind. Die Tragfähigkeiten von Luftkanalschicht und Deckschicht wurden im Forschungsvorhaben (InnoCrossLAM) untersucht.
- Auch beim thermisch aktivierten Massivholz wird CO₂ in den Brettschnitthölzern eingelagert. Dies trägt zur Minimierung des Treibhauseffekts bei.
- Da für die Produktion des thermisch aktivierten Massivholzes keine zusätzlichen Leitungssysteme wie bei wassergeführten Wandheiz- und Wandkühelementen zum Einsatz kommen, kann das TAM Sortenrein produziert werden. Somit kann das TAM problemlos thermisch verwertet werden, aber auch eine Kaskadennutzung ist möglich.

Bauordnungsrechtliche Grundlagen

Nils Schumacher

Um das thermisch aktivierte Massivholz in Bauwerken oder baulichen Anlagen einsetzen zu können muss dessen Verwendbarkeit baurechtlich nachgewiesen werden. Nach deutschem Baurecht kann eine Verwendbarkeit entweder als Bauprodukt oder als Bauart erfolgen. Diese werden nach der (Musterbauordnung - MBO - Fassung November 2002) wie folgt definiert:

Bauprodukte sind

1. Produkte, Baustoffe, Bauteile und Anlagen sowie Bausätze gemäß Art. 2 Nr. 2 der Verordnung (EU) Nr. 305/2011, die hergestellt werden, um dauerhaft in bauliche Anlagen eingebaut zu werden,
2. aus Produkten, Baustoffen, Bauteilen sowie Bausätzen gemäß Art. 2 Nr. 2 der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 vorgefertigte Anlagen, die hergestellt werden, um mit dem Erdboden verbunden zu werden

und deren Verwendung sich auf die Anforderungen nach § 3 Satz 1 auswirken kann.

Bauart ist das Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen (Musterbauordnung - MBO - Fassung November 2002).

In Abhängigkeit eines Bauprodukts oder einer Bauart kennt die Bauordnung verschiedene Formen von Verwendbarkeitsnachweisen (Engel & Lechner, 2020). Es gibt folgende Formen bzw. Arten:

Bauprodukt:

- Leistungserklärung (DoP)
- Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP)
- Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)
- Nachweis der Verwendbarkeit von Bauprodukten im Einzelfall (ZiE)

Bauart:

- Allgemeine Bauartgenehmigung (aBG)
- Vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG)
- Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP)

Nach aktuellem Forschungsstand ist eine Verwendbarkeit des thermisch aktivierten Massivholzes als Bauprodukt oder als Bauart denkbar. Eine Entscheidung über den Nachweis der Verwendbarkeit ist stark von den möglichen Produktionsvarianten abhängig. Die möglichen Varianten (Produktionsvariante PV1 – PV4) werden im Kapitel I, Unterkapitel: Produktion beschrieben.

Bei der Produktionsvariante PV1 und PV2 wird ein TAM komplett aus Holz bzw. Holzwerkstoffen gefertigt. Das entstehende Produkt könnte den Nachweis der Verwendbarkeit über eine Europäisch Technische Bewertung, wie auch das Brettsperrholz, nachweisen.

Bei der Produktionsvariante PV3 und PV4 können bzw. werden einzelnen Bauteilschichten additiv mit einander über Schraubenverbindungen gefügt. Sämtliche Einzelteile, die bei dieser Produktionsvariante zum Einsatz kommen, sind bereits im Besitz einer Europäisch Technischen Bewertung (ETA) oder sind z.B. über die Technischen Baubestimmungen der Länder eingeführt. Einen Nachweis der Verwendbarkeit über eine Bauart ist hier naheliegend. Jedoch könnte auch hier bei vollständiger Produktion im Werk die Zulassung als Bauprodukt erfolgen.

Im Zuge des Forschungsvorhabens werden keine konkreten Prüfungen für eine bauaufsichtliche Zulassung durchgeführt.

Anwendung des thermisch aktivierte Massivholzes in unterschiedlichen Gebäudeklassen

Nils Schumacher

Bevor das thermisch aktivierte Massivholz als Wandelement in einer baulichen Anlage eingesetzt werden kann, muss es mehrere bauordnungsrechtliche Anforderungen erfüllen. Diese sind z.B. Standsicherheit, Schutz gegen schädliche Einflüsse, Brandschutz, Wärmeschutz, Schallschutz etc. (Musterbauordnung - MBO - Fassung November 2002). Als eine der maßgebenden Vorgaben für eine Verwendung des TAM wird die Erfüllung der Anforderungen aus dem Brandschutz erachtet. In Tabelle 1 wird die Verwendung nach Musterbauordnung definiert und die jeweiligen brandschutztechnischen Anforderungen aufgezeigt.

Tabelle 1 Brandschutztechnische Anforderungen bezogen auf die Gebäudeklassen der MBO [eigene Darstellung]

| Vewendung nach (MBO) | nicht tragendes und nicht raumabschließendes Bauteil | tragendes und raumabschließendes Bauteil, auch tragende | Außenwand nichttragend |
|----------------------|--|---|------------------------|
| GK1 | F0 | F0 | F0 |
| GK2 | F0 | F30-B | F0 |
| GK3 | F0 | F30-B | F0 |
| GK4 | F0 | F60-B 25% der Wandfläche | F30-B |
| GK5 | F0 | F90-B 25% der Wandfläche | F30-B |

Grundsätzlich gilt für „Bauteile, die feuerbeständig (F90) sein müssen“, dass „deren tragende und aussteifende Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen“ müssen und „Bauteile, die hochfeuerhemmend (F60) sein müssen“ „allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen“ haben müssen (Musterbauordnung - MBO - Fassung November 2002).

„Abweichend ... sind andere Bauteile, die feuerbeständig oder hochfeuerhemmend sein müssen, aus brennbaren Baustoffen zulässig, sofern sie den Technischen Baubestimmungen nach § 85a entsprechen“ (Musterbauordnung - MBO - Fassung November 2002). § 85a bezieht sich dabei auf die MHolzBauRL. Diese besagt, dass „Brennbare Bauteiloberflächen von Wänden und Decken müssen eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen haben, ... Abweichend hiervon sind je Raum der Nutzungseinheit entweder die Decke oder maximal 25% aller Wände, ... mit brennbaren Bauteiloberflächen zulässig (Fenster- und Türöffnungen können unberücksichtigt bleiben)“ (Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise - MHolzBauRL - Fassung Oktober 2020)“

Die Untersuchungen von Mindrup der thermisch aktivierte Massivholzelemente auf Raumbene haben gezeigt, dass insgesamt vier Bauteile mit einer Breite von 1,25 m ausreichend sind, um einen Büraum zu konditionieren. Der untersuchte Büraum hat eine Grundfläche von 5 x 6,25 m und somit eine Gesamtwandlänge von 22,5 m. Entsprechend sind 25 % dieser Länge 5,625 m und somit größer als 4 mal der Länge der TAM, die insgesamt 5 m beträgt. Sofern alle anschließenden Bauteile wieder den geforderten Anforderungen entsprechen, ist eine Verwendung ebenfalls möglich.

Energiekonzepte

Christian Hepf

Die größte Herausforderung bei Energiekonzepten in der gebauten Umwelt heutzutage stellt die Bereitstellung von Komfort bei gleichzeitig energieeffizientem Betrieb dar. Hierbei kann durch die Adaption eines Gebäudeenergiekonzeptes an seinen lokalen Standort bereits Energie eingespart werden. (Hausladen et al., 2012) Darüber hinaus fordert der Wandel in der deutschen Energieversorgung zunehmend eine Flexibilisierung der Stromnachfrage durch die Verbraucher. Daher muss in Zukunft auch im Gebäuderbereich Energie gespeichert werden. Dieses Prinzip der Verteilung von elektrischen Lasten nennt man Lastmanagement. (Gerhard Hausladen, 2014)

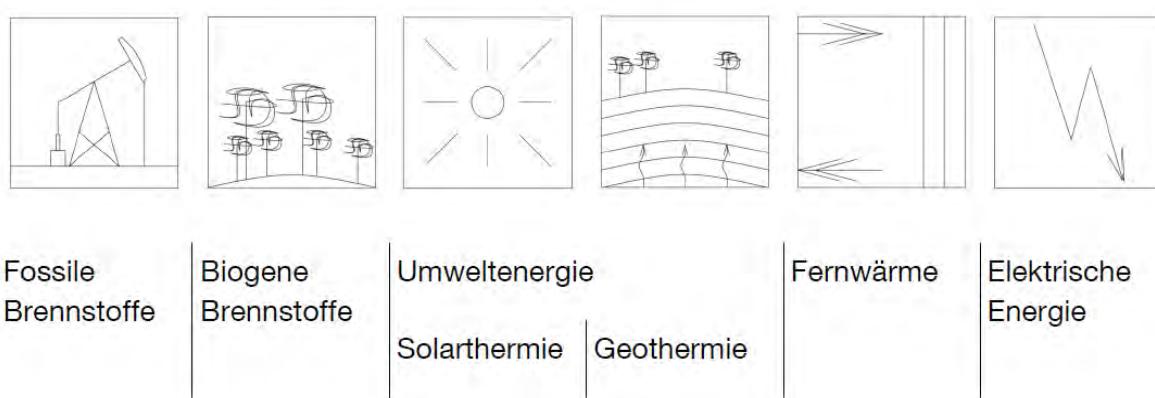
Vor allem Nichtwohngebäude wie Schulen, Einzel- und Großraumbüros bieten hier ein großes Potential wegen ihrer klar definierten Anwesenheitszeiten für ein mögliches Lastmanagement auf Städteebe. (Auer & Nagler, 2017) Träge Wärme- und Kälteversorgungssysteme wie beispielsweise aktivierte Bauteile oder Speicher von Gebäuden ermöglichen hier eine Flexibilisierung von elektrischen Lasten. (Gerhard Hausladen, 2014) Hierbei stellt das luftgeführte, aktivierte Massivholzelemente aus mehreren Gründen eine sehr attraktive Lösung dar.

Luftgeführte Systeme im Vergleich zu wassergeführten Systemen können direkt elektrisch mit dem Stromnetz und somit mit einer Lastmanagementstrategie gekoppelt werden. Durch die erhöhte, aktivierte thermische Speichermasse der Massivholzelemente kann ein Lastmanagement verstärkt genutzt werden. Je dezentraler die Systeme integriert werden, desto mehr Rohrleitung kann insgesamt im Gebäude einspart werden. Die Rückbaubarkeit und somit die Rezyklierbarkeit der Systeme ist durch die fehlenden Rohrleitungen und Verklebungen im Massivholzelement zu 100% gegeben. (Gefräste Luftkanäle) Durch die Trägheit der Systeme kann der thermische Komfort länger ohne zusätzliche Energiezufuhr gehalten werden, was gleichzeitig das Lastmanagement auf Netzebene verbessert.

Energieträger & Energieumwandlung

Heizanlagen nutzen vor allem folgende Energieträger, je nach örtlichen Gegebenheiten und Verfügbarkeiten.

Abbildung 4 Übersicht regenerativer Energieträger



Ziele der späteren Anlage müssen minimale Emissionen, minimale Verluste, maximale Wirkungs- und Nutzungsgrade sowie maximale Wirtschaftlichkeit sein. Je nach Wunsch des Bauherrn können auch mehrere Energieträger zum Einsatz kommen und multivalente Anlagen verbaut werden. Den Energieträgern werden unterschiedliche Primärenergiefaktoren zugewiesen, um bei der Gebäudeenergiebilanzierung die Anteile der regenerativen Energie zu berücksichtigen. Um die eingesetzten Energieträger innerhalb des Gebäudes als Wärme oder Kälte nutzen zu können, müssen diese umgewandelt werden.

Im Bereich Wärme stehen nachfolgende Möglichkeiten zur Verfügung (Burkhardt et al., 2006):

- Heizkessel (feste, flüssige, gasförmige Brennstoffe)
- Wärmepumpen
- Sonnenkollektoren
- Blockheizkraftwerke

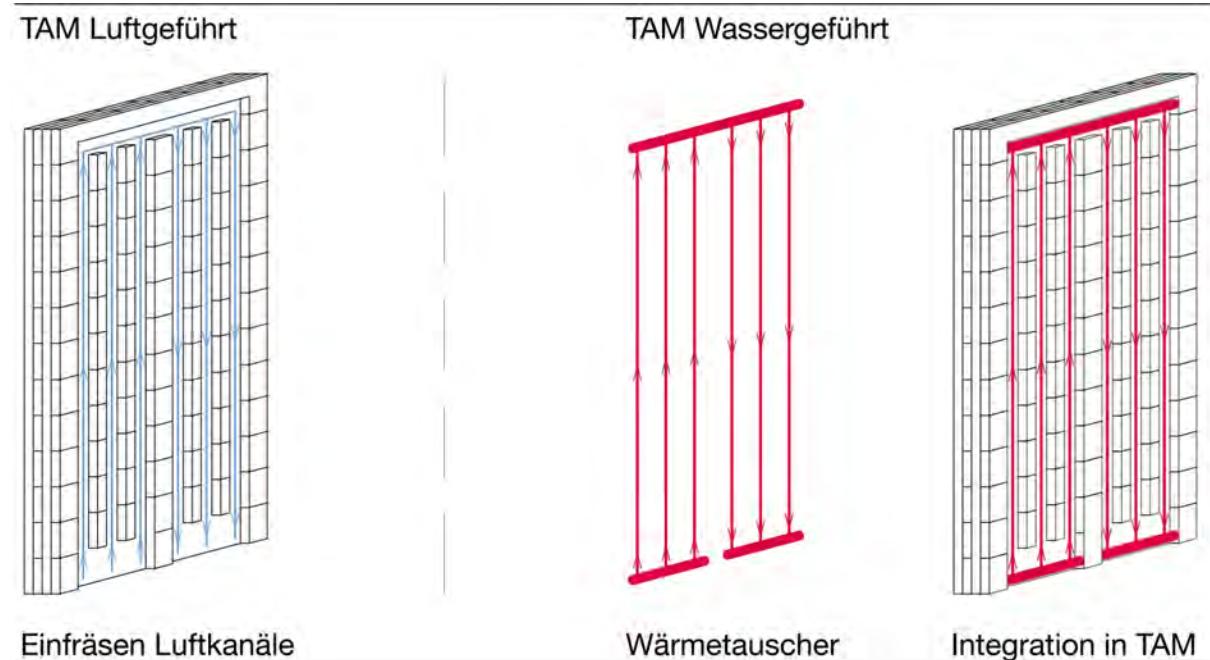
Neben der Heizenergie- ist auch die Kälteenergiebereitstellung von Bedeutung. Anlagentechnisch fällt hier häufig der Begriff der Kältemaschine. Grundsätzlich werden folgende Konzepte verfolgt.

- Nachtauskühlung
- Natürliche Wärmesenken
- Verdunstungskühlung
- Solare Sorptionskühlung
- Kühlung mit Kältemaschinen

Funktionsweise thermisch aktiviertes Massivholzelement im Kontext der Gebäudetechnologie

Standardisierte Brettsperrholzelemente werden bereits im Holzbau eingesetzt. Diese können in unterschiedlichen Maßen hergestellt und zum Beispiel als Wandelemente verwendet werden. Eine integrierte thermische Aktivierung soll nun das industriell gefertigte Brettsperrholzelement in eine Heiz- und Kühlfläche umwandeln, welche durch ihre erhöhte Masse ebenfalls die Energiespeicherfähigkeit eines Raumes erweitert und somit den thermischen Komfort in einem Raum erhöht. Dies ermöglicht bei entsprechender Leistungsfähigkeit der Elemente den Verzicht auf andere Energieübertragungssysteme, zu welchen Heizkörper, Fußbodenheizungen, Deckenkühlungen und weitere zählen. Grundsätzlich wird in dieser Arbeit zwischen einem luft- und wassergeführten System unterschieden, wobei der Fokus dieser Arbeit auf den luftgeführten Systemen liegt. Nachfolgend ist konzeptionell der Bauteilaufbau der beiden Systeme dargestellt.

Abbildung 5 Integration wassergeführte, thermische Aktivierung in Massivholzelement, nach Mindrup (Mindrup, 2019)



Die Anordnung der aktivierte Schicht erfolgt dabei in den Lagen, die nahe am zu temperierenden Raum liegen. Da die erste Schicht in der Regel Sichtqualität aufweisen soll, wird die vollständige Erhaltung der Oberflächenschicht angestrebt. Empfohlen für die energetische Versorgung wird bei einem exemplarischen Fünf-Schicht-Aufbau die Lage 2 oder 3.

Die Leistungsübertragung eines thermisch aktivierte Massivholzelements kann als Energiefluss durch bestimmte Systemkomponenten beschrieben werden. Dies gilt sowohl für die Energieabgabe im Heizfall als auch für die Energieaufnahme im Kühlfall. Dabei tritt eine Kombination aus Wärmestrahlung und Konvektion auf, dessen detaillierte Prozesse für die einzelnen Schichten kurz nachfolgend erläutert werden.

Schicht 1 (Massivholz): Die erste Schicht stellt die Ebene zwischen Raum und thermischer Aktivierung dar. An dieser Schicht findet der kombinierte Wärmetransport aus Konvektion und Strahlung zum Raum, zur Person im Raum und zu den Umgebungsflächen statt. Innerhalb der Schicht kommt es zur Wärmeleitung und Energiespeicherung. Je nach System, luftgeführt oder wassergeführt, kommt es zu unterschiedlichen Wärmeaustauschformen mit den Schichten 2 und 3.

Schicht 2 (Massivholz und thermische Aktivierung):

Hier wird zunächst zwischen luftgeführt und wassergeführt unterschieden.

Luftgeföhrtes System: In diesem Anwendungsfall sorgt die strömende Luft für erzwungene Konvektion an den Kanalwänden. Dadurch, dass nicht die komplette Schicht 2 der Luftführung dient und die Schicht nur anteilig ausgefräst wird, besteht weiterhin eine feste Verbindung zwischen Schicht eins und drei. In den festen Komponenten tritt Wärmeleitung und -speicherung auf. Die Kanäle ermöglichen Sichtkontakt zwischen Schicht 1 und 3. Somit kann hier auch ein Strahlungsaustausch stattfinden.

Wassergeführtes System: Innerhalb des Wärmetauschers, der in die Schicht 2 eingebracht wird, strömt Wasser und verursacht erzwungene Konvektion zwischen der Innenwand des Wärmetauschers und dem Medium Wasser. Liegt der Wärmetauscher nicht am Holz oder einem anderen Material innerhalb der Schicht 2 an, kommt es zum Strahlungsaustausch zwischen den Schichten 1 sowie 3 und dem Wärmetauscher. Durch die Erwärmung der Luft innerhalb von Schicht 2 tritt zudem auch freie Konvektion auf. Analog zum luftgeföhrten System speichern und leiten die festen Anteile der Schicht 2 Wärme. Auch innerhalb des Wärmetauschers, genauer zwischen Rohrinnen- und Rohraußenwand, wird Wärme durch Leitung transportiert.

Schicht 3 (Massivholz): Die dritte Schicht steht wie zuvor beschrieben im Austausch mit Schicht 1 und 2.

Schicht 4 (Massivholz): Schicht 4 wird ausschließlich durch die Vorgänge Wärmeleitung und -speicherung bestimmt.

Schicht 5 (Massivholz): Schicht 5, analog zu Schicht 4, besteht ausschließlich aus Feststoff und wird durch eine Dämmung an der Rückseite ergänzt. Es wird angenommen, dass kein Wärmeaustausch mit der Dämmschicht besteht

Anforderungen aus der Bauphysik

Nils Schumacher

Allgemeines

Beim thermisch aktivierten Massivholz müssen bauphysikalisch zwischen zwei grundlegenden Eigenschaften unterschieden werden. Zum einen die passiven bauphysikalischen Eigenschaften und die aktiven Eigenschaften. Die passiven Eigenschaften beziehen sich dabei auf die Anforderungen nach Wärme- und Feuchteschutz, Brandschutz, Schallschutz und Holzschutz. Die aktiven Eigenschaften betreffen die aktive Konditionierung des Innenraumklimas mittel hygrothermischer Aktivierung des Bauteils bzw. Aktivierung der Deckschicht, deren Interaktion mit dem Innenraum am Größten ist.

Wärmeschutz und Feuchteschutz

Brettsperrholz besitzt abhängig vom Feuchtegehalt und der Verklebungsart eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zwischen $\mu = 30\text{-}80$. Die Elemente sind bei den üblichen Elementdicken diffusionshemmend (Mestek et al., 2016). Als Grund- oder Ausgangsprodukt steht für die Herstellung eines thermisch aktivierten Brettsperrholzes immer ein Brettsperrholz. Der ungestörte Bereich, also der Bereich ohne Luftkanalschicht und ohne Deckschicht, soll einen dreilagigen Aufbau nicht unterschreiten. Ein dreilagiger Aufbau entspricht der Mindestdicke bei der Brettsplattenproduktion und erreicht daher die beschriebene Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von $\mu = 30\text{-}80$. Somit kann auf eine raumseitige dampfbremsende Folie verzichtet werden. Um die Verhinderung der Diffusion auch an den Fügestellen sicher zu stellen, müssen verformbare Kompressionsbänder und/oder Dichtungsschläuche aus geschlossenzelligem Material verwendet werden.

Da die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,13\text{W/(mK)}$ bei einem Minimalaufbau des thermisch aktivierten Massivholzes zur Einhaltung des Gebäudeenergiegesetzes (Gebäudeenergiegesetz - GEG, 2020) nicht ausreichend ist, muss das TAM außenseitig gedämmt werden. Ein großer Vorteil des TAM ist die Tatsache, dass eine zusätzliche Dämmung wärmebrückenfrei angebracht werden kann und verschiedenste Fassadengestaltungen möglich sind. Ein Anbringen von raumseitiger Dämmung ist aber auf Grund des negativen Einflusses auf die hygrothermischen Eigenschaften der Deckschicht nicht möglich. Für die Bemessung der Außendämmung wird als maßgebender Fall das eingeschaltete, also das aktivierte Bauteil betrachtet. Die Systemlufttemperatur muss bei der Bemessung der Dämmung berücksichtigt werden, da diese wesentlich höher ist als die Raumtemperatur.

Brandschutz

Eine brandschutztechnische Einordnung des TAM ist nicht einfach. Da sich Holz und dessen Produkte meist in die Baustoffklasse B2 nach DIN 4102-1:1998-05; (vgl. DIN-Normenausschuss Bauwesen [NABau], 1998) einteilen lassen, müssen diese Bauteile, um höchsten Brandschutzanforderungen zu genügen, zusätzlich mit nichtbrennbaren Plattenwerkstoffen, wie z.B. Gipskartonplatten, verkleidet werden. Eine solche Verkleidung ist beim thermisch aktivierten Massivholz allerdings nur auf der, der hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche (HnAO) möglich, da zusätzliche Plattenwerkstoffe den hygrothermischen Effekt der Deckschicht negativ beeinflussen würden. Es ist also lediglich eine einseitige Beplankung möglich.

Weiter kommt es auf die Produktion des TAM an (vgl. hierzu auch Unterkapitel: Produktion). Es ist denkbar, die Bauteilschichten, wie Kanalebene oder Deckschicht, tragend oder nichttragend auszuführen. Bei einer tragenden Ausführung kann das Holz lediglich die in der DIN EN 1995-1-2:2010-12 genannten Abbrandraten erfüllen (NABau, 2010b) und eventuell nicht einmal die, da es durch Risse in der Deckschicht zu Hohlraumbränden in der Luftkanalschicht kommen kann. Um das Brandverhalten eines TAM eindeutig beschreiben zu können, werden im Forschungsvorhaben InnoCrossLAM Brandversuche durchgeführt (InnoCrossLAM). Die Ergebnisse dieser Versuche liegen zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht vor. Sollten die Schichten aus Luftkanalschicht und Deckschicht als nicht tragend vorgesehen werden, z.B. bei der Ausführung mit einer Lehm- oder Gipskartonplatte als Deckschicht, könnte die Deckschicht das

dahinterliegende TAM vor Brandeinwirkung schützen. Ein solches System müsste bauaufsichtlich zugelassen werden und die Brandwiderstandsdauer anhand der gewählten Deckschichtdicke bestimmt werden.

Eine Einteilung des TAM in Feuerwiderstandsdauern ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Es müssten Untersuchungen in weiterer Forschungsarbeit gemacht werden.

Schallschutz

Bei Brettsperrholzwandelementen wird über zwei- oder mehrschalige Aufbauten versucht die Luftschallübertragung zu verringern bzw. gute Luftschalldämmwerte zu erreichen (Mestek et al., 2016). Der Aufbau mit Luftkanalschicht und Deckschicht entspricht zwar ebenfalls einem mehrschaligen Aufbau wird aber bezogen auf die starre Klebeverbindung oder die Luftkanäle ohne Dämmung kritisch gesehen. Untersuchungen zum Luftschalldämmmaß wurden im Forschungsvorhaben nicht durchgeführt. Diese Untersuchungen wären im Zuge einer Europäisch Technischen Bewertung (ETA) zu tätigen. Ein zusätzlicher Aufbau an der hygrothermisch aktivierte Oberfläche (HAO) ist nicht möglich, da dieser die hygrothermischen Eigenschaften der Deckschicht negativ beeinflussen kann. Der Aufbau einer schallschutztechnischen Schale kann nur an der, der aktivierte Deckschicht abgewandten Seite (HnAO) ausgeführt werden. Eine reine Brettsperrholzwand mit einem Gesamtdicke von 72 mm bis 158 mm kann lediglich ein Luftschalldämmmaß von 32 dB bis 41 dB erreichen, siehe ETA-06/0009 (vgl. Deutsches Institut für Bautechnik, 2017). Die Anforderungen aus der Norm für Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude und in gemischt genutzten Gebäuden liegen bei ≥ 53 dB und somit deutlich über diesen Werten gemäß DIN 4109-1:2018-01 (vgl. NABau, 2018). Ohne einen mehrschaligen Aufbau sind diese Werte also nicht zu erreichen.

Ein möglicher Aufbau richtet sich dabei danach, ob es sich um ein Außenbauteil oder Innenbauteil handelt. Folgend wird gezeigt, wie durch zusätzliche Dämmung an der Außenseite bei Außenwandaufbauten und durch Innendämmung zwischen zwei Innenwänden bei Brettsperrholzbauteilen das Luftschalldämmmaß erhöht werden kann. Die Aufbauten entsprechen geprüften Aufbauten der Fa. Binderholz GmbH.

Abbildung 6 Außenwand – Massivholzbau, Sichtqualität (Binderholz GmbH und Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH)

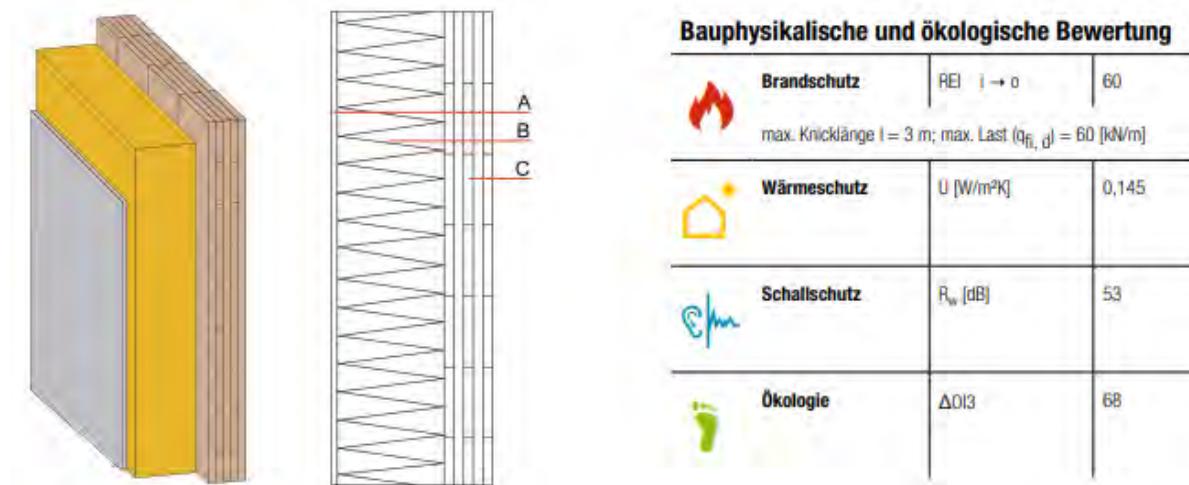
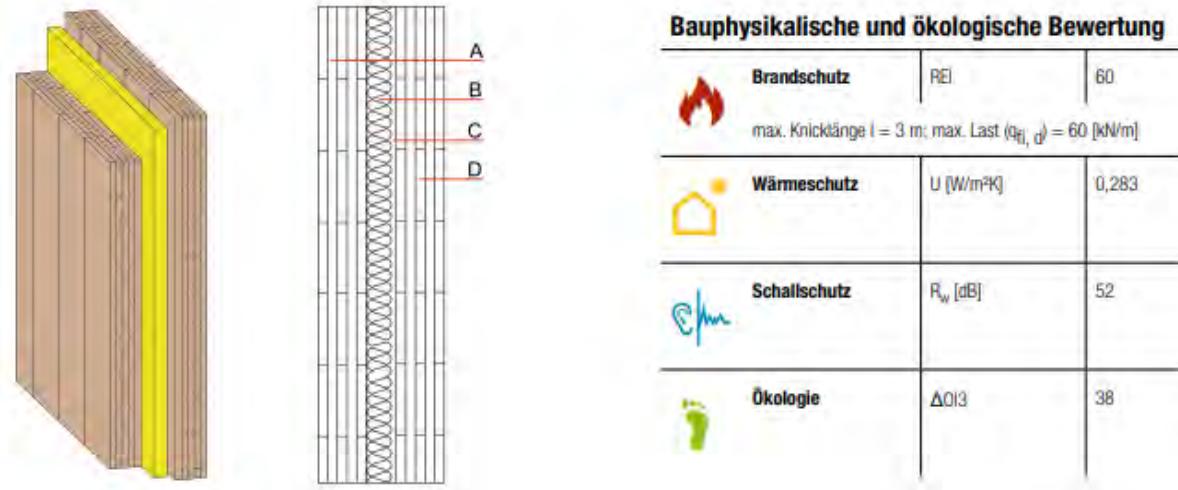


Abbildung 7 Trennwand – Massivholzbau, Sichtqualität (Binderholz GmbH und Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH)

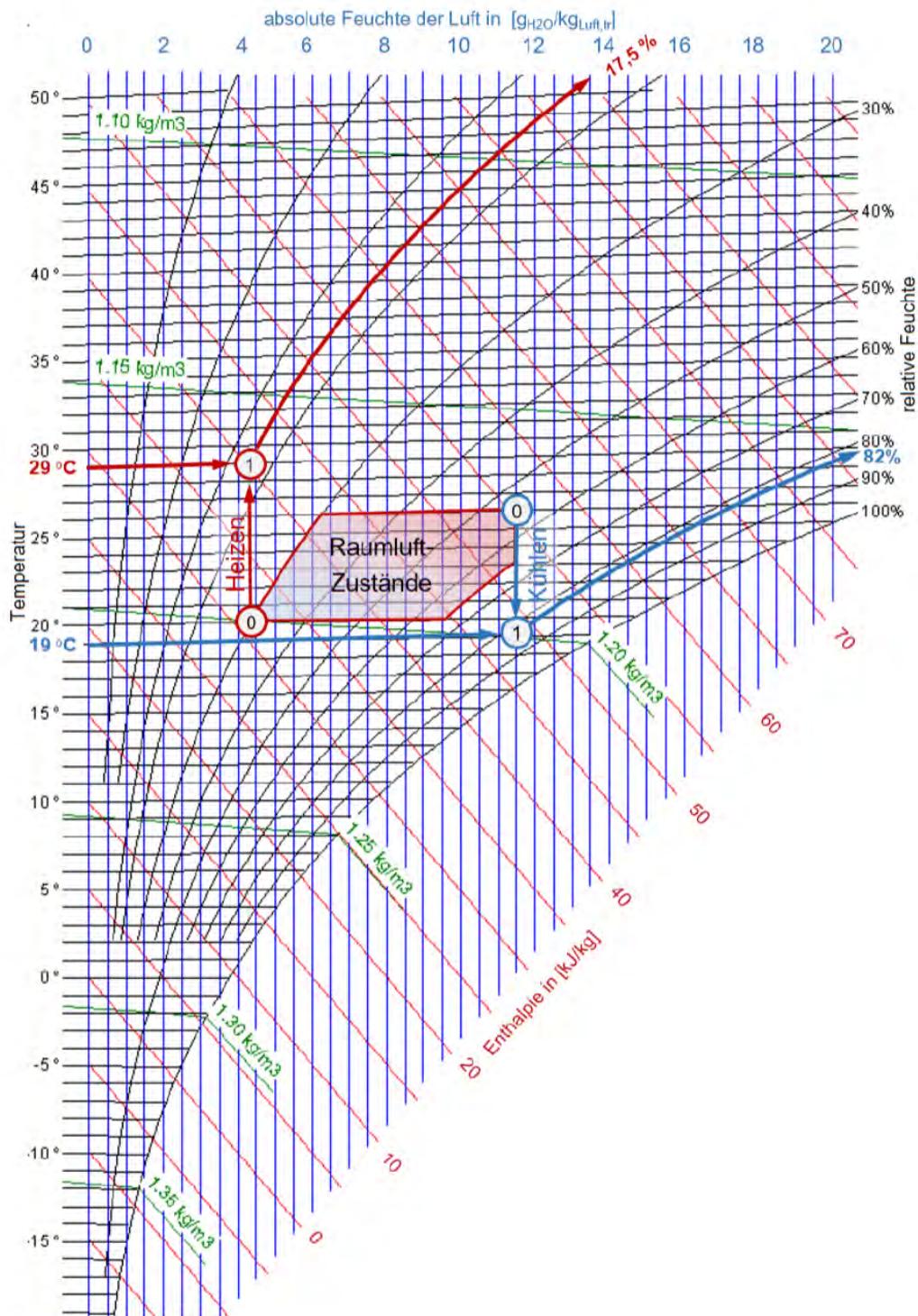


Um die Übertragung von Körperschall auf anschließende Bauteile zu verhindern, können die im Holzbau üblichen Schalldämmänder verwendet werden. In Kapitel VI wird die Position der Bänder in Musterdetails gezeigt.

Holzschatz

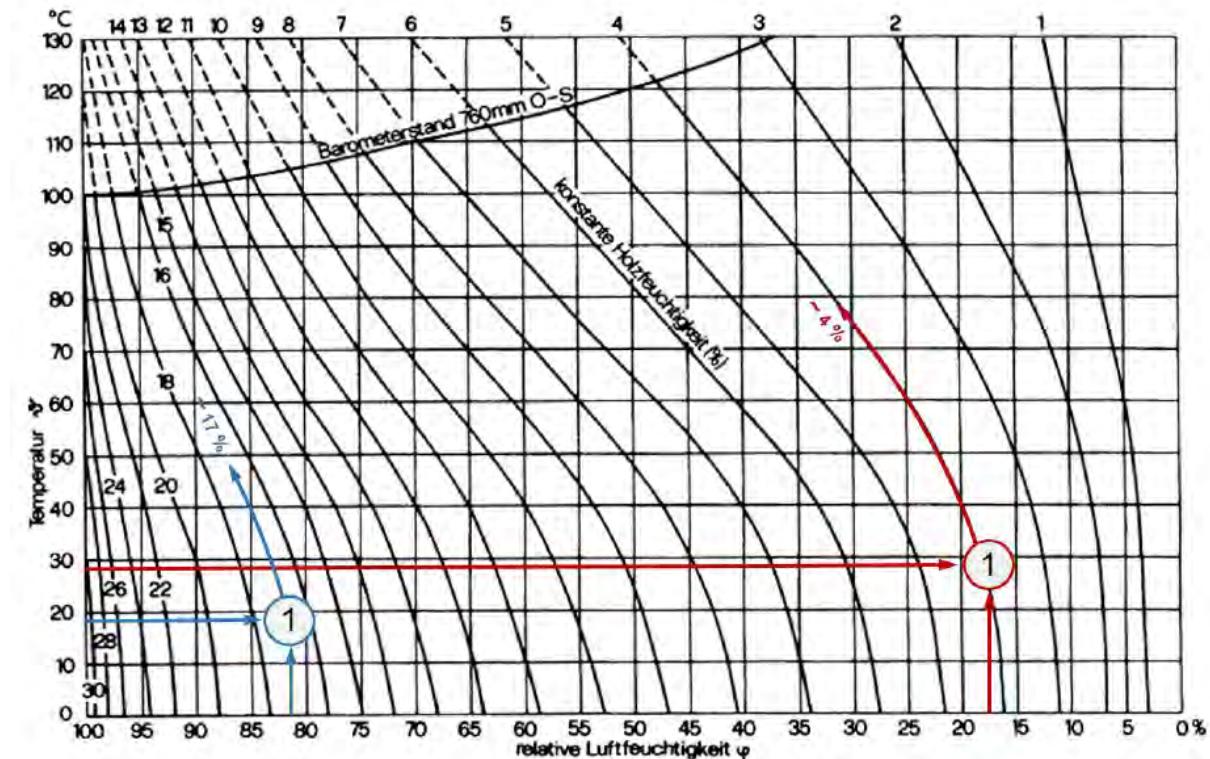
Die Herstellung von Brettsperrholz und die Herstellung von thermisch aktiviertem Massivholz laufen zu großen Teilen analog ab. Beide Holzprodukte werden bzw. sollen aus technisch getrocknetem Brettschnittholz hergestellt werden, dass bei einer Temperatur von $\geq 55^{\circ}\text{C}$ getrocknet wurde (vgl. DIN 68800-1:2019-06, DIN-Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM), 2019). Weiter wird für die Produktion ausschließlich Nadelholz verwendet (vgl. Deutsches Institut für Bautechnik, 2017). Damit ergibt sich für das fertige Bauprodukt eine Holzfeuchte aus dem Werk von $u = 6$ bis 15 % (vgl. ETA-14/0349, Österreichisches Institut für Bautechnik, 2020). Ist das thermisch aktivierte Massivholz erst einmal in Betrieb, ist es nach Mindrup und nach stationärem Ansatz einer relativen Luftfeuchtigkeit von 17,5 % bis 82 % über den jahreszeitlichen Verlauf ausgesetzt (vgl. Mindrup, 2019). Siehe hierzu auch folgende Abbildung.

Abbildung 8 Zustandsänderungen der Raumluft an der thermisch aktivierte Oberfläche; Rot: Heizbetrieb; Blau: Kühlbetrieb für 1,013 bar (Mindrup, 2019)



Angewandt auf das Sorptionsisothermendiagramm für Fichtenholz ergeben sich aus den minimalen und maximalen relativen Luftfeuchten Holzfeuchten von 4 % bis 17 % (Abbildung 9).

Abbildung 9 Prognostizierte minimale und maximale Holzausgleichsfeuchte im Heiz- und im Kühlbetrieb; Sorptionsisothermendiagramm aus: (Niemz & Sonderegger, 2017); (Mindrup, 2019)



Die Holzfeuchte nach der Produktion und während des Betriebs des TAM sowie die Nutzung in Räumen mit üblichem Wohnklima oder vergleichbaren Räumen (z.B. Büroräumen) (NABau, 2019) erlauben eine Einteilung nach DIN 68800-1:2019-06 in die Gebrauchsklasse 0 (GK 0) (NABau, 2019). Ebenso ist eine Einteilung nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 in die Nutzungsklasse 2 (NKL 2) (NABau, 2010a) möglich.

Es zeigt sich damit, dass das thermisch aktivierte Massivholz nach DIN 68800-1:2019-06 ohne zusätzliche Holzschutzmaßnahmen verwendet werden darf.

Hygrothermische Eigenschaften

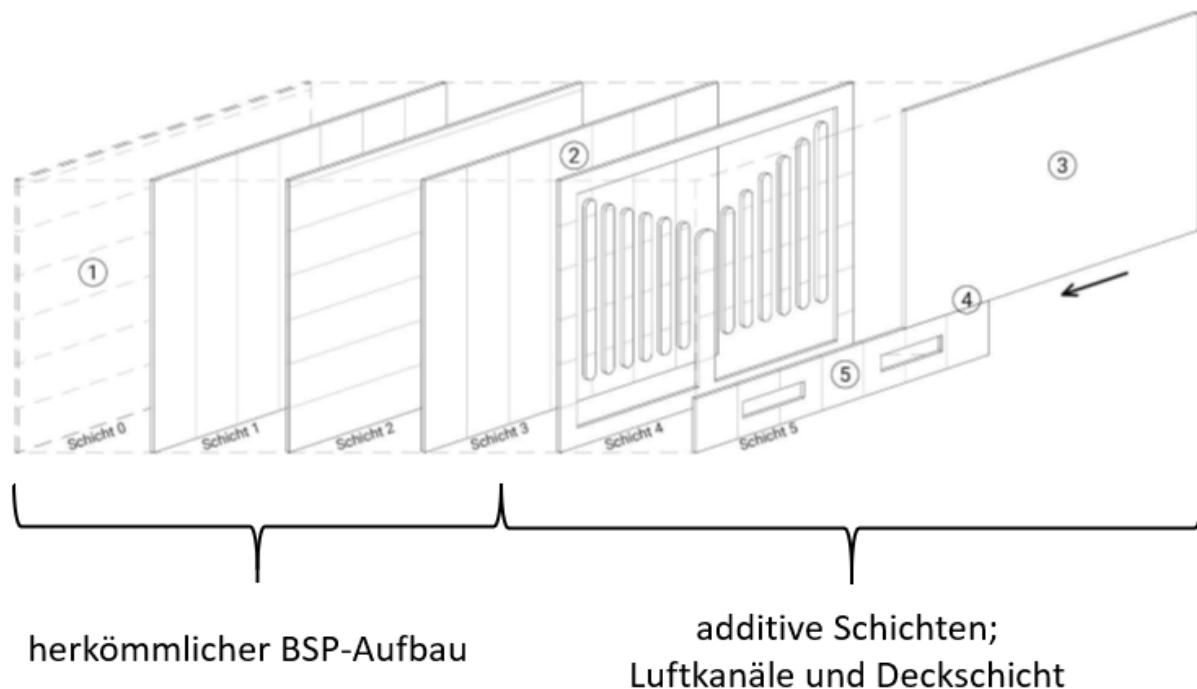
Im Forschungsvorhaben werden verschiedene Materialien für die Verwendung als Deckschicht des TAM untersucht. Voraussetzung für sämtliche Materialien ist die baupraktische Anwendbarkeit. Die Materialien müssen als plattenförmige Bauteile zur Verfügung stehen und über herkömmliche Fügungsmethoden, wie kleben oder schrauben, mit dem thermisch aktivierten Massivholz verbunden werden können. Weiter soll das TAM und im Speziellen die Deckschicht den Raum schnell erwärmen bzw. kühlen. Hierfür benötigt das verwendete Material eine gute Wärmeleitfähigkeit sowie eine gute Wärmespeicherkapazität. Außerdem muss die Deckschicht die Luftfeuchtigkeit im Raum gut aufnehmen und wieder abgeben können. Hierfür wird eine hohe Hygroskopizität benötigt (vgl. Kapitel III).

Produktionsvarianten von thermisch aktiviertem Massivholz

Nils Schumacher

Bei dem Grundprodukt für die Herstellung des thermisch aktivierte Massivholzes (TAM) handelt es sich um Brettsperrholz. Das TAM besteht auf einem mehrschichtigen Aufbau aus Brettsperrholz mit einer zusätzlichen Schicht für die Luftkanäle sowie einer Deckschicht, die die offenen Luftkanäle abschließt (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 10 Exemplarischer Aufbau eines thermisch aktivierte Massivholzes, nach (Pape, 2020)



Um dem Nachhaltigkeitsgedanken des Ein-Stoff-Konzepts zu entsprechen, werden im Folgenden Produktionsstrategien entwickelt, die sich in den bestehenden Produktionsablauf von Brettsperrholz eingliedern. Hierbei wird auf den Einsatz von zusätzlichen z.B. metallischen Verbindungsmittel verzichtet, um weiterhin sortenrein zu bleiben. Aber auch weitere Produktionsmöglichkeiten unter Verwendung zusätzlicher Bauprodukte werden beschrieben.

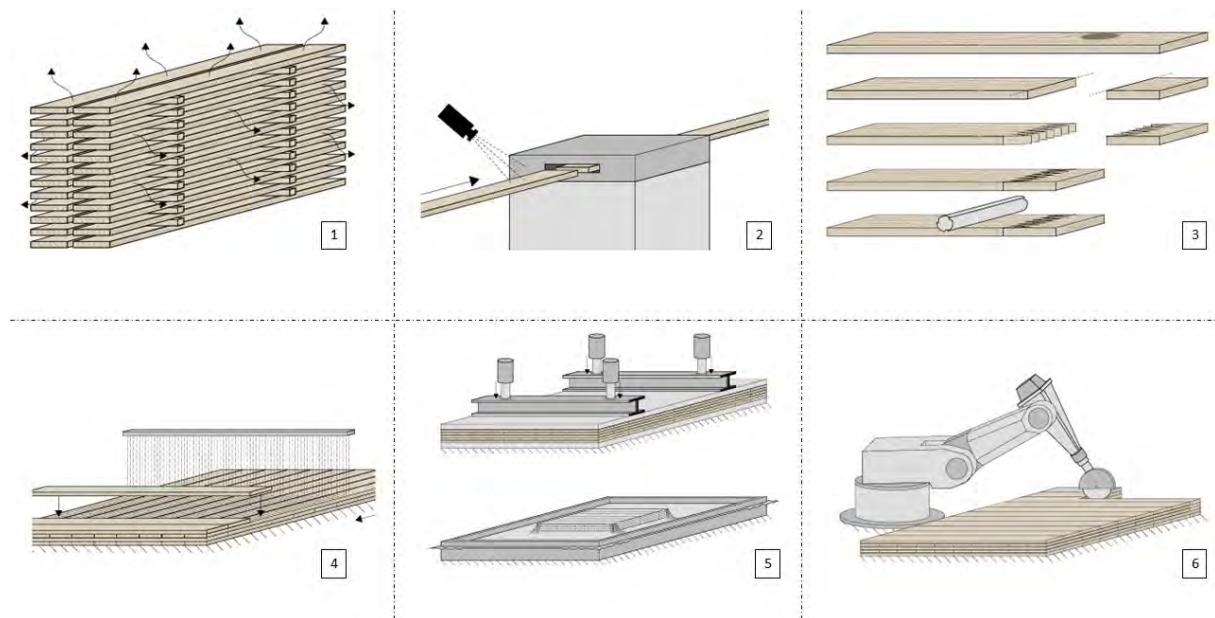
Vorab wird die Brettsperrholzherstellung nach aktuellem Stand der Technik erläutert:

- Trocknung der Brettlamellen auf eine Holzfeuchte von $12\% \pm 2\%$ und darunter. Die Trocknung erfolgt im Allgemeinen in technischen Trocknungskammern.
- Visuelle oder maschinelle Festigkeitssortierung der Brettlamellen.
- Stellen der Brettlamelle, die die Festigkeit oder das Aussehen beeinträchtigen, werden herausgeschnitten. Anschließend wird die Brettlamelle bzw. der Brettab schnitt über eine Keilzinkenverklebung wieder zusammengefügt. Es entsteht eine Endloslamelle, die auf die gewünschte Länge gekürzt wird. Anschließend erfolgt die Oberflächenbearbeitung sowie die Herstellung der gewünschten Brettdicke mittels hobeln oder schleifen.
- Die auf die gewünschte Länge abgeschnittenen Brettlamellen werden lagenweise in ein Pressbett gelegt. Nach jeder Lage wird Klebstoff auf die Brettlamellen aufgebracht. Im Allgemeinen wird die jeweils folgende Brettlage 90° gedreht zu der darunter befindlichen Brettlage eingebaut. Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften verkleben einige Hersteller ihre Bretterlagen auch an der Schmalseite. Dies

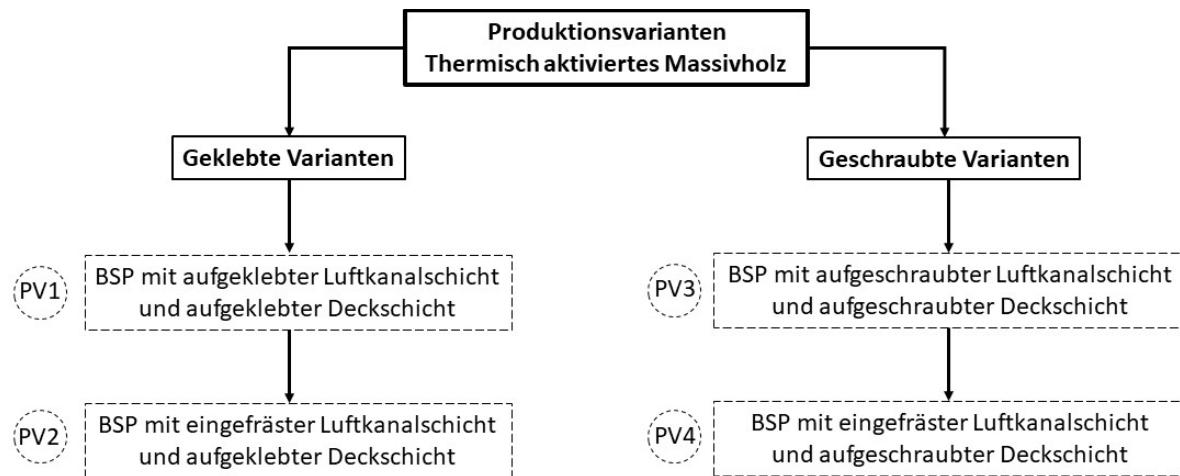
kann durch vorproduzierte Massivholzplatten geschehen oder durch das Aufbringen von Klebstoff an der Schmalseite der Brettlamelle gleichzeitig zum lagenweisen Einlegen der Brettlamellen. Im anschließenden Herstellungsschritt, dem Pressen, muss zusätzlich ein seitlicher Druck auf das Brettpaket aufgebracht werden.

- Der benötigte Pressdruck für die Verklebung wird hydraulisch oder im Vakuumverfahren aufgebracht.
- Durch den anschließenden Abbund werden die Außenabmessungen des Elements sichergestellt. Aber auch die Herstellung von Öffnungen wie Türen oder Fenster sind im Produktionsprozess möglich.

Abbildung 11 Herstellungsprozess von Brettsperrholz; nach (Mestek et al., 2016)



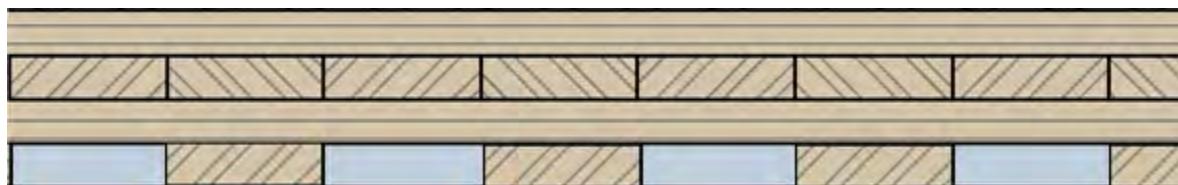
Es zeigt sich, dass die Brettsperrholzherstellung sehr aufwendig ist und ohne den Einsatz von moderner Maschinentechnik nicht wirtschaftlich umsetzbar ist. Um auch ein thermisch aktiviertes Brettsperrholz wirtschaftlich zu produzieren, wird daher eine Herstellung mit bestehender Technik sowie eine Einbindung in die bestehende Produktionsreihenfolge angestrebt. Die Untersuchungen von Mindrup haben gezeigt, dass je näher sich die thermisch aktivierte Bauteilschicht an der Oberfläche des Bauteils befindet, desto größer ist ihre thermische Leistungsfähigkeit (vgl. Mindrup, 2019). Aus diesem Grund wird bei der Entwicklung von Produktionsabläufen lediglich ein Aufbau untersucht, dessen thermisch aktivierte Bauteilschicht sich direkt hinter einer einlagigen Deckschicht befindet. Betrachtet man zu den ausschließlich geklebten Bauteilen noch Aufbauten mit geschraubten Bauteilschichten ergeben sich folgende Varianten, die in Abbildung 12 dargestellt sind.

Abbildung 12 Produktionsvarianten für thermisch aktivierte Massivholzelemente (eigene Darstellung)


BSP mit aufgeklebter Luftkanalschicht und aufgeklebter Deckschicht (PV1)

Als Grundprodukt wird ein mehrlagiges BSP (Brettsperrholz) verwendet, auf das der weitere Aufbau, wie die Luftkanalschicht und die Deckplatte, aufgeklebt wird. Die Ermittlung der benötigten Schichten des Grundprodukts erfolgt vorrangig durch eine statische Berechnung, aber auch der Wärmeschutznachweis ist bei der Schichtwahl zu berücksichtigen. Da alle Schichten des Endprodukts flächig miteinander verklebt werden, können auch die Schichten, wie die Luftkanalschicht und die Deckschicht statisch tragend angenommen werden. Hierzu werden im Forschungsprojekt (InnoCrossLAM) zum aktuellen Zeitpunkt mechanische Prüfungen durchgeführt. Als Deckschicht kann sowohl eine schmaleseiten verleimte Vollholzplatte als auch eine Dreischichtplatte verwendet werden.

Für die beschriebene Produktionsweise sind sämtliche Bauteile für die Luftkanalschicht bereits vorproduziert worden. Die Bauteile werden mit Klebstoff bestrichen und anschließend auf die exakte Position auf das Brettsperrholzelement gelegt. Der Klebstoffauftrag kann handisch oder aber selektiv über eine Beleimungsmaschine aufgetragen werden. Um ein nachträgliches Verschieben der Kanalbauteile auf dem Brettsperrholzelement beim Pressvorgang zu vermeiden, wird eine Schablone auf die Kanalbauteile gelegt. Anschließend wird der Aufbau in der Presse zu einem Brettsperrholz mit Luftkanalschicht gepresst (Abbildung 13).

Abbildung 13 Zwischenprodukt: Brettsperrholzgrundprodukt mit aufgeklebter Kanalschicht (eigene Darstellung)


Der unter der Luftkanalschicht befindliche vollflächige Brettsperrholzaufbau kann bereits vorab gepresst werden oder mit der Kanalschicht erstmals gepresst werden. Um die Deckschicht auf den Aufbau aus BSP und Luftkanalschicht zu kleben, wird erneut ein selektiver Leimauftrag auf die Kanalwände sowie den - das Bauteil umschließenden - Rahmen benötigt. Der exakte Klebstoffauftrag wird notwendig, um ein Eindringen des Klebstoffs in den Luftkanal zu vermeiden. Klebstoff im Luftkanal würde den Querschnitt des Kanals abmindern sowie die Oberflächenbeschaffenheit der umgebenden Holzbauteile nachteilig verändern.

Abschließend wird die Deckschicht auf das Zwischenprodukt gelegt und der Gesamtaufbau erneut gepresst.

Vorteile der Produktionsvariante PV1

- Sämtliche Produktionsschritte können mit einigen wenigen Ausnahmen mit der bei den Herstellern vorhandenen Maschinentechnik ausgeführt werden.
- Die Produktionsvariante verwendet außer Holzklebstoffen keine weiteren Verbindungsmittel und kann so der Ein-Stoff-Philosophie bzgl. der Weiterverwertung betrachtet werden.
- Es fallen weniger Zerspanungsabfälle gegenüber der Produktionsvariante PV2 an.

Nachteile der Produktionsvariante PV1

- Nach bisherigem Kenntnisstand der Produktionstechnik muss für diese Produktionsvariante das thermisch aktivierte Massivholz zweimal gepresst werden, da sich bei einem Pressvorgang sie Luftkanalschicht verschieben könnte.

BSP mit gefräster Luftkanalschicht und aufgeklebter Deckschicht (PV2)

Entgegen der vorherigen Produktionsweise wird das Brettsperrholz als Grundprodukt mit einer zusätzlichen Holzschicht ausgeführt. Der Aufbau besteht somit aus den statisch benötigten Schichten und einer zusätzlichen Schicht. In die zusätzliche Schicht des Brettschichtholzes werden die für das thermisch aktivierte Massivholz benötigten Luftkanäle hineingefräst. Das Einfräsen erfolgt dabei über CNC-gesteuerte Abbundtechnik. Ein händischer Abbund wäre ebenso denkbar, jedoch wahrscheinlich nur für geringe Stückzahlen wirtschaftlich. Anschließend werden auf die Luftkanalwände und auf den umgebenden Rahmen des Zwischenprodukts Klebstoff aufgetragen. Dieser kann händisch oder mittels selektivem Klebstoffauftrag erfolgen. Es sind Klebstoffeinschlüsse in den Luftkanälen zu vermeiden.

Als letzter Produktionsschritt erfolgt wieder das Auflegen der Deckschicht und das abschließende Pressen. Analog zur vorherigen Produktionsweise. Auch hier kann als Deckschicht wieder eine schmalseiten verleimte Vollholzplatte als auch eine Dreischichtplatte verwendet werden.

Vorteile der Produktionsvariante PV2

- Sämtliche Produktionsschritte können mit einigen wenigen Ausnahmen mit der bei den Herstellern vorhandenen Maschinentechnik ausgeführt werden.
- Die Produktionsvariante verwendet außer Holzklebstoffen keine weiteren Verbindungsmittel und kann so der Ein-Stoff-Philosophie bzgl. der Weiterverwertung betrachtet werden.
- Entgegen der Produktionsvariante PV1 wird für die Herstellung nur ein Pressvorgang benötigt.

Nachteile der Produktionsvariante PV2

- Beim Fräsen der Luftkanalschicht entstehen viel Abfall in Form von Holzspänen aus technisch einwandfreiem Holz.

BSP mit aufgeschraubter Luftkanalschicht und aufgeschraubter Deckschicht (PV3)

Als Grundprodukt wird ein herkömmliches Brettsperrholzelement entsprechend des Stands der Technik mit der benötigten Anzahl an Schichten produziert. Sämtliche weitere Bauteile wie die Bauteile für die Herstellung von Luftkanälen und die Deckschicht werden additiv auf das Grundprodukt geschraubt. Als Weiterentwicklung können bei dieser Herstellungsvariante Deckschichten aus weiteren Baustoffen, wie Lehmauplatten oder Gipsbauplatten, montiert werden. Diese Materialien beeinflussen die hygrothermischen Eigenschaften des TAM's.

Vorteile der Produktionsvariante PV3

- Es wird nur ein Pressvorgang für die Produktion des Grundprodukts benötigt. Zudem muss die Produktion nicht angepasst werden, da die Herstellung der Luftkanalschicht und der Deckschicht in einem separaten Arbeitsschritt durchgeführt werden. Dieser Arbeitsschritt kann in einer Werkhalle oder vor Ort auf der Baustelle ausgeführt werden.
- Der Einsatz von weiteren Baumaterialien z.B. als Deckschicht ist möglich.
- Sämtliche Schraubenverbindungen können problemlos wieder entfernt werden. Damit können Deckschichten aus Lehm oder Gips ebenfalls sortenrein entsorgt werden.

Nachteile der Produktionsvariante PV3

- Das Lösen der Schrauben beim Rückbau ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt, der bei den Produktionsvarianten PV1 und PV2 vermieden werden kann.
- Lediglich das Grundprodukt aus BSP kann für den Lastabtrag in Ansatz gebracht werden. Auf Grund fehlender Untersuchungen, der komplexen Geometrie sowie den verschiedenen Bauteilstiefigkeiten wird von einem rechnerischen Ansatz der beiden aufgeschraubten Schichten zum Zeitpunkt des Projektendes abgeraten.

BSP mit eingefräster Luftkanalschicht und aufgeschraubter Deckschicht (PV4)

Die Herstellung eines Brettsperrholzelements mit eingefrästen Luftkanälen erfolgt wie in der Produktionsvariante PV2 beschrieben. Anschließend wird eine Deckplatte aus Holz oder anderen Baumaterialien auf die Luftkanalschicht geschraubt.

Vorteile der Produktionsvariante PV4

- Das Brettsperrholz mit eingefrästen Kanälen kann, wie im Forschungsvorhaben (InnoCrossLAM) untersucht, statisch berücksichtigt werden. Dies ist vorteilhaft gegenüber der Produktionsvariante PV3.

Nachteile der Produktionsvariante PV4

- Das Lösen der Schrauben beim Rückbau ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt, der bei den Produktionsvarianten PV1 und PV2 vermieden werden kann.
- Die unterschiedlichen Produktionsvarianten zeigen, dass es bereits mit der bestehenden Maschinentechnik möglich ist das thermisch aktivierte Massivholz industriell zu fertigen. Auch bei anfänglich evtl. geringeren Stückzahlen wird keine neue bzw. zusätzliche Produktionstechnik benötigt.

Montagehinweise für thermisch aktiviertes Massivholz

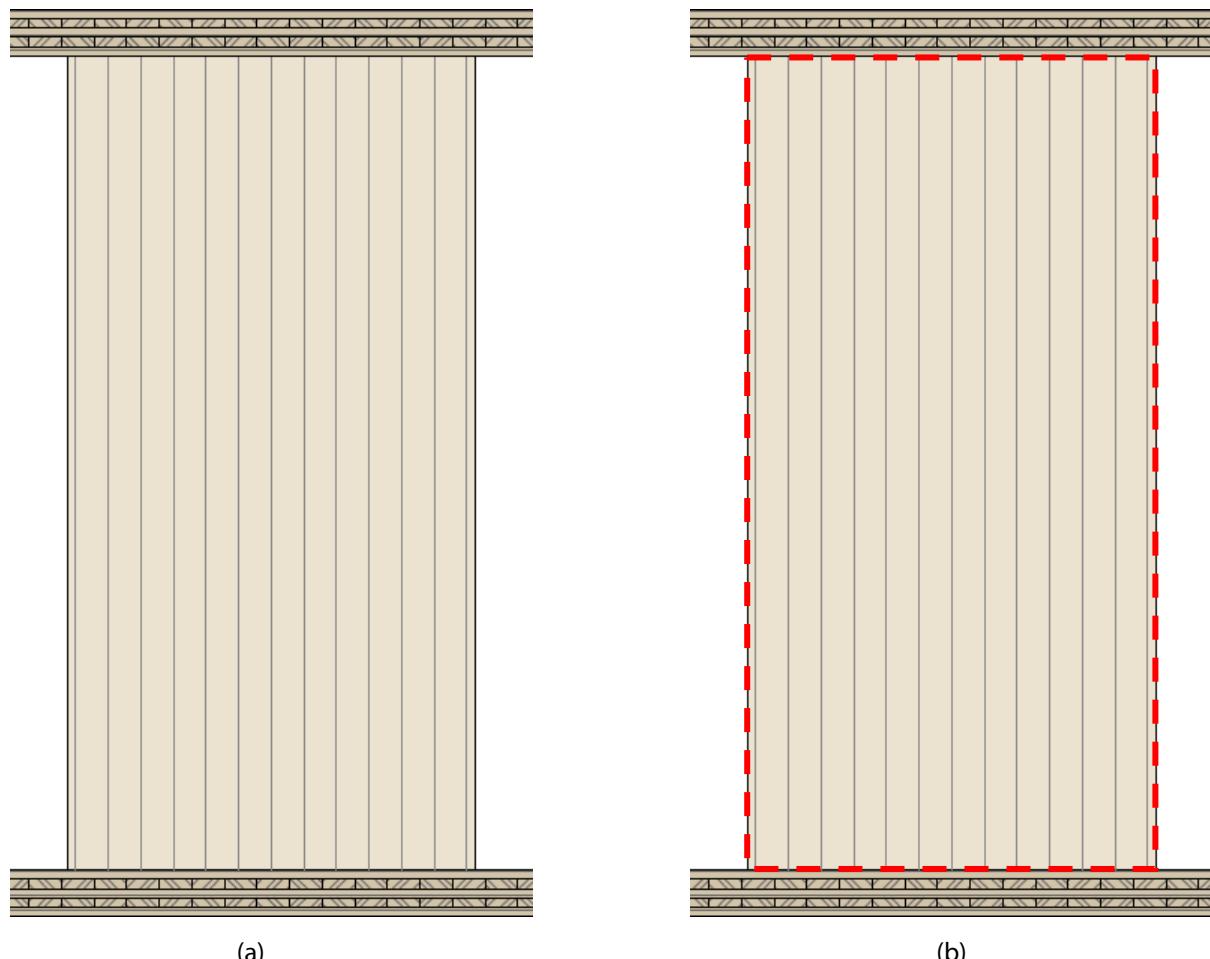
Nils Schumacher

Das thermisch aktivierte Massivholz entspricht nicht nur optisch einem herkömmlichen Brettsperrholz, sondern ist auch bei der Montage gut mit dem bekannten Vollholzprodukt zu vergleichen. Wie in den meisten Europäisch Technischen Bewertungen für Brettsperrholz beschrieben, sind auch für den Einbau eines thermisch aktivierten Massivholzes die Bestimmungen zur Arbeitssicherheit und zum Gesundheitsschutz zu beachten und von qualifiziertem Personal auszuführen (Deutsches Institut für Bautechnik, 2017). Da Brettsperrholz ebenso wie das thermisch aktivierte Massivholz aus industriell getrockneten Bretterlamellen hergestellt wird, hat das Endprodukt eine geringe Holzfeuchte von $u = 6 - 15\%$. Bei der Montage sind die Bauteile daher vor Witterungseinflüssen zu schützen, um eine unkontrollierte Auffeuchtung zu vermeiden.

Es gibt aber auch essentielle Unterschiede zwischen den beiden Produkten, die besonders in der Montage zu berücksichtigen sind, da es ansonsten zu Bauschäden kommen kann. Im Folgenden wird auf die montagespezifischen Anforderungen eingegangen.

Befestigungsmittel an der hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche (HnAO)

Abbildung 14 (a) Ansicht hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche, (b) Bereich für Befestigungsmittel (eigene Darstellung)



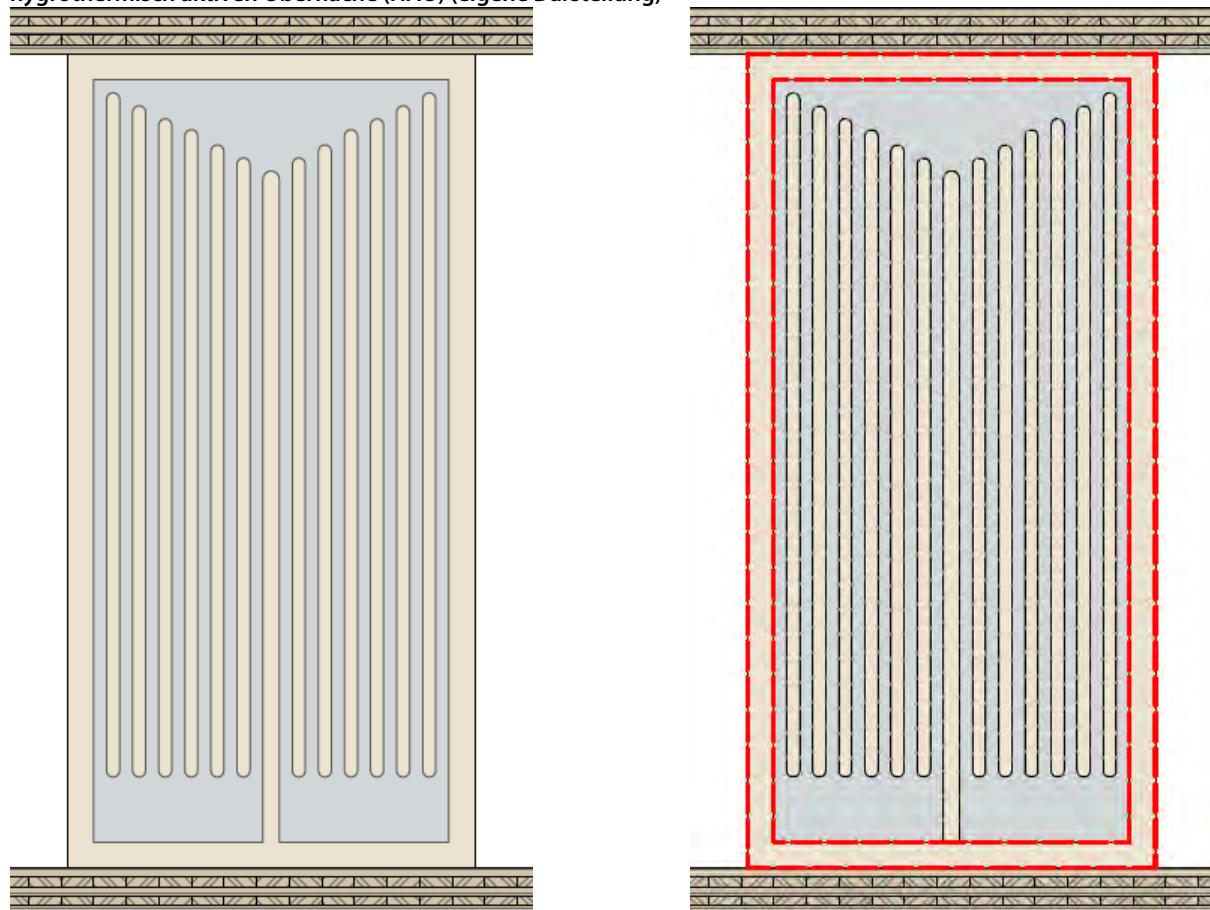
Auf dieser Bauteilseite verhält sich das TAM analog zum Brettsperrholz. Auf der kompletten Bauteilfläche ist, unter Berücksichtigung der normativen Randabstände (EC5), die Anbringung von Verbindungsmittern möglich. Lediglich die Länge der Verbindungsmitte ist auf die Breite des Grundprodukts (thermisch aktiviertes

Massivholz ohne Deckschicht und Luftkanalschicht) zu begrenzen, um die Luftkanalschicht nicht zu beschädigen. Das Aufbringen von Verbindungsmittel auf dieser Seite bringt auch einige Nachteile mit sich, die sich auf die stetig größer werdende Vorfertigung im Holzbau beziehen. So ist es nicht mehr möglich das TAM mit anderen Bauteilen wie z.B. einer Decke zu befestigen, sobald Bauteile wie Dämmung und Fassade bereits montiert sind. Aus diesem Grund muss ein Aufbringen von Verbindungsmittel von der Deckschichtseite her möglich sein.

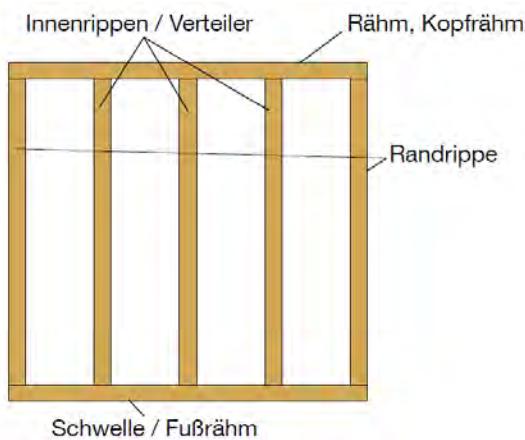
Befestigungsmittel an der hygrothermisch aktivierte Oberfläche (HAO)

Es ist darauf zu achten, dass sich keine Verbindungsmittel in der Luftkanalschicht befinden, da diese die Strömungseigenschaften im Luftkanal negativ beeinträchtigen können und bei metallischen Verbindungsmitteln zu einer ungewollten Wärmeübertragung führen können. Betrachtet man den mehrschichtigen Aufbau des TAM stellt man schnell fest, wo die Bauteilschichten von der jeweiligen Außenkante bis zur gegenüberliegenden Außenkante durchgehen. Vernachlässigt man die innenliegenden Kanalwände, ergibt sich an den Außenkanten des TAM (oben, unten, seitlich) ein konstruktiver „Rahmen“. Dieser „Rahmen“ soll für die Montage von Befestigungsmitteln genutzt werden (Abbildung 15).

Abbildung 15 (a) Ansicht Luftkanalschicht ohne Deckschicht, (b) „Rahmen“ für Befestigungsmittel auf der hygrothermisch aktiven Oberfläche (HAO) (eigene Darstellung)



Auch bei nachträglich aufgeschraubten Luftkanalschichten und Deckschichten soll der in Abbildung 15 markierte Bereich genutzt werden, da Verbindungsmittel im restlichen luftdurchströmten Bereich störend sind. Vergleicht man den markierten Bereich mit dem Aufbau einer Holztafelbauwand lassen sich gute Übereinstimmungen erkennen. Der Rahmen beim TAM entspricht Rähm, Schwelle und Randrippe der Tafelbauwand (Abbildung 16). Unter Einhaltung der normativen Randabstände können die gleichen Verbindungsmittel wie im Holzrahmenbau zum Einsatz kommen.

Abbildung 16 Aufbau einer Holzrahmenbauwand, nach (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

In Kapitel VI werden Musterdetails für das Fügen des TAM mit weiteren Bauteilen gezeigt. Auf den fachgerechten Einbau anhand der gezeigten Details ist zu achten.

Betrieb von thermisch aktivierten Massivholzelementen

Nils Schumacher

Der Betrieb bzw. die Nutzungsdauer einer baulichen Anlage wird in Deutschland bei Wohnhäusern mit einer Zeitspanne von 25 bis 80 Jahren angegeben und bei Geschäfts- und Bürohäusern mit 30 bis 60 Jahren. Diese Aussage beruht auf Erfahrungssätzen und wurde im (BGBl. I S.1183, 2006) veröffentlicht.

Diese Zeitspannen decken sich mit den vorgesehenen Nutzungsdauern für Brettsperrholz. In den jeweiligen Europäisch Technischen Zulassungen wird, bei Erfüllung der festgelegten Bedingungen für die Verwendung, Wartung und Instandsetzung, von einer Nutzungsdauer des Produkts im eingebauten Zustand von 50 Jahren ausgegangen. Beispielsweise (Deutsches Institut für Bautechnik, 2017). Der Verwendungszweck bei Brettsperrholz ist als tragendes oder nichttragendes Bauelement unter statischen und quasistatischen Einwirkungen in den Nutzungsklassen 1 und 2 (Deutsches Institut für Bautechnik, 2017) klar definiert. Nach den Erkenntnissen im Forschungsprojekt können diese Nutzungsdauern auch von einem thermisch aktivierten Massivholz erreicht werden, da die Untersuchungen zu den Systemtemperaturen bisher keine Schädigung in Form von Rissen hervorgerufen haben, die die mechanische Tragfähigkeit beeinflussen würden. Vergleiche hierzu das Kapitel II, Unterkapitel: Systemtemperaturen.

Wartung und Erneuerung

Die Wartung und Erneuerung eines thermisch aktivierten Massivholzes ist stark von der Produktionsvariante abhängig. Bei der Produktionsvariante PV1 und PV2 werden sämtliche Bauteile, wie das dreischichtige Brettsperrholzgrundprodukt, die Luftkanalschicht und die Deckplatte entweder geklebt oder aus einem geklebten Bauteil gefräst. Auch ein herkömmliches Brettsperrholzprodukt wird ausschließlich über Klebeverbindungen gefügt, weshalb die beiden Produkte bzgl. Wartung und Erneuerung gut zu vergleichen sind.

In den Europäisch Technischen Bewertungen für Brettsperrholz wird davon ausgegangen, dass die Bewertung der Eignung für den Verwendungszweck (als tragendes bzw. nichttragendes Bauteil, vgl. oberer Abschnitt) unter der Annahme getroffen wurde, dass eine Wartung während der Nutzung nicht erforderlich ist. Sollte es jedoch zu schwerwiegenden Beschädigungen kommen, sind Erhaltungsmaßnahmen für die Tragfähigkeit vorzunehmen und das Bauteil ggf. auszutauschen. Beispielsweise: (Deutsches Institut für Bautechnik, 2017). Auch beim thermisch aktivierten Massivholz wäre eine Wartung auszuschließen, da ein Austausch von geklebten Einzelteilen, wie z.B. ein Austausch der geklebten Deckschicht wirtschaftlich und technisch kaum möglich wäre. Bei schwerwiegenden Beschädigungen wäre ebenfalls ein Kompletaustausch vorzunehmen.

Thermisch aktivierte Massivholzelemente die nach der Produktionsvariante PV3 oder PV4 hergestellt wurden, besitzen in Bezug auf Wartung des Produkts klare Vorteile gegenüber den geklebten Elementen. Sämtliche geschraubte Aufbauten, wie die Deckschicht oder evtl. sogar die Luftkanalschicht, können wieder zurück gebaut werden und anschließend durch neue Baumaterialien ersetzt werden. Eine Besonderheit stellt hier eine Eckverbindung zweier Elemente dar. In Kapitel VI, Unterkapitel: Ausarbeitung von Mustersystemlösungen und -details der Bautechnik für die in Kapitel I definierten Anforderungen, ist eine Eckverbindung für aufgeschraubte Bauteilschichten dargestellt. Bei sämtlichen Versuchsreihen im Forschungsvorhaben konnten keine Nutzungseinschränkungen bei den Deckschichten Vollholzplatte, Dreischichtplatte, Lehmplatte, Gipskartonplatte und Gipskartonplatte mit Graphitanteil durch die Beanspruchung mit hohen relativen Luftfeuchten sowie bei hohen Temperaturen festgestellt werden. Die Temperaturen, mit denen das TAM im Testkubus befahren wurde, haben auch aus brandschutztechnischer Sicht eine Systemtemperatur von 45°C nicht überschritten. Damit liegt die Systemtemperatur unter der vom Außenklima erzeugten Temperatur im Sommer und stellt somit auch kein besonderes Gefahrenpotenzial dar, welches eine Wartung erforderlich machen würde. Wie im Kapitel I, Unterkapitel: Anforderungen aus der Bauphysik gezeigt wird befinden sich die erwarteten relativen Raumluftfeuchten im Bereich von 17,5 % und 82 %. Damit kann die Vollholzplatte und die Dreischichtplatte in die Nutzungsklasse 2 eingeordnet werden. Lehmbaustoffe selbst sind gegenüber

hygroskopischen Feuchteinwirkungen (Sorption) unempfindlich (Volhard & Röhlen, 2002) und Gipskartonplatten bleiben formstabil bis zu einer maximalen relativen Luftfeuchte von 80 % (Saint-Gobain Rigips GmbH, BBU, 2015). Somit kann auch hier eine Wartung auf Grund der thermischen Aktivierung quasi ausgeschlossen werden.

Rückbaubarkeit von thermisch aktiviertem Massivholz

Nils Schumacher

Den Rückbau eines Gebäudes zu vermeiden bedeutet auch den damit verbundenen Abfall zu vermeiden. Die Vermeidung ist der erste Punkt der Abfallhierarchie (Meinlschmidt et al., 2016) und sollte mit Hilfe von Instandsetzungsmaßnahmen immer anderen Alternativen, wie der Beseitigung, vorgezogen werden.

Ist ein Gebäude oder eine bauliche Anlage trotz kontinuierlicher Instandsetzung am Ende seines Lebenszyklus angekommen, folgt Abbruch, Rückbau oder Demontage. Da ein Gebäude aus Holzbauprodukten, ebenso wie das thermisch aktivierte Massivholz, über stiftförmige Verbindungsmitte, wie Schrauben und Nägel, miteinander verbunden ist, ist anstatt von Abbruch oder Rückbau eine Demontage der einzelnen Holzbauprodukte möglich. Diese Möglichkeit stellt bezogen auf den Arbeitsaufwand zwar den höchsten Einsatz dar, garantiert aber auch den höchst möglichen Grad an möglicher Wiederverwendung oder Weiterverwendung.

Grundsätzlich sind folgende Vorgänge nach aufsteigendem Arbeitsaufwand möglich:

- Konventioneller Abbruch
- selektiver Abbruch
- Selektiver Rückbau
- **Demontage zur Verschrottung/Verwertung**
- **Demontage zur Wiederverwendung/Weiterverwendung**

Alle Vorgänge von (Hillebrandt et al., 2018)

Nach der Demontage sind zwei Schritte möglich, die Verschrottung/Verwertung oder die Wiederverwendung/Weiterverwendung. Auf Grund der stetig steigenden Rohstoffpreise ist eine Wiederverwendung sämtlicher Bauprodukte erstrebenswert und im Falle des thermisch aktivierten Massivholzes auch sehr gut möglich. Sollte es jedoch trotz sorgfältiger Demontage oder im Laufe des Betriebs zu Schädigungen des TAM kommen sein, ist ein Downcycling ebenfalls machbar. Das TAM kann, mit Ausnahme evtl. variierender Deckschichten, nach der AltholzV in die Altholzkategorie A II (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamtes für Justiz, 2020) eingeteilt werden. Eine aufgeschraubte Deckschicht hat hier keinen Einfluss auf die Einteilung in die Altholzkategorien, es ist jedoch bei der Demontage als zusätzlicher Arbeitsschritt zu berücksichtigen.

Um die Prozesse am Ende eines Lebenszyklus eines thermisch aktivierten Massivholzes zu verstehen, muss man die Definitionen folgender Grundbegriffe kennen.

- **Altholzkategorie A II:** verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel. Definition aus (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamtes für Justiz, 2020)
- **Demontage:** Die einzelnen Bauteile werden in umgekehrter Montagereihenfolge sorgfältig auseinandergenommen. Definition angelehnt an (Hillebrandt et al., 2018)
- **Downcycling:** Rückführung und Aufbereitung ehemals genutzter Produkte oder Abfälle, wobei das Produkt durch Leistungsverlust im Aufbereitungsprozess nicht mehr die gleiche Qualitätsstufe wie das Ausgangsprodukt erreicht (Hillebrandt et al., 2018)

- **Weiterverwendung:** Erneute Verwendung eines gebrauchten Produkts für einen anderen Verwendungszweck mit gegenüber dem Ursprungszweck niedrigerem Qualitätsanspruch unter Beibehaltung der Produktgestalt (Hillebrandt et al., 2018)
- **Weiterverwertung:** Einsatz von Altstoffen und Produktionsabfällen bzw. Hilfs- und Betriebsstoffen in einem von diesen zuvor noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess. Durch Weiterverwertung entstehen Produkte mit neuen bzw. anderen Eigenschaften und/oder anderer Gestalt, sogenannte Sekundärwerkstoffe, mit einem gegenüber dem Ursprungszweck niedrigeren Qualitätsanspruch (Downcycling) (Hillebrandt et al., 2018)
- **Wiederverwendung:** Erneute Verwendung eines gebrauchten Produkts für den gleichen Verwendungszweck unter Beibehaltung der Produktgestalt (Hillebrandt et al., 2018)

Am Beispiel der ausgearbeiteten Musteraufbauten und Musterdetails werden die genannten Begriffe: Altholzkategorie A II, Demontage, Downcycling, Recycling, Wiederverwendung, Wiederverwertung und Weiterverwendung erklärt.

Demontage

Bevor mit der Demontage des TAM bzw. des Wandaufbaus mit thermisch aktiviertem Massivholz begonnen werden kann, muss geklärt werden, ob das TAM bzw. der Wandaufbau tragend oder nichttragend in das Gebäude eingebaut wurde. Ist der Aufbau nichttragend, kann sofort mit der Demontage und dem Lösen der stiftförmigen Verbindungsmittel begonnen werden. Ist der Aufbau tragend, so muss das Gebäude wie in der Definition beschrieben in umgekehrter Montagereihenfolge auseinanderggebaut werden. Ist nur der Aufbau aus dem Gebäude zu entfernen, müssen entsprechend der Statischen Berechnung Abstützungen vorgenommen werden.

Sobald der Aufbau aus dem Gebäude ausgebaut ist, kann mit der weiteren Demontage begonnen werden. Die im Forschungsvorhaben untersuchten Wandaufbauten sind dabei wie folgt zusammengesetzt:

- Fassade: Grundspachtel, Armierungsgewebe, Oberputz u. Fassadenfarbe
- Dämmung: Holzfaserdämmplatte
- TAM: Brettsperrholzplatte mit Luftkanalschicht an der Innenseite
- Deckschicht: unterschiedliche Plattenwerkstoffe wie Dreischichtplatte, Vollholzplatte, Lehmplatte, Gipskartonplatte und Gipskartonplatte mit Graphitanteil

Die im Forschungsvorhaben gewählte verputzte Fassade lässt sich im Vergleich zu den weiteren Baustoffen am Schlechtesten lösen, da der Putz mit Armierungsgewebe und Grundspachtel mit der Holzfaserdämmplatte verklebt ist. Eine geschraubte und hinterlüftete Fassade wäre hier deutlich besser zu demontieren und sollte diesbezüglich auch bei einer baupraktischen Anwendung angestrebt werden. Die Dämmung, die mittels Tellerkopschrauben auf die Außenseite des TAM aufgebracht wurde, kann durch Lösen der Schrauben einfach entfernt werden. Die Deckschicht kann, wie in den Produktionsvarianten (vgl. Kapitel I, Unterkapitel: Produktion) beschrieben, geklebt oder geschraubt werden. Sollte die Deckplatte geklebt sein, so handelt es sich um eine Deckplatte aus Holz und gehört damit stofflich zum thermisch aktivierten Massivholz. Denn auch das TAM besteht aus zusammengeleimten Schnitthölzern. Sofern die Deckplatte geschraubt ist, kann sie wie die Dämmung ebenfalls durch Lösen der Schrauben entfernt werden.

Da es sich im Forschungsvorhaben hauptsächlich um die Entwicklung des thermisch aktivierten Massivholzes handelt und nicht um die zusätzlichen Bauprodukte, wie z.B. Dämmung und Gipskartonplatte, die für einen baupraktischen Wandaufbau nötig sind, wird folgend lediglich das thermisch aktivierte Massivholz aus reinem Schnittholz betrachtet.

Wiederverwendung

Die Wiederverwendung des TAM in seiner ursprünglichen Funktion sollte auch in Bezug auf die Ressourcenschonung das vorrangige Ziel sein. Damit eine Wiederverwendung möglich ist, müssen zwei Eigenschaften auch nach einer bereits verstrichenen Verwendungsdauer gewährleistet sein. Es dürfen keine sichtbaren Risse im TAM vorhanden sein und die mechanischen Festigkeitseigenschaften müssen weiterhin gegeben sein. Zudem, dass sichtbare Risse z.B. in der Deckschicht auch die mechanischen Eigenschaften eines komplett verleimten TAM beeinflussen würden, führen sie auch zu einer Schädigung der Luftkanäle. Dass die Deckschicht während ihrer Nutzung und den damit verbundenen Feuchte- sowie Temperaturschwankungen standhält, wurde von (Fochler, 2021) untersucht. Risse, die nach der Demontage auftreten, müssen vor einer Wiederverwendung untersucht werden. Dies kann sowohl visuell als auch mit Maßband und Dickenmesser (Brüninghoff & Dietsch, 2010) durchgeführt werden. Zerstörungsfreie Messmethoden, wie z.B. die visuelle Begutachtung und Neusortierung, sollten bei der Wiederverwendung des Holzprodukts bevorzugt werden.

Die erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Instituts für Bautechnik (DIBt) wurde für kreuzverleimte Lamellen im Dezember 1998 ausgestellt (Mestek & Winter, 2011). Damit handelt es sich bei Brettsperrholzprodukten um ein vergleichsweises junges Bauprodukt. Somit sind Langzeitauswirkungen aus statisch konstruktiver Sicht für das Bauprodukt Brettsperrholz aktuell nicht möglich. Aber es können Aussagen zu den einzelnen Bestandteilen wie Schnittholz und Klebstoff getroffen werden.

Um Schnittholz im Bauwesen bezogen auf ihre Tragfähigkeit verwenden zu können, muss z.B. Schnittholz aus Nadelholz nach DIN 4074-1:2012-06 (NABau, 2012) in Sortierklassen eingeteilt werden. Im Anwendungsbereich der Norm wird Altholz nicht explizit ausgeschlossen, weshalb auch bei Altholz die Möglichkeit einer erneuten Einteilung besteht. Bei neuen Holzprodukten, wie Brettsperrholz oder das thermisch aktivierte Massivholz, muss bei einer bauordnungsrechtlichen Verwendung eine Leistungserklärung vom Hersteller abgegeben werden. Diese ermöglicht es, die Eigenschaften des Holzbauprodukts zu ermitteln. Sollte zusätzlich keine äußere Beschädigung sichtbar sein, kann das Produkt wiederverwendet werden.

Auch der verwendete Klebstoff muss nach der ersten Nutzungsperiode weiterhin den an ihn gestellten statischen Anforderungen genügen. (Schnider et al., 2011) haben das Versagen von Klebefugen unter klimatischer Langzeitbeanspruchung untersucht. Dabei wurden sowohl Probekörper aus Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) als auch aus Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) untersucht. Die Probekörper wurden unter natürlicher sowie künstlicher Bewitterung untersucht als auch in einer Wechselklimalagerung. Das Wechselklima bestand aus einer Feuchtphase (20 °C/ 95 % rel. Luftfeuchte) und einer Trockenphase (20 °C/35 % rel. Luftfeuchte). Eine Phase lief über einen Zeitraum von 96 Stunden. Dies ergab einen Feucht-Trocken-Zyklus von 192 Stunden. Die Proben wurden 4, 8, 12, 16 und 20 Wechselklimazyklen ausgesetzt (Schnider et al., 2011). Trotz der starken Feuchtebeanspruchung wurde bei den Probekörpern keine erkennbare Delaminierung festgestellt (Schnider et al., 2011). Da solch starken Feuchtwechsel beim thermisch aktivierten Massivholz nicht zu erwarten sind, sollte eine Wiederverwendung auch in Bezug auf die Klebefugen nach einer ersten Nutzungsperiode möglich sein.

Weiterverwendung

Auch die Weiterverwendung mit einem anderen Verwendungszweck ist bei einem thermisch aktivem Massivholz denkbar. Unter Beibehaltung von lediglich einer der beiden oben genannten Eigenschaften, wie Beibehaltung der mechanischen Eigenschaften oder Rissfreiheit in der Deckschicht, könnte die Weiterverwendung als nichttragendes thermisch aktiviertes Massivholz oder als tragendes Massivholz ohne die Funktion der thermischen Aktivierung denkbar sein.

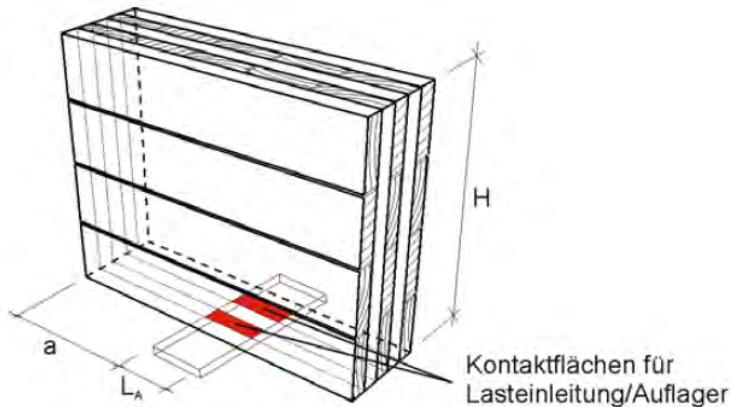
Weiterverwertung

Unbehandeltes Brettsperrholz, wie z.B. von der Firma Binderholz produziert, kann nach dem Anhang III der Altholzverordnung (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamtes für Justiz, 2020) dem Abfallschlüssel 17 02 01 zugeordnet werden (IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V., 2019). Dies entspricht der Altholzkategorie A II. Da das thermisch aktivierte Massivholz für die Verwendung im

Innenbereich vorgesehen ist, benötigt es keine zusätzlichen Holzschutzmittel und wird ebenfalls in die Altholzkategorie A II eingeteilt. Aus diesem Grund ist eine Weiterverwertung problemlos möglich.

Eine baupraktische Weiterverwendung des TAM könnte durch Auf trennen des plattenförmigen Baustoffs gesehen. Anschließend könnte die Verwendung als Rippe in einer Holzrahmenbauwand erfolgen. Die Breite des ungestörten Brettsperrholzes im TAM sollte mindesten $d = 6 \text{ cm}$ sein. Dies entspricht der Breite einer Standardrippe im Holzrahmenbau. Die Tiefe der Rippe ergibt sich aus der benötigten Dämmstoffstärke für eine Holzrahmenbauwand. Die Rippe aus wiederverwertetem TAM hat in der Mittellage liegende Bretterlamellen. Diese werden für den vertikalen Lastabtrag rechnerisch nicht angesetzt (Deutsches Institut für Bautechnik, 2017).

Abbildung 17 Lasteinleitungsgeometrie bei Brettsperrholz (Deutsches Institut für Bautechnik, 2017)



Dies ist bei der Statischen Berechnung der wiederverwendeten Rippen zu betrachten. Da wie oben beschrieben jedoch die Dämmstärke die Tiefe der Rippen bestimmt, wird im Einfamilienhausbau die Tragfähigkeit der Rippe nicht maßgebend.

Auf Grund des hohen Heizwerts von Holz ist eine thermische Verwertung ebenfalls attraktiv, da die entstehende Energie für die Herstellung von neuen thermisch aktivierten Massivholzern verwendet werden kann (IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V., 2019).

Kapitel II – Optimierung der Heiz- und Kühlleistung

Modifikation der Luftkanäle, Position im Bauteil, Strömungsweggeometrie und -anordnung, Systemtemperaturen, Oberflächenbeschaffenheit, Anbindung an die Wärme- und Kälteversorgung, Steuerungs-/ Regelungsalgorithmen, Einfluss des Nutzers

Modifikation der Luftkanäle

Nils Schuhmacher; Christian Hepf

Durch die Modifikation der Luftkanäle sollen die Heiz- und Kühlleistungen des thermisch aktivierten Massivholzes optimiert werden. Aber nicht nur die thermische Leistung des TAM wurde in diesem Kapitel untersucht, sondern auch der damit verbundene Primärenergiebedarf bewertet. Dieser soll durch die Anpassungen an den Luftkanälen gesenkt werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden geometrische Einflussfaktoren, wie die Position im Bauteil und die Strömungsweggeometrie untersucht. Ebenso wird auf unterschiedliche Materialeigenschaften und deren Oberflächenbeschaffenheiten eingegangen. Der Einfluss von verschiedenen glatten bzw. rauen Holzoberflächen auf die Strömungsgeschwindigkeit wird ebenfalls gezeigt.

Es wird konzeptionell aufgezeigt, wie das thermisch aktivierte Massivholzelement an eine Wärme- und Kältetechnik zentral, semizentral oder dezentral angebunden werden kann. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf einem luftgeführten System. Abschließend wird der Einfluss des Nutzers an Hand von Einzelszenarien herausgestellt.

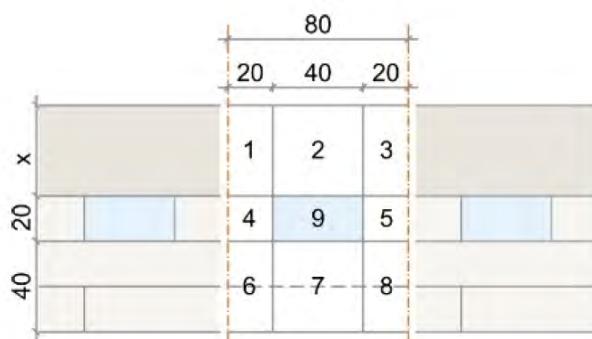
Position der Kanalschicht im Bauteil

Nils Schumacher

Die optimale Position der Kanalschicht im Bauteil zeigt sich, wenn eine hohe spezifische Heiz- und Kühlleistung erzielt wird und das System gleichzeitig eine große Robustheit gegenüber Schädigungen aus dem Betrieb aufweist. Als maßgebend wird hier die wechselnde hygrothermische Belastung der Deckschicht erachtet, die gleichzeitig auch für die gewünschten Heiz- und Kühlleistungen verantwortlich ist.

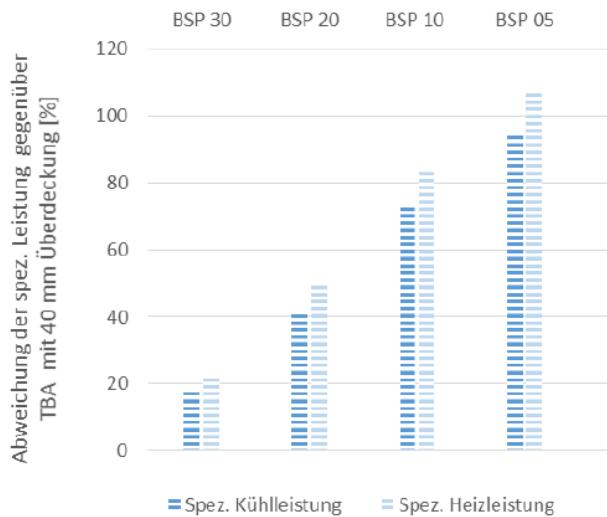
Durch (Emmel, 2017) wurde untersucht, wie sich eine 30 mm, 20 mm, 10 mm und 5 mm dicke Überdeckung der Luftkanäle auf die Leistung und Oberflächentemperatur des Bauteils auswirkt. Ausgangskonfiguration für einen Vergleich der Deckschichten war der Prototyp A, der eine Überdeckung der Luftkanäle aus Fichtenholz von 40 mm aufweist. Mit Hilfe eines Knotenmodells wurden die angrenzenden Bauteilschichten ebenso wie die Deckschicht simuliert (Abbildung 18).

Abbildung 18 Knotensystem, bei dem die überdeckende Schicht der Luftkanäle unterschiedliche Dicken aufweist (Emmel, 2017)



In der folgenden Abbildung sind die Abweichungen der spezifischen Leistung gegenüber einer thermischen Bauteilaktivierung (TBA) mit 40 mm Überdeckung dargestellt. Es zeigt sich, dass sich mit der Reduktion der Deckschichtdicke die spezifische Heiz- bzw. Kühlleistung erhöht. Bei einer Reduzierung der Decksicht von 30 mm auf 20 mm ist eine Verbesserung der Leistung um ca. 20 % zu erkennen. Bei der Reduktion auf eine Schichtdicke vom 5 mm gegenüber 40 mm sogar eine Verdopplung der Leistung (vgl. Emmel, 2017).

Abbildung 19 Abweichungen der spezifischen Leistung (pro m² aktivierter Fläche) von dem Bauteilaufbau mit 40 mm Überdeckung der Luftkanäle, nach (Emmel, 2017)



Eine Reduzierung auf eine Schichtdicke von 5 mm wird allerdings nicht als praktikabel und vor allem nicht als robust erachtet. Aus diesem Grund wurde für den Bau des Prototyps C eine 19 mm Dreischichtplatte verwendet. Das Maß von 19 mm ist ein standardisiertes Maß für Dreischichtplatten und kommt dem bisher verwendeten Maß von 20 mm im Prototyp B am nächsten. Somit können die Prototypen B und C auch bauphysikalisch besser verglichen werden. Auf Grund der kreuzverleimten Schichten der Platte ist diese zudem besonders formstabil, was im Zuge der durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden kann.

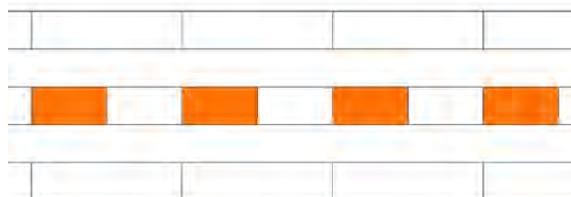
Strömungsweggeometrie und Strömungsweganordnung

Nils Schumacher

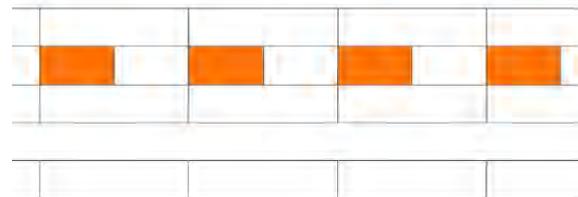
Für den Bau der Prototypen A und B im Forschungsvorhaben "Wärmespeicherfähigkeitsindex" (Kornadt et al., 2018) wurde die Strömungsweganordnung bereits analysiert. Die gewählte Anordnung wurde dabei unter Berücksichtigung der Strömungsweglänge mit dem Medium Luft und der Anbindung an die Gebäudetechnik getroffen.

Die Prototypen A und B besitzen die Strömungsweggeometrie wie in Abbildung 21 dargestellt. Der Aufbau der Prototypen ist jeweils 5-schichtig. Der Prototyp A hat die beschriebenen Kanäle in seiner Mittellage und der Prototyp C die Kanäle in der zweiten Brettlage von außen (Abbildung 20).

Abbildung 20 (a) Schnittdarstellung Prototyp A, (b) Schnittdarstellung Prototyp B, jeweils nach (Mindrup, 2019)



(a)

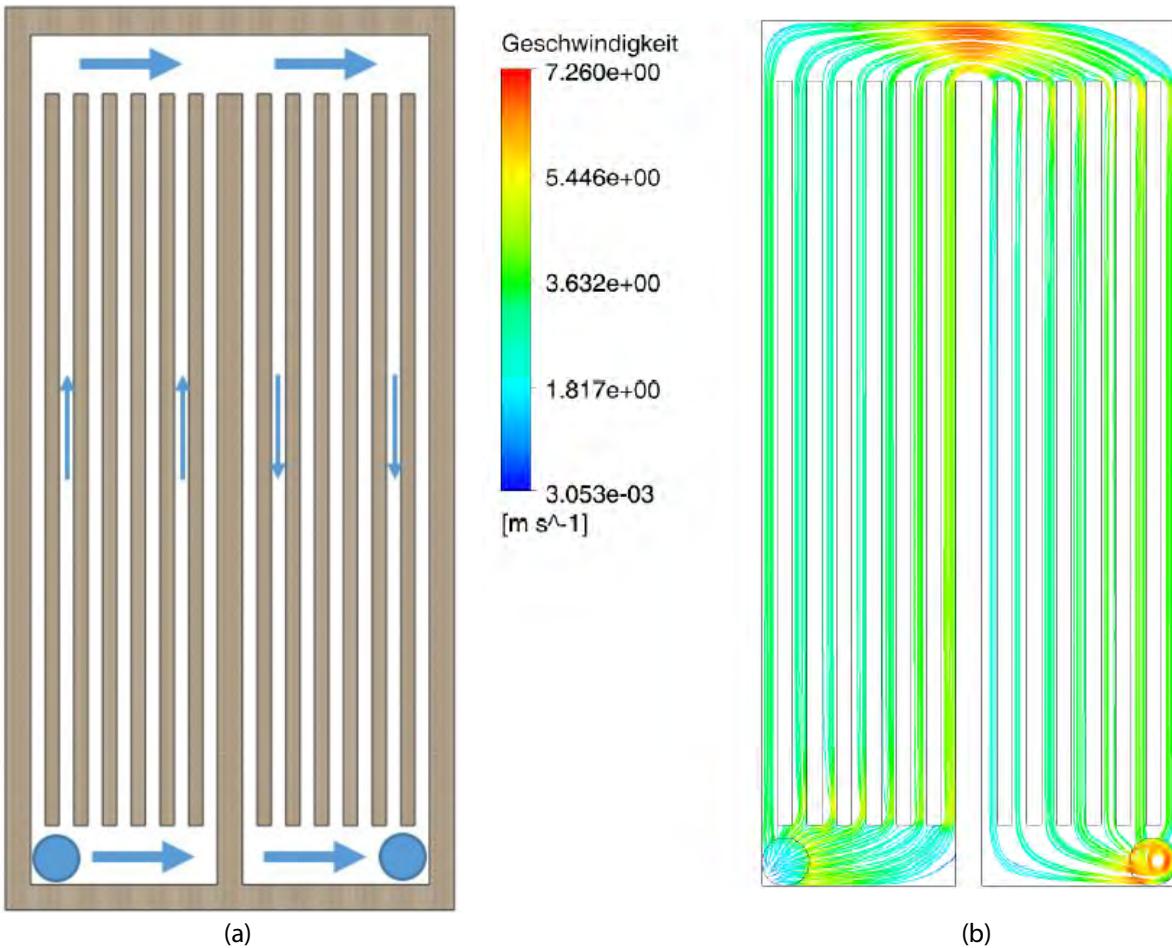


(b)

Durch die Optimierung der Strömungsweggeometrie soll die benötigte Primärenergie für den Betrieb des thermisch aktivierten Massivholzes gesenkt werden und zusätzlich eine gleichmäßige Wärmeübertragung vom Fluid auf das Bauteil gewährleistet werden.

Ausgehend von der Kanalanordnung und -geometrie des Prototyps A und B wurde eine Simulation der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe einer CFD-Modellierung (vgl. Ertl, 2019) durchgeführt (Abbildung 21).

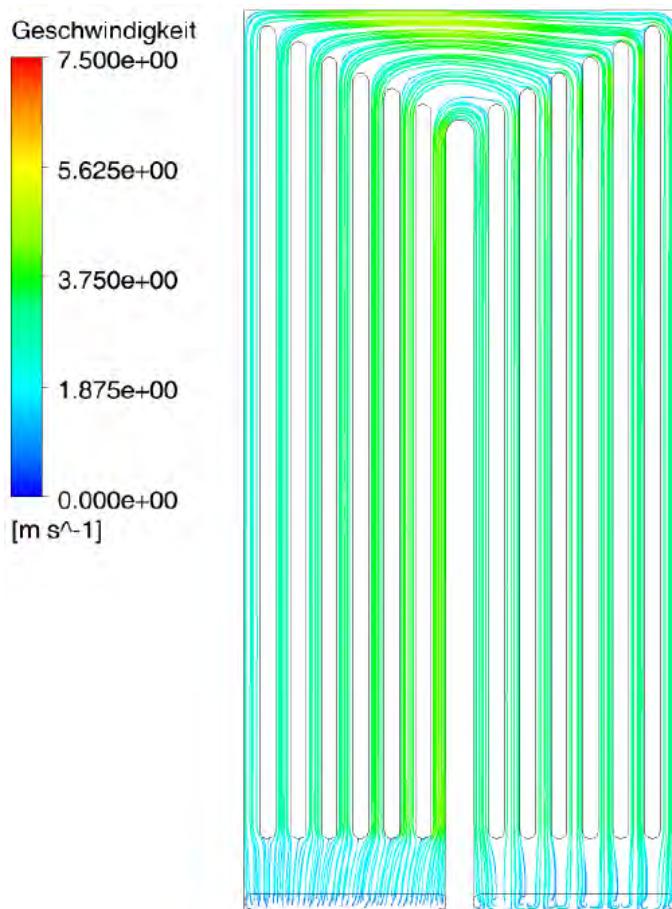
Abbildung 21 (a) Strömungsweggeometrie Prototyp A und B, nach (Mindrup, 2019), (b) Strömungslinienvisualisierung der Geometrie von Prototyp A und B, nach (Ertl, 2019)



Durch die Simulation ergeben sich für die Optimierung der Strömungsgeschwindigkeit folgende theoretische Möglichkeiten (vgl. Ertl, 2019):

- Abrunden der Stegenden, um eine Behinderung der Luft beim Ein- und Ausströmen zu vermeiden.
- Abstufung der Stege am oberen horizontalen Kanal, um eine gleichmäßige Querschnittsfläche der Kanäle in jedem Schnitt zu erhalten.
- Anpassung der Versorgungskanäle (Einlauf und Auslauf), um ein gleichmäßiges Einströmen in die Vertikalkanäle zu ermöglichen.

Die Umsetzung der Optimierungsmöglichkeiten führen zu folgender geometrischen Variante (Abbildung 22)

Abbildung 22 Optimiertes Theoriesystem der Kanalschicht im TAM (Ertl, 2019)

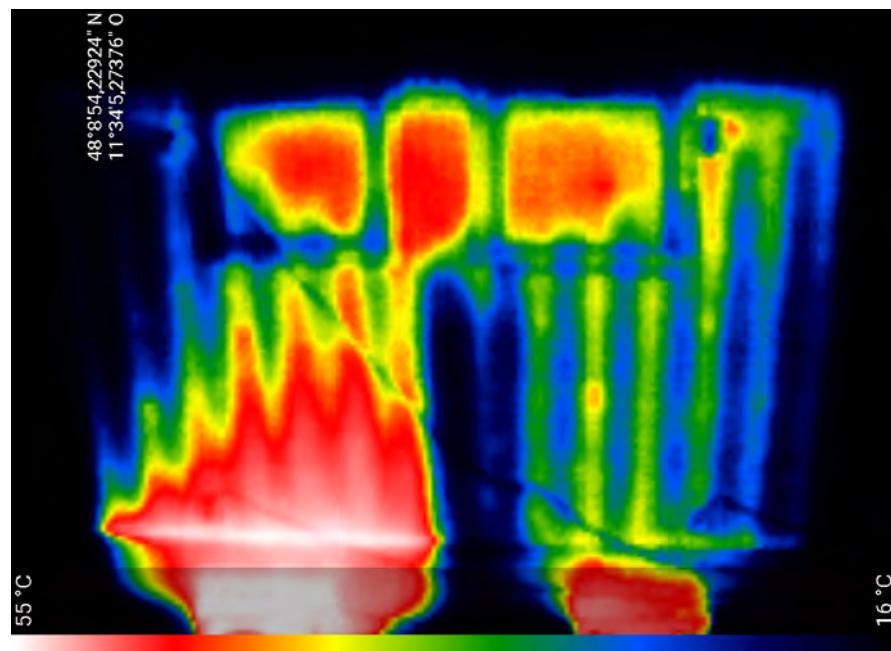
Für den Bau eines weiteren Prototyps, dem Prototyp C, wurde versucht, diese theoretischen Möglichkeiten und Ansätze in die Praxis umzusetzen (Abbildung 23).

Abbildung 23 Luftkanalschicht des Prototyps C (links), Einström- und Ausströmöffnung (rechts) (eigene Darstellung)

Die Erkenntnisse aus der Herstellung des Prototyps C werden aus baupraktischer Sicht eingeordnet, ebenso wie die Auswirkungen auf die tatsächliche Strömung. Zusätzlich werden weitere Optimierungsvorschläge diskutiert.

- **Abrunden der Stegenden bzw. Stegabschlüsse.** Für den Prototyp C wurden die Einzelbauteile der Luftkanalschicht aus einer Vollholzplatte herausgeschnitten. Die Rundungen an den Stegenden wurden dabei mit einem Tellerschleifer hergestellt. Anschließend wurden sämtliche Bauteile auf das Brettsperrholz geklebt. Die händische Herstellung der Einzelbauteile hat sich als aufwendig herausgestellt. In einer industriellen Produktion wäre eine Herstellung durch ausfräsen der Luftkanäle voraussichtlich schneller und wirtschaftlicher. Der große Anteil von Fräsbällen ist jedoch nicht zu vernachlässigen.
- **Abstufung der Stege am oberen horizontalen Kanal.** Die händische Herstellung ist ebenfalls zeitaufwändig, kann aber durch einen industriellen Fräsvorgang beschleunigt werden. Durch die Abstufung zeigt sich eine gleichmäßige Erwärmung der Deckschicht.
- **Anpassung der Einström- und Ausströmöffnung.** Hier ergeben sich die größten Abweichungen zwischen dem theoretischen Optimum und der tatsächlichen bautechnischen Umsetzung. Langgezogene Einströmkanäle mit abgerundeten Ecken sind keine Standartprodukte im Lüftungs- oder Heizungsbau. Für die Anbindung der Technik an das TAM wird daher ein Flachkanal mit einer rechteckigen Querschnittsform und den Abmessungen 20 x 5 cm verwendet. Dieser Kanal wird mittig über dem horizontalen Einströmkanal in der Luftkanalschicht montiert. Bei den ersten Testläufen zeigte sich eine schnellere Erhitzung der inneren Luftkanäle hin zum Mittelsteg.

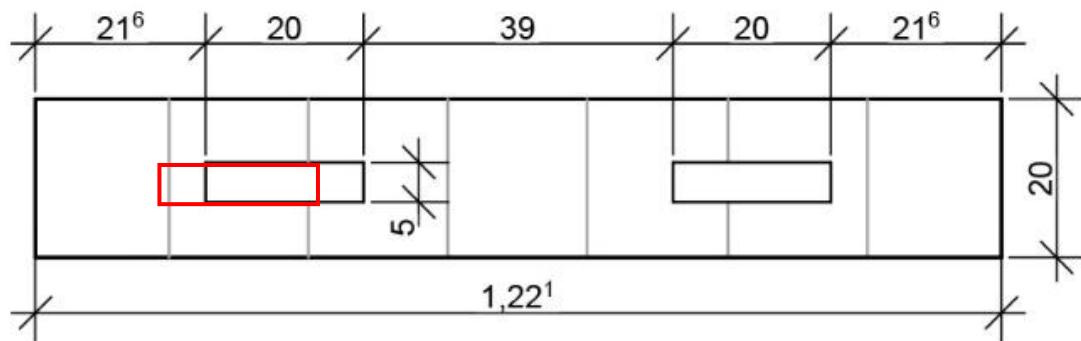
Abbildung 24 Temperaturverteilung bei mittiger Anordnung der Einström- und Ausströmöffnung über dem unteren horizontalen Kanal (eigene Darstellung)



Dies wird zum einen auf die geringe Breite des Einströmkanals zurückgeführt und zum anderen auf die Luftkanalquerschnitte im Regelbereich. Diese haben die Querschnittsabmessungen von 4 x 2 cm. Kombiniert mit der geringeren Wegstrecke der Luftkanäle in der Mitte des Bauteils ergibt sich hier eine höhere Strömungsgeschwindigkeit, was zu einer Erhöhung der Systemlufttemperatur auf Grund von

Wärmeleitung führt. Diese Optimierung wurde beim Bau des Prototyps C nicht umgesetzt. Die Auswirkungen sind jedoch klar erkennlich. Um diesem Effekt entgegen zu wirken wurde der Einströmkanal um 6 cm nach außen verschoben (Abbildung 25).

Abbildung 25 Versatz der Einströmöffnung um 6cm nach außen (eigene Darstellung)



- **Ausführung tropfenförmiger Stegenden bzw. Steganfänge.** Entsprechend der Strömungsliniengeometrie (Abbildung 22) könnte eine tropfenförmige Ausarbeitung der Stegenden auf der linken Bauteilseite und der Steganfänge auf der rechten Bauteilseite einen Strömungsabriss vermeiden bzw. ein Einleiten der Strömung in die Kanäle begünstigen. Eine händische Ausarbeitung wäre wahrscheinlich nicht wirtschaftlich ausführbar. Auch der tatsächliche Nutzen in Hinsicht auf den Energieverbrauch wird als gering eingeschätzt. Dennoch ist ein Effekt vermutlich messbar und die Ausführung mit maschineller Frästechnik möglich.
- **Abrundung der Eckbereiche in der Luftkanalschicht.** Der Einfluss kann nicht qualitativ abgeschätzt werden. Es wird jedoch als eine mögliche Weiterentwicklung für folgende Forschungen in Betracht gezogen.

Systemtemperaturen

Nils Schumacher, Christian Hepf

Im Zuge der Erforschung eines hygrothermisch aktivierten Massivholzes wurden an der TU München bereits mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Randbedingungen untersucht. Die in Tabelle 2 angegebenen Temperaturen sind Vorlauftemperaturen, mit welchen die Versuchskörper/Prototypen über ihre Luftkanäle beaufschlagt wurden. Die Untersuchungen im Forschungsvorhaben InnoCrossLAM (Arnold et al., 2021) erfolgten hingegen in einer Klimakammer. Hierzu wurden die Prüfkörper mit dampfsperrendem Klebeband angeklebt. Die hygrothermisch aktive Oberfläche sowie die Kanalöffnungen wurden jedoch nicht abgeklebt, um einen Eintrag von Temperatur und Feuchte über die Oberfläche des Bauteils sowie über die Oberfläche der Luftkanäle zu gewährleisten.

Tabelle 2 Versuchskonfigurationen zur thermischen Beaufschlagung auf das TAM [eigene Darstellung]

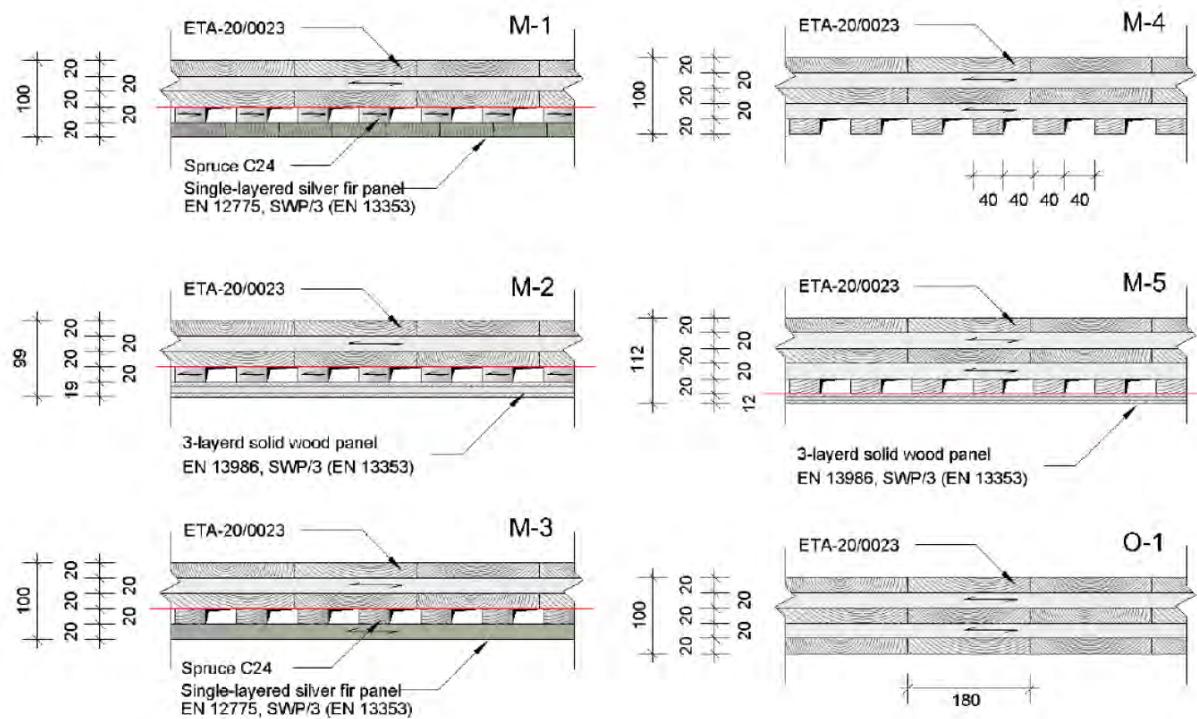
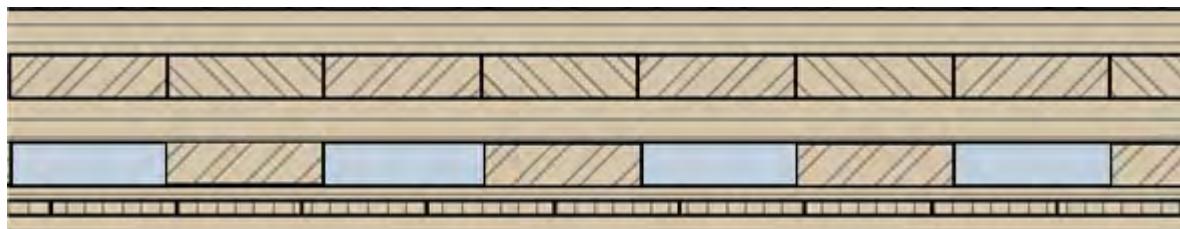
| | Konditionen | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 | Phase 4 | Phase 5 |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|
| Mindrup, heizen (Mindrup, 2019) | Vorl. Temp Zeit op. Temp. | 45 °C 8 Tage 21,22 °C | - 3 Tage 21,22 °C | 45 °C 3 Tage 21,22 °C | - 5 Tage 21,22 °C | 45 °C 3 Tage 21,22 °C |
| Mindrup, kühlen (Mindrup, 2019) | Vorl. Temp Zeit op. Temp | 16 °C 1 Tag 20,88 °C | - 3 Tage 20,88 °C | 16 °C 2,5 Tage 20,88 °C | - 5,25 Tage 20,88 °C | 16 °C 2,25 Tage 20,88 °C |
| Forschungsvorhaben InnoCrossLAM (Arnold et al., 2021) | Raumtemp. rel. LF Zeit | 20 °C 80% rel. LF 45 Tage | 20 °C 70% rel. LF 45 Tage | 40 °C 40% rel. LF 55 Tage | 2 °C 63% rel. LF 28 Tage | 12 °C 47% rel. LF 45 Tage |
| PhyTAB* Vorversuch | Vorl. Temp Zeit | 60 °C 1 Stunde | - 2 Stunden | | | |
| PhyTAB* Versuche Testkubus | Vorl. Temp Zeit op. Temp | | | 45 °C 4 Tage – je 3 x 3 Stunden Operative Temp. im Kubus 20 °C 23 °C 26 °C - rel. variabel | | |

*Die Versuche im Forschungsvorhaben PhyTAB wurden insgesamt viermal mit den gleichen Konditionen durchgeführt.

Die gezeigten Versuchskonfigurationen wurden mit folgenden Prüfkörperaufbauten durchgeführt.

Die in Abbildung 27 dargestellten Querschnitte zeigen die Prüfkörperaufbauten des Forschungsvorhabens InnoCrossLAM (Arnold et al., 2021). Das Basisbauteil jeder Serie ist ein BSP-Element. Bei den Serien M-1 bis M-3 wird ein 3-lagiges BSP-Basisbauteil mit den zuvor hergestellten Funktionsschichten mit einem 1-K-PUR-Klebstoff verklebt (rote Linie in Abbildung 27). Die Serien M-4, M-5 und O-1 bestehen aus einem fünfschichtigen BSP-Element, bei dem die Kanäle gefräst sind (außer Referenzserie O-1). Die Frontschicht der Serien M-1 und M-3 besteht aus einer einschichtigen Massivholzplatte aus Weißtanne, die keilgezinkt und kantenverleimt ist. Die Frontschicht der Serien M-2 und M-5 besteht aus einer 3-Schicht-Massivholzplatte.

Abbildung 26 Prototyp B mit Vollholzplatte als Deckschicht (Mindrup, 2019)

Abbildung 27 Versuchskörperaufbauten (Arnold et al., 2021)

Abbildung 28 Prototyp C mit Dreischichtplatte als Deckschicht (PhyTAB) (eigene Darstellung)


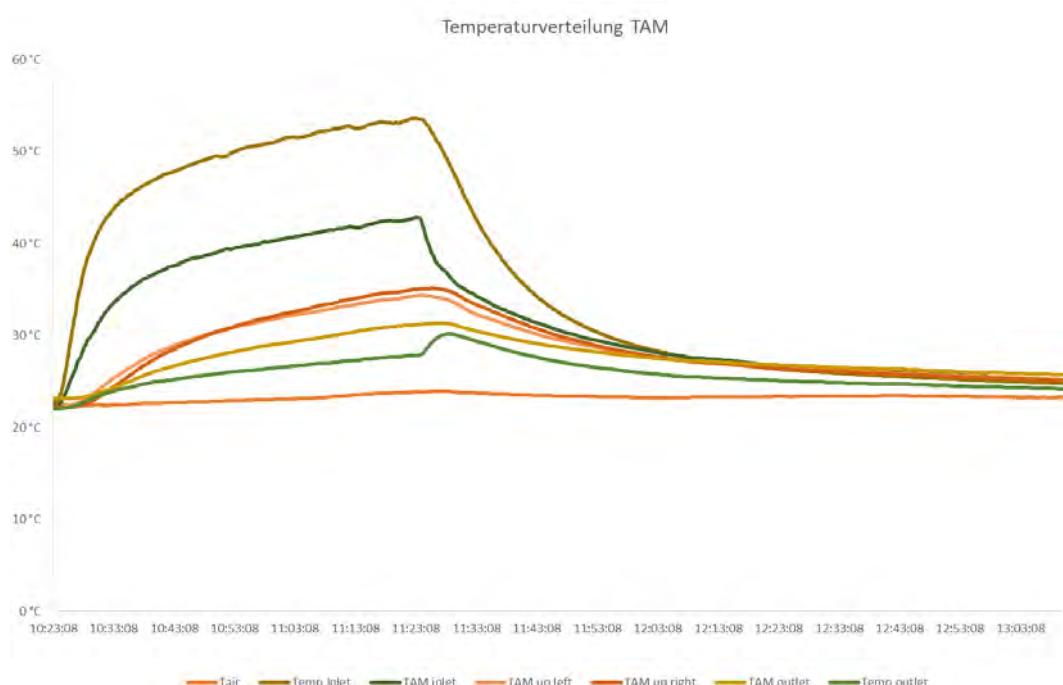
Vorversuch Systemtemperaturen TAM

In einem Vorversuch wurden die potentiellen Systemtemperaturen praktisch am TAM ermittelt. Hierfür wurde eine dynamische Messung durchgeführt. Dabei sollten maximale Luft- und Oberflächentemperaturen sowie die lokale Verteilung der Temperatur an der TAM Oberfläche ermittelt werden. Hierbei wurde in einer Reihe von Vorversuchen das thermisch aktive Massivholzelement mit Temperatursensoren sowie einer Wärmebildkamera bestückt und vermessen. Bei dem System für die Temperatursensoren handelt es sich um das Ahlbom Messgeräte ALMEMO 710 V7 (AHLBORN Mess- und Regelungstechnik GmbH et al., 2020). Die Messwerte für die Temperatursensoren zeichnen alle zehn Sekunden einen Wert auf und speichern diesen auf dem Messgerät ab. An diese wurden sieben Temperaturmesssensoren angeschlossen und entsprechend der nachfolgenden Aufteilung am Massivholzelement und der angeschlossenen Heiztechnik angebracht:

- Lufttemperatur im Testraum
- Temperatursensor Luftzufuhr (auf dem Metallrohr)
- Oberflächentemperatur auf TAM an der Luftzufuhr
- Oberflächentemperatur auf TAM, linke obere Ecke
- Oberflächentemperatur auf TAM, rechte obere Ecke
- Oberflächentemperatur auf TAM an Luftrücklauf
- Temperatursensor Luftzufuhr (auf dem Metallrohr)

Das thermisch aktivierte Massivholzelement wurde nach wiederholten Versuchen final eine Stunde mit einer Zuluft-Temperatur von 60°C betrieben. Wie in der nachfolgenden Grafik zu sehen, steigt besonders die Temperatur der Zuluft auf dem Metallrohr sowie die Zuluft-Temperatur auf der Oberfläche des Elements schnell an. Die beiden weiteren Oberflächentemperaturen weisen einen verzögerten Verlauf auf. Die Rücklauf-Temperaturen liegen deutlich unter den Zuluft-Temperaturen auf und weisen in der Heizphase konstant ein Temperatur-Delta von über 20°C auf. Die Raumtemperatur im Testraum verhält sich nahezu konstant, was auf die Größe und das erhöhte Volumen des Raumes zurückzuführen ist (Breite 5m, Länge 7m, Höhe 5,5m). Zudem ist im zeitlichen Verlauf der Messung eine klare Aufheiz- und Abkühlphase zu erkennen.

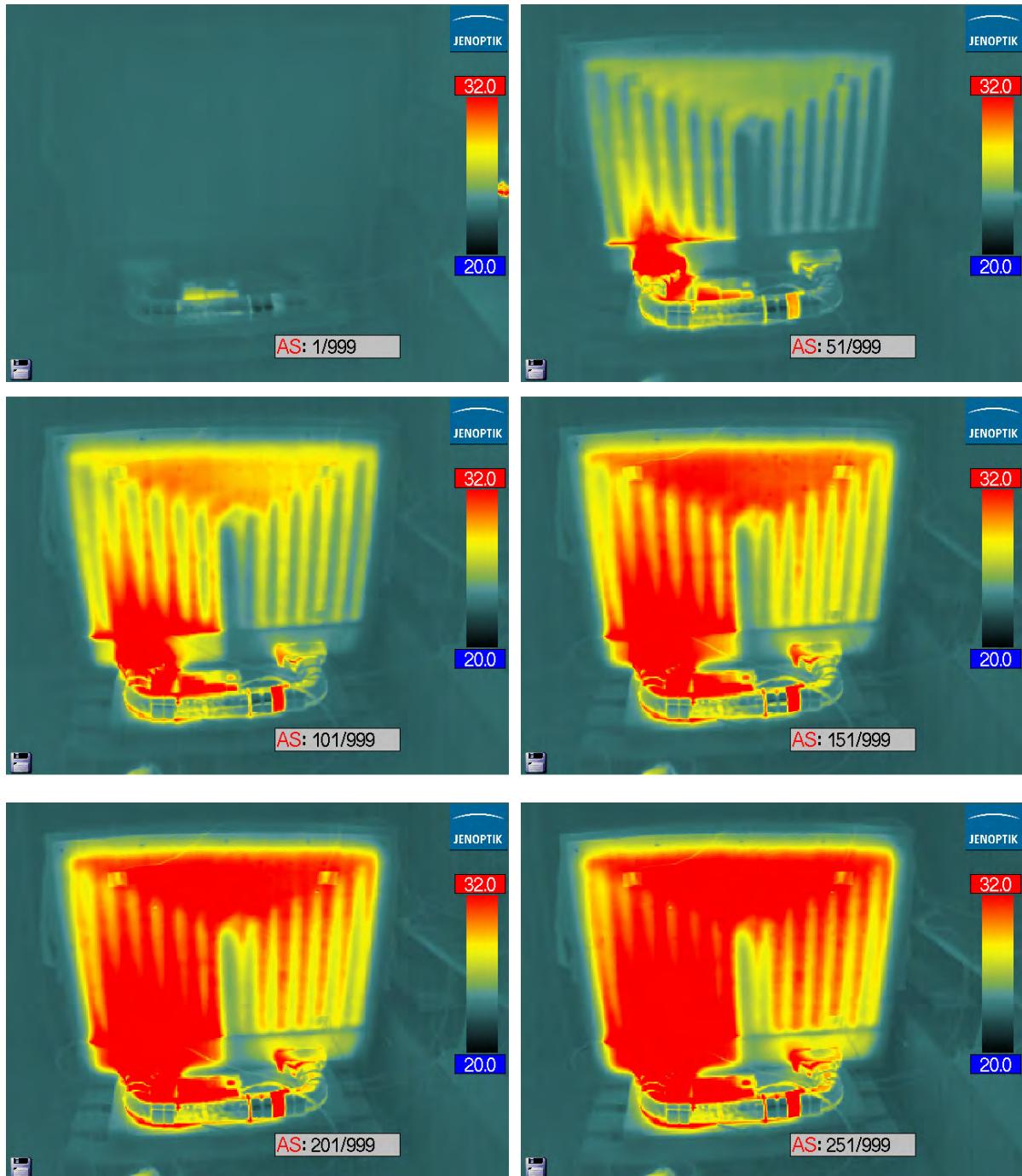
Abbildung 29 Verteilung der Temperatur auf dem TAM

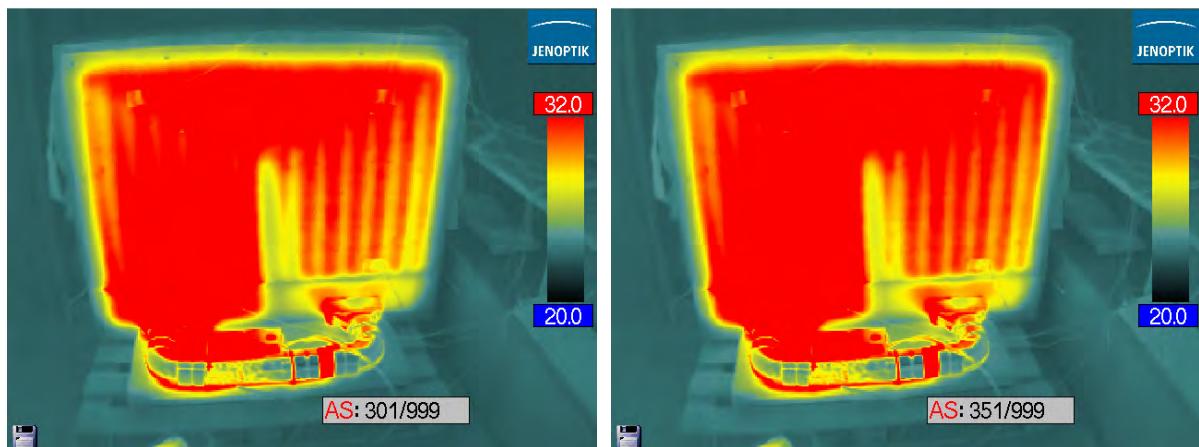


Weiter wurde die Messung mit einer Wärmebildkamera von der Firma Jenoptik GmbH begleitet. Hierbei wurde in einer Frequenz von 10 Sekunden ein Wärmebild des Versuchsaufbaus erstellt. Wie bereits in der oben dargestellten Grafik zum Verlauf der Temperatursensoren zu erkennen, kann der Versuch allgemein in eine Aufheiz- und eine Abkühlphase aufgeteilt werden. Die Aufheizphase erstreckt sich ca. auf eine Stunde von 10:23 – 11:23 Uhr und stellt den Zeitraum dar, in welchem das TAM beheizt wurde. Die Abkühlphase beginnt mit 11:23 Uhr und endet ca. um 13:03 Uhr. In dieser Phase wurde keine zusätzliche Temperatur dem TAM zugeführt. Die einzelnen Abbildungen stellen das thermische Verhalten des Versuchsaufbaus in einem Temperaturbereich (siehe Skala rechts) zwischen 20 und 32 °C dar. Weiter ist unten mittig den einzelnen Abbildungen die Bildnummer der Aufzeichnungen zu erkennen. Nachfolgend sind somit die Aufheiz-sowie Abkühlphase des Versuches zu sehen.

Aufheizphase

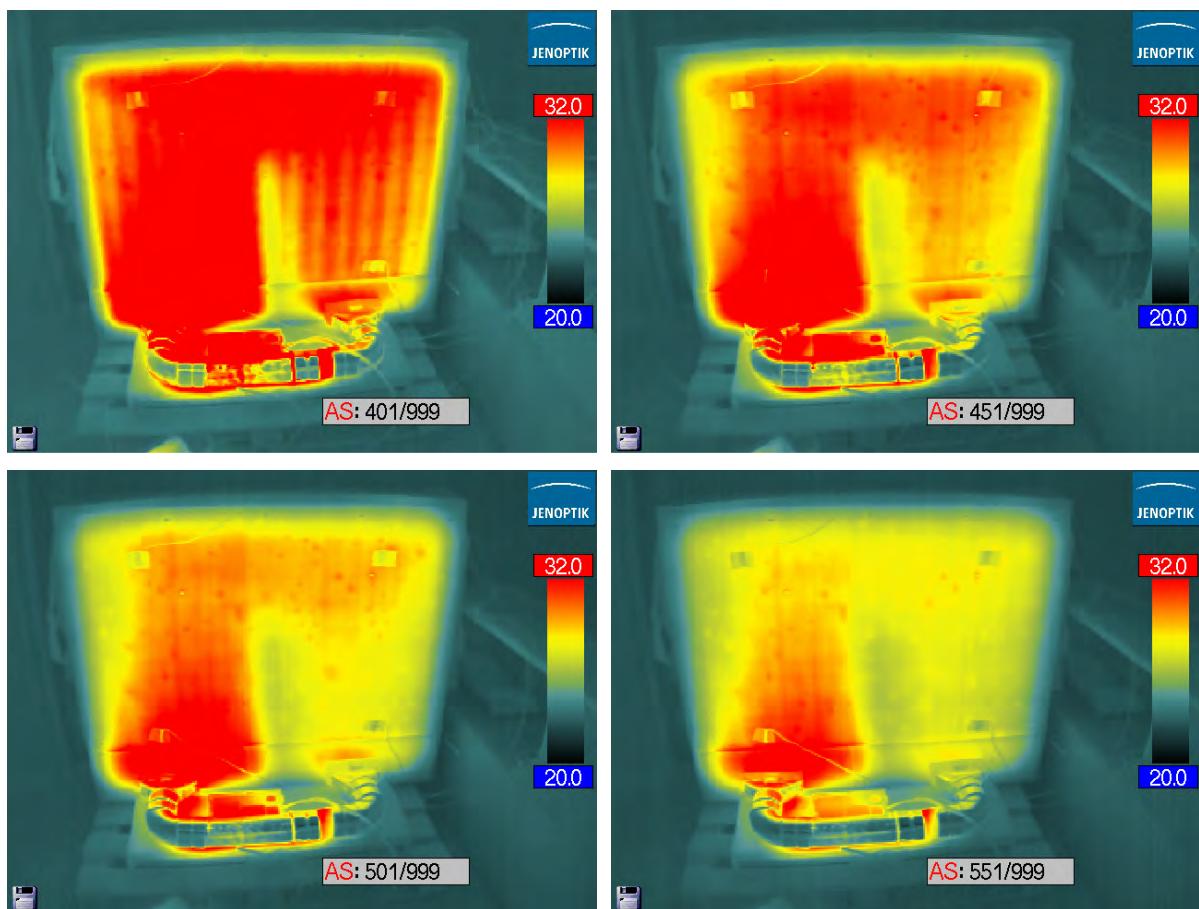
Abbildung 30 Temperaturverteilung auf TAM – Aufheizphase (eigene Darstellung)

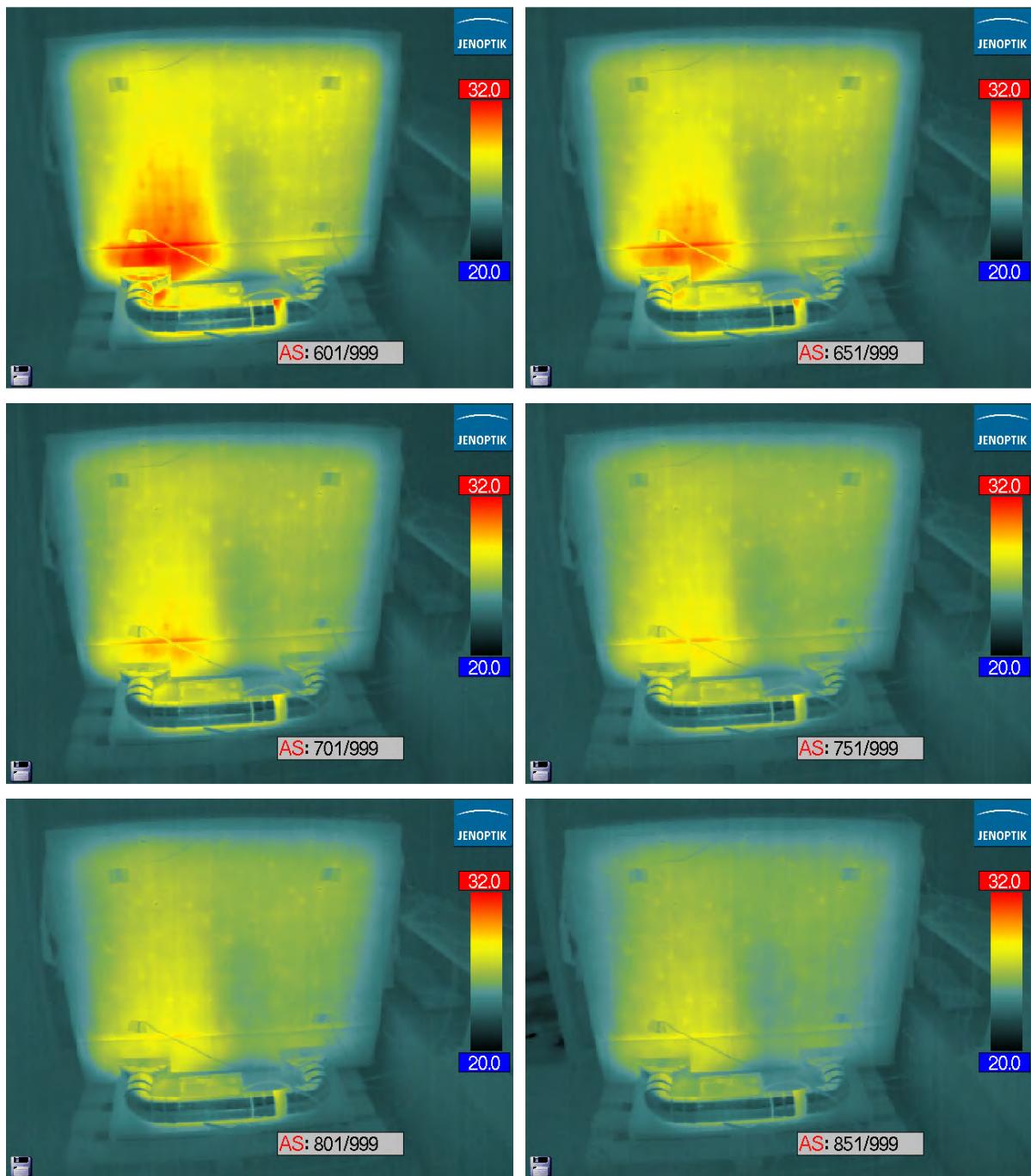


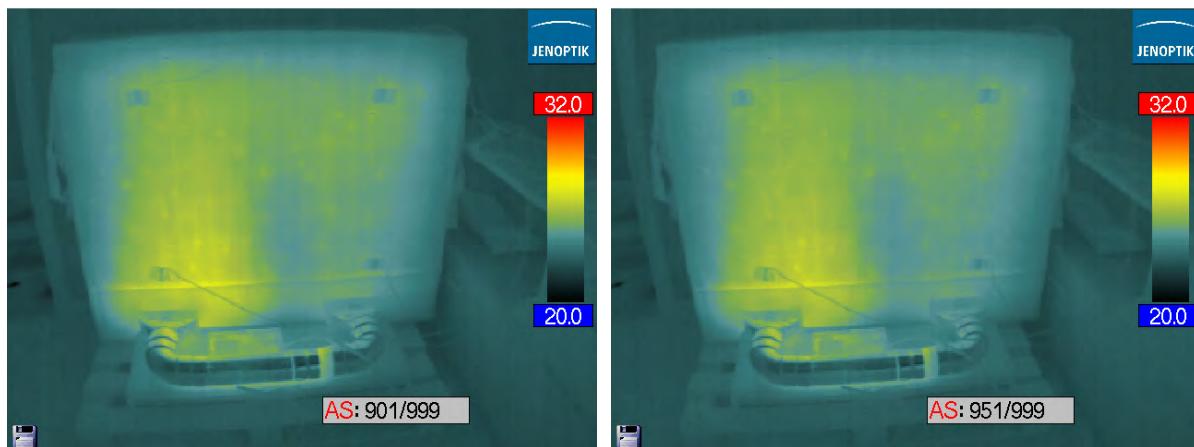


Abkühlphase

Abbildung 31 Temperaturverteilung auf TAM – Abkühlphase (eigene Darstellung)







Auswertung

Zunächst ist zu erkennen, dass die Oberfläche des TAM sich langsamer aufheizen und abkühlen als die Metalloberflächen des Heizsystems. Es ist ebenfalls zu vermerken, dass zunächst die Oberflächen auf der linken, der Zuluft zugewandten Seite, sich aufheizen. Anschließend erwärmt sich die Freifläche in der Mitte oben auf dem TAM und abschließend die Oberflächen auf der rechten Seite. Weiter ist allgemein zu beobachten, dass die Auskühlphase zunächst stark abfällt, sich aber anschließend über einen Zeitraum von über einer Stunde auf einem konstanten Temperaturniveau hält. Zudem ist die Auskühlphase zeitlich länger als die Aufheizphase, was auf eine große Speicherfähigkeit des Bauteilaufbaus schließen lässt. Es ist zu erkennen, dass nach bereits kurzer Zeit (ca. 30 Minuten) eine homogene Verteilung der Temperaturen auf der Oberfläche des TAM besteht. Sogar die Holzstege nehmen die Temperaturen auf. Dies sorgt also final zu einer homogenen Strahlungstemperatur des Wandelements und die lange Auskühlphase weist zudem auf ein großes Potential der thermischen Speicherfähigkeit hin.

Untersuchung der Probekörper hinsichtlich Risse

Nach den Versuchen wurden die Versuchskörper auf Risse in der Deckschicht untersucht. Die Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Tabelle 3 Risse in der Deckschicht der unterschiedlichen Versuchsreihen

| Serie | Anzahl der Risse [-] | Beschreibung der Risse |
|------------------|----------------------|--------------------------------|
| Mindrup, heizen | 0 | - |
| Mindrup, kühlen* | 0 | - |
| M-1-1** | 0 | - |
| M-1-2** | 0 | - |
| M-2-1** | 0 | - |
| M-2-2** | 2 | Schwindrisse (0,15mm, 0,10 mm) |

| Serie | Anzahl der Risse [-] | Beschreibung der Risse |
|---------------------------|----------------------|---|
| M-3-1** | 1 | - |
| M-3-2** | 3 | Aufbrechen der Schmalseitenverleimung (0,15mm 0,55mm) |
| M-4-1** | 0 | - |
| M-4-2** | 0 | - |
| M-5-1** | 0 | - |
| M-5-2** | 0 | - |
| PhyTAB Vorversuch | 0 | - |
| PhyTAB Versuche Testkubus | - | - |

* Anschließend an den Kühlversuch wurde das TAM mit einer Vorlauftemperatur von 60° C beaufschlagt. Dabei entstand während des Heizbetriebs ein ca. 45 cm langer Riss mit einer Breite von 0,3 mm. Dieser Riss hat sich nach dem Heizbetrieb wieder verschlossen (Mindrup, 2019)

** Sämtliche M-Versuche wurden im Zuge des Forschungsvorhabens InnoCrossLAM durchgeführt.

Die in den Versuchen beaufschlagten Systemtemperaturen haben für den Heizfall gezeigt, dass die erreichte Oberflächentemperatur des thermisch aktivierten Elements bereits das als noch behaglich angesehene Maximum erreicht haben (Mindrup, 2019). Für den Kühlfall muss darauf geachtet werden, dass es zu keiner Zeit zu einem Tauwasserausfall im Element kommt. Hierfür ist die folgende Formel bei der Ermittlung dieser Temperatur zu berücksichtigen.

$$\theta_s = \phi_L^{1/8} * (110^\circ C + \theta_L) - 110^\circ C \quad (\text{Fischer et al., 2008})$$

θ_s = Taupunkttemperatur [°C]

ϕ_L = relative Luftfeuchte [%], dezimal]

θ_L = Lufttemperatur [°C]

Oberflächenbeschaffenheit

Nils Schumacher

Für die Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit wurden Einzelkanäle mit den Querschnittsabmessungen der Luftkanäle im TAM hergestellt. Die Abmessungen des rechteckigen Querschnitts betragen $b \times h = 4,0 \times 2,0\text{cm}$. Als Material wurde Fichtenholz sowie eine herkömmliche Gipskartonplatte und eine Gipskartonplatte mit Graphitanteil verwendet. Die Oberfläche des Fichtenholzes wurde für die jeweiligen Prüfkörper behandelt, sodass sich folgende Oberflächenbeschaffenheiten ergeben (Tabelle 4).

Tabelle 4 Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheiten der Versuchskörper [eigene Darstellung]

| Material | Oberflächenbehandlung |
|----------------------|---|
| Fichte | gefräst Herstellung mit Maschinentechnik der Fa. Lignotrend Produktions GmbH |
| Fichte | sägerau aus Sägewerk, anschließend nicht weiter behandelt |
| Fichte | gehobelt (Hobelmaschine: Martin T 42) |
| Fichte | Schleifpapier P40 mit Tellerschleifer Bosch GEX 125-1 AE |
| Fichte | Schleifpapier P240 mit Tellerschleifer Bosch GEX 125-1 AE |
| Gipskarton | unbehandelt |
| Gipskarton (Graphit) | unbehandelt |

Ausgehend von den Querschnittsabmessungen, die den Abmessungen im TAM entsprechen, wurde der hydraulische Durchmesser bestimmt und mit der relativen Gesamtlänge nach (Nikuradse) die tatsächliche Gesamtlänge ermittelt. Weiter konnten die Einlauflänge, die Auslauflänge sowie die Messstrecke 1 und 2 bestimmt werden. Diese Längen sind in Tabelle 5 dargestellt, die Reihenfolge entspricht der Reihenfolge auf dem Einzelkanal. Am Anfang der Messstrecke 1, zwischen den Messstrecken und am Ende der Messtrecke 2, wurden Bohrungen für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit und des statischen Drucks angebracht.

Die Einzelkanäle wurden an einen Ventilator angeschlossen und die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal an den jeweiligen Messpunkten gemessen. Um auf die Rauigkeit im Kanal schließen zu können, muss es sich bei der Strömung im Kanal um eine turbulente Strömung handeln. Um diese Strömungsart herzustellen wurde der Radialventilator Dalap Turbine P 100 verwendet. An den Ventilator wurde ein Reduzierstück angebracht, um den Durchmesser des Ventilators von $d_s = 100 \text{ mm}$ auf den Querschnitt $b/h = 40/20 \text{ mm}$ zu verringern. In Abbildung 32 ist der Versuchsaufbau für die Bestimmung der Sandkornrauigkeit zu sehen.

Die Einzelkanäle wurden an einen Ventilator angeschlossen und die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal an den jeweiligen Messpunkten gemessen. Um auf die Rauigkeit im Kanal schließen zu können, muss es sich bei der Strömung im Kanal um eine turbulente Strömung handeln. Um diese Strömungsart herzustellen wurde der Radialventilator Dalap Turbine P 100 verwendet. An den Ventilator wurde ein Reduzierstück angebracht,

um den Durchmesser des Ventilators von $d_s = 100$ mm auf den Querschnitt $b/h = 40/20$ mm zu verringern. In Abbildung 32 ist der Versuchsaufbau für die Bestimmung der Sandkornrauigkeit zu sehen.

Die Ergebnisse der Messungen sind folgend sowohl graphisch als auch tabellarisch dargestellt (Abbildung 33 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 5 Abmessungen der Einzelkanäle (Eckel, 2021)

| | $d_{hy}; d$ [mm] | l_e [mm] | l_I [mm] | l_{II} [mm] | l_a [mm] | x [mm] | $\frac{x}{d}$ |
|---|---------------------|---------------|---------------|------------------|---------------|-------------|---------------|
| Fichte, Lehm-Bauplatte, Gipskartonplatte | 26.7 | 750 | 500 | 500 | 170 | 1920 | 72 |

- $d_{hy}; d$ Hydraulischer Durchmesser; Innendurchmesser [mm]
- l_e Einlauflänge [mm]
- l_I Messstrecke I [mm]
- l_{II} Messstrecke II [mm]
- l_a Auslauflänge [mm]
- x Gesamtlänge [mm]
- x/d Relative Gesamtlänge

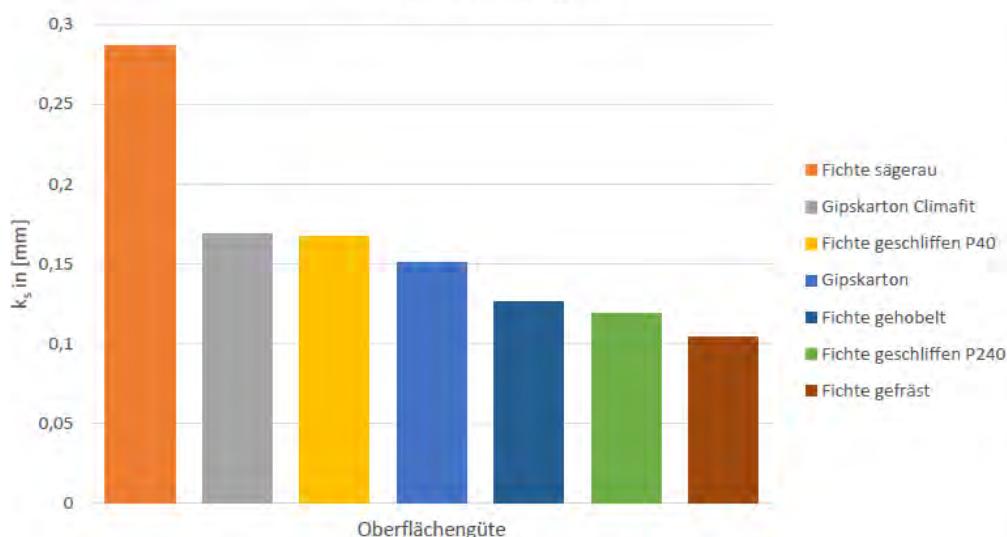
Abbildung 32 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Sandkornrauigkeit k_s (Eckel, 2021)



Tabelle 6: Tabellarische Darstellung der ermittelten Sandkornrauigkeit und den dazugehörigen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in den Kanälen (Eckel, 2021)

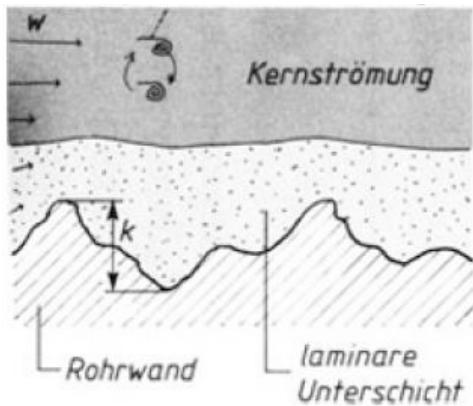
| Oberflächengüte: | k_s [mm] | w_m [m/s] |
|-------------------------|-------------|-------------|
| Fichte sägerau | 0,286723132 | 10,49 |
| Gipskarton Climafit | 0,168635856 | 11,22 |
| Fichte geschliffen P40 | 0,167463541 | 11,23 |
| Gipskarton | 0,150560368 | 11,36 |
| Fichte gehobelt | 0,126004512 | 11,58 |
| Fichte geschliffen P240 | 0,118912375 | 11,64 |
| Fichte gefräst | 0,104209754 | 11,79 |

Abbildung 33 Graphische Darstellung der ermittelten Sandkornrauigkeit aus den Messergebnissen (Eckel, 2021)



Die ermittelten Ergebnisse zeigen teilweise gute Übereinstimmungen mit der Literatur (Zanke, 2013). Jedoch konnten die großen Sandkornrauigkeiten für „ungehobeltes Holz“ nicht erreicht werden. Dies ist, unter anderem, auf die Genauigkeit des Prüfaufbaus sowie der Messinstrumente zurückzuführen. Durch die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich die Rauigkeiten besser unterschiedlicheren Holzoberflächen zuordnen. Eine Verifizierung dieser Ergebnisse könnte durch 3-D Oberflächenmessungen erfolgen. Dies wäre in weiterer Forschung denkbar. Allerdings konnte bei den Messungen gezeigt werden, dass es eine hohe Geschwindigkeit benötigt wird um die Rauigkeit zu messen. Bei geringeren Geschwindigkeiten, wie sie bei den Versuchen in den Testkübeln verwendet wurden, kann dieser Effekt weder gemessen werden noch tritt er tatsächlich auf, da sich eine laminare Unterschicht bildet. Diese Unterschicht bewirkt, dass sich eine „hydraulisch glatte“ Rohrströmung ausbildet und die Rauigkeit der Oberfläche keinen Einfluss auf die Kernströmung hat (Abbildung 34).

Abbildung 34 Turbulente Rohrströmung „hydraulisch glatt“ in einem Rohr (Böswirth & Bschorer, 2014)



Die Oberflächenbeschaffenheit der thermisch aktivierte Massivholzelemente hat, bei den in den Untersuchungen gefahrenen Geschwindigkeiten, keine Auswirkung auf die Leistung des Systems. Es muss weiter untersucht werden, ob bei höheren Geschwindigkeiten die Übertragung von Wärme oder Kälte vom Strömungsmedium Luft auf die Bauteilloberfläche beschleunigt werden kann.

Anbindung an die Wärme- und Kälteversorgung

Christian Hepf

Dieser Abschnitt beschäftigt sich zunächst mit der Anbindung von aktivierten Massivholzelementen an die Wärme- und Kälteversorgung der Gebäudetechnik mit dem Fokus auf luftgeführte Systeme. Darüber hinaus werden konzeptionell potentielle Steuer- und Regelungsalgorithmen aufgezeigt. Abschließend wird der Einfluss des Nutzers an Hand von einzelnen Szenarien herausgestellt. Die Inhalte dieses Kapitels wurden in enger Zusammenarbeit im Rahmen der Masterarbeit von (Ettenhuber) am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der Technischen Universität München erarbeitet und folglich sind die generellen Inhalte dieses Kapitels auf die Masterarbeit zurückzuführen.

Anbindung der luftgeführten Massivholzelemente an Gebäudetechnik

Die Anbindung und Energieverteilung kann einen großen Platzbedarf innerhalb des Gebäudes in Anspruch nehmen und sollte folglich frühzeitig im Planungsprozess berücksichtigt werden. Dieser Platz muss auf unterschiedlichen Ebenen im Gebäude geschaffen werden. Darüber hinaus gilt es, bei der Integration der Fluidkreisläufe (Luft oder Wasser) den Brand-, Schall-, Feuchte- und Wärmeschutz sowie die statischen Qualitäten des Elements zu beachten.

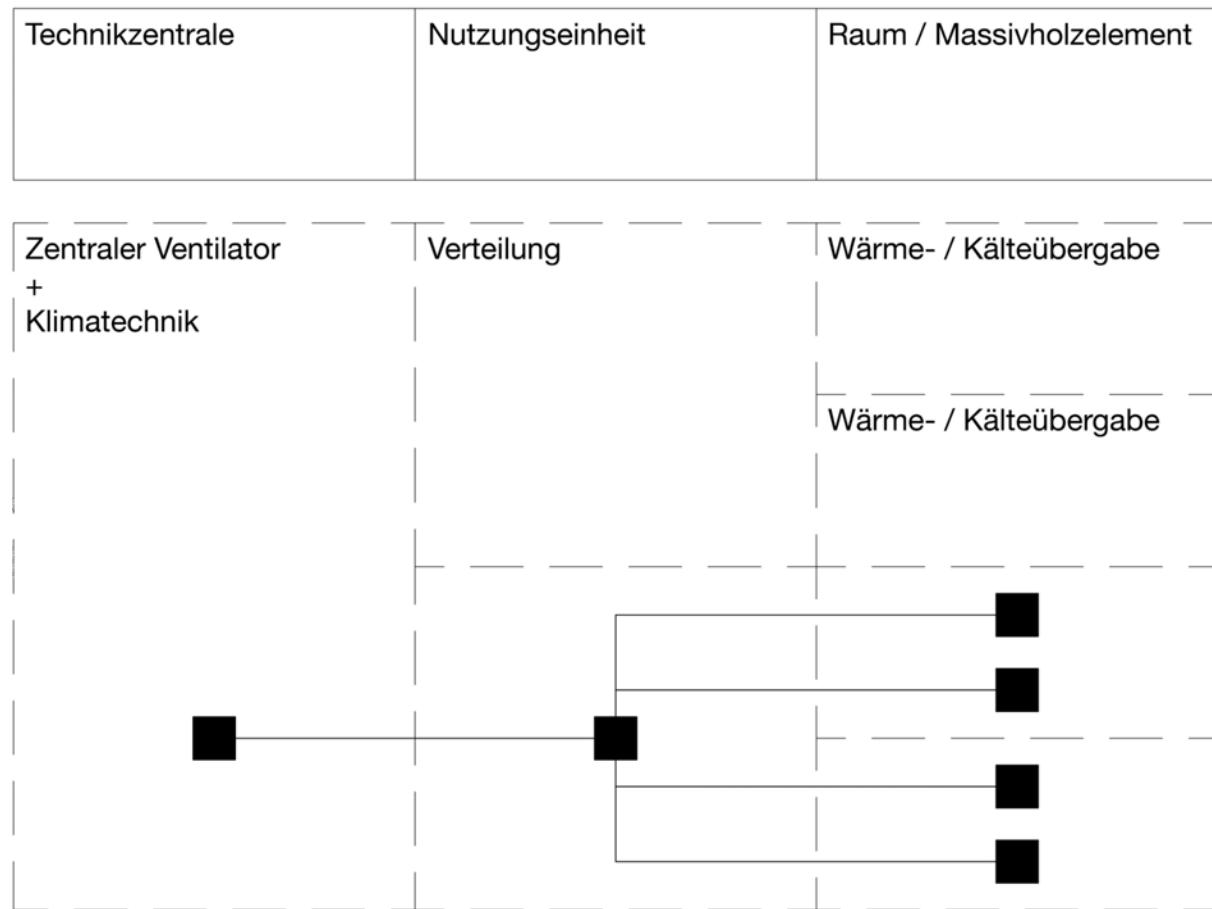
Bei luftgeführten Systemen sorgt die strömende Luft für erzwungene Konvektion an den Kanalwänden. Die ausgefräste, zweite Schicht dient der Luftführung, sorgt aber weiterhin für eine feste Verbindung zwischen Schicht eins und drei. In den festen Komponenten tritt Wärmeleitung und -speicherung auf. Die Kanäle ermöglichen Sichtkontakt zwischen Schicht eins und drei. Somit kann hier auch ein Strahlungsaustausch stattfinden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Möglichkeiten aufgezeigt ein thermisch aktiviertes Massivholzelement in einem Gebäudetechniksystem zu integrieren sowie die lokalen Anbindmöglichkeit des Massivholzelements beschrieben. Dies wird zunächst konzeptionell und anschließend auf der Ebene der Verteilungsstruktur aufgezeigt. Die Energieversorgung kann dabei zentral, semizentral oder dezentral verteilt werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Anbindung sich nur auf ein luftgeführtes System fokussiert. Die Anbindung eines wassergeführten TAMs macht generell besonders zentral verteilt Sinn und wird im letzten Abschnitt erläutert.

Zentrale Verteilung

Grundsätzlich handelt es sich bei den Verteilnetzen um geschlossene Kreisläufe, in welchen das Medium umgewälzt wird. Die Verteilungsstrukturen werden jeweils in drei Ebenen, der Technikzentrale, einer Nutzungseinheit und schließlich dem Raum, gegliedert.

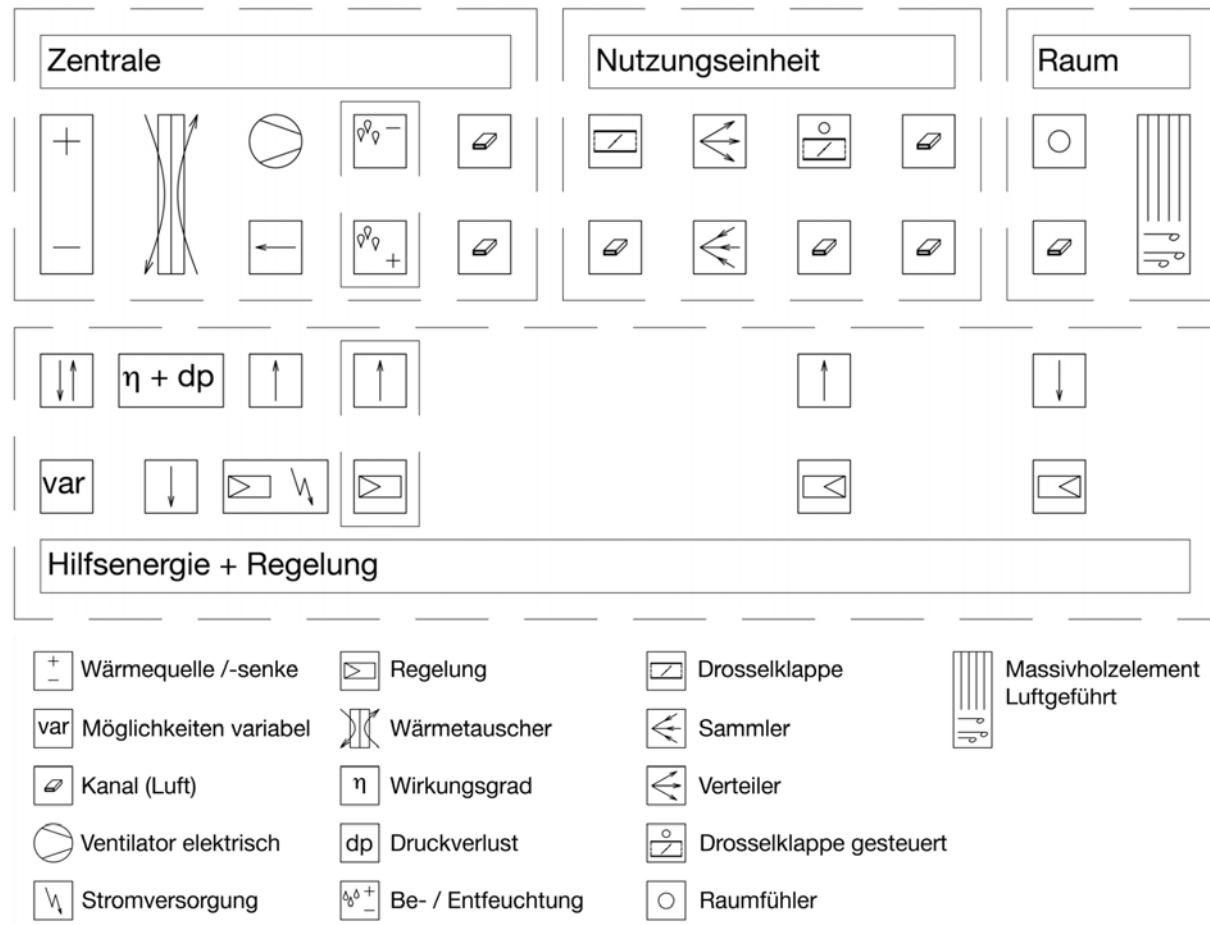
Abbildung 35 Konzept - Zentrale Anbindung eines luftgeführten Systems an Gebäudetechnik (vgl. Ettenhuber, 2020)



Zentrale Verteilungsstruktur

Zentrale Komponenten innerhalb der Nutzungseinheit stellen hier die Verteileinheit und die Regelungskomponenten dar. Zunächst wird die Luft auf die Räume durch den Verteiler aufgeteilt. Die Anlage muss hydraulisch reguliert werden, wie bei einem wassergeführten System. Nachfolgend wird die Analgenkonfiguration dargestellt.

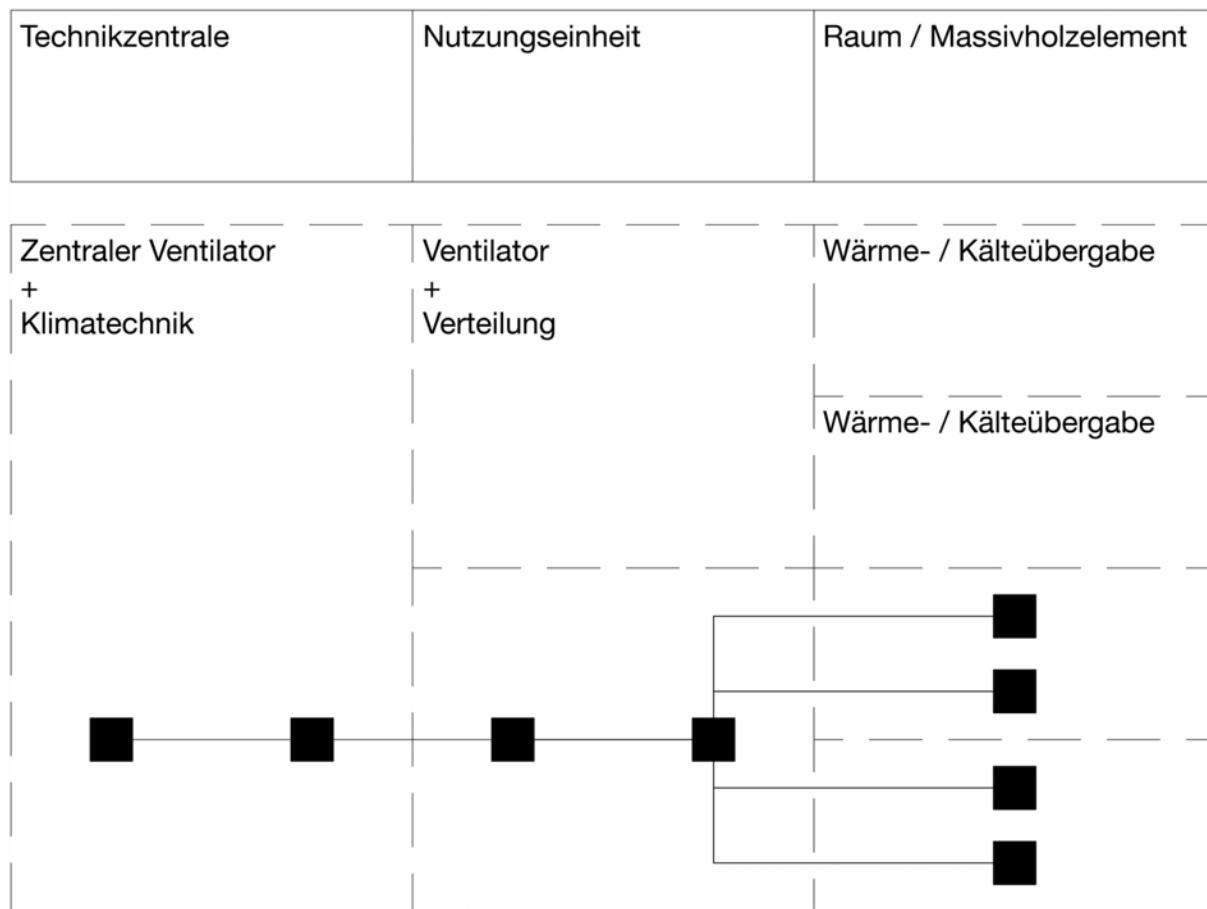
Abbildung 36 Anlagenkonfiguration zentrale Verteilung eines luftgeführten Systems + Legende Energieverteilung
(Ettenhuber, 2020)



Semizentrale Verteilung

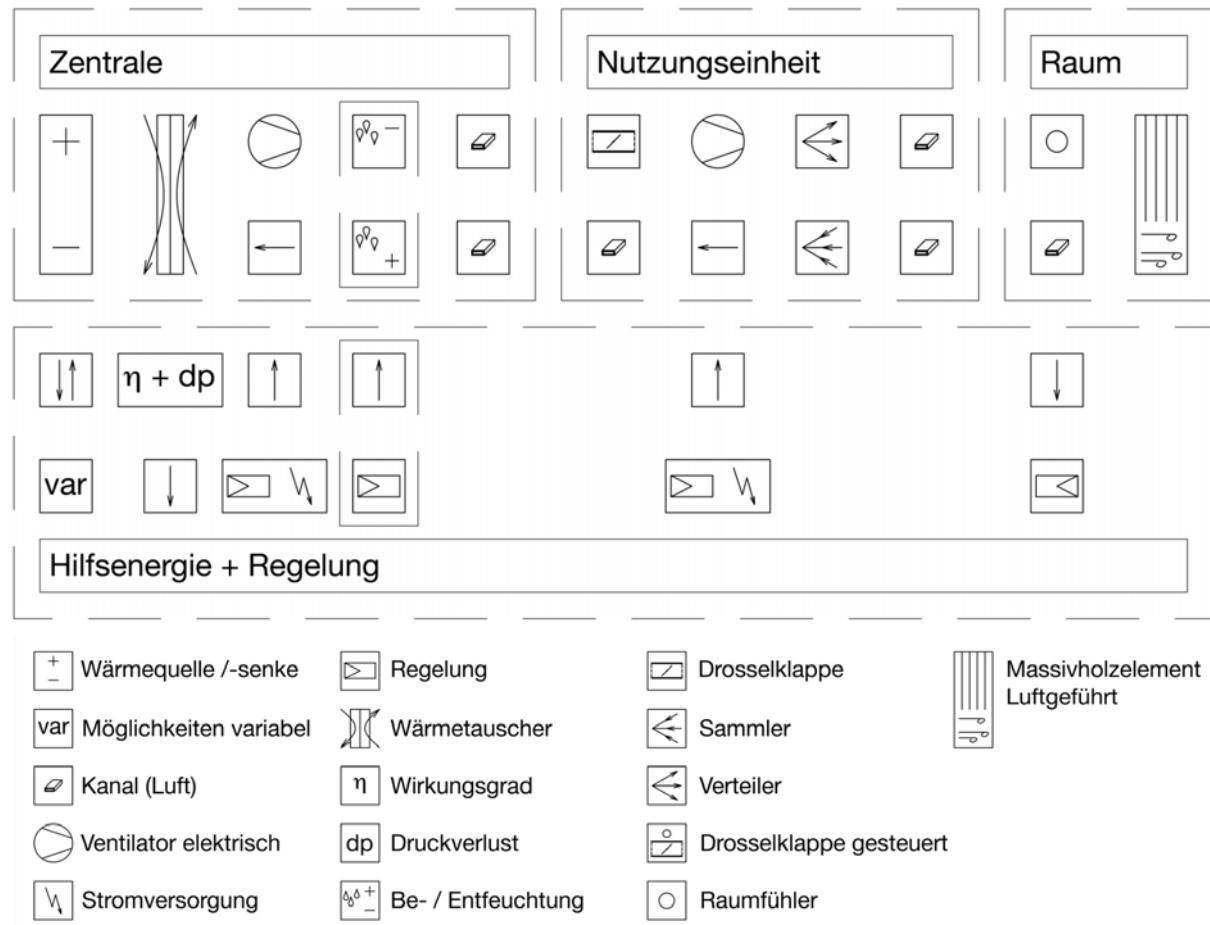
Im Gegensatz zur zentralen Verteilung wird in der semizentralen Struktur ein weiterer Ventilator auf der Ebene der Nutzungseinheit ergänzt. Basierend auf dem geringen elektrischen Energieverbrauch von Ventilatoren kann so eine Energieeinsparung in der Verteilung entstehen. Der zentrale Ventilator in der Technikzentrale wird somit unterstützt. Die Wärme- bzw. Kälteversorgung sowie eine eventuelle Feuchtebehandlung der Luft findet weiterhin zentral statt.

Abbildung 37 Konzept - Semizentrale Anbindung eines luftgeführten Systems an Gebäudetechnik (Ettenhuber, 2020)



Um das Tam semizentral anzubinden, muss vorausgesetzt sein, dass die einzelnen Lastprofile der Räume definiert sind und die Regelungssysteme aufeinander eingestimmt sind. Die Dimensionierung der Anlage kann durch eine Überschneidung der einzelnen Lasten und dem Netz optimiert werden und zu Energieeinsparungen führen. Besonders ist in diesem Fall auf den Schall- und Brandschutz zu achten, welche durch Klappen oder Schalldämpfer bereitgestellt werden kann.

Abbildung 38 Anlagenkonfiguration semizentrale Verteilung eines luftgeführten Systems + Legende Energieverteilung (Ettenhuber, 2020)

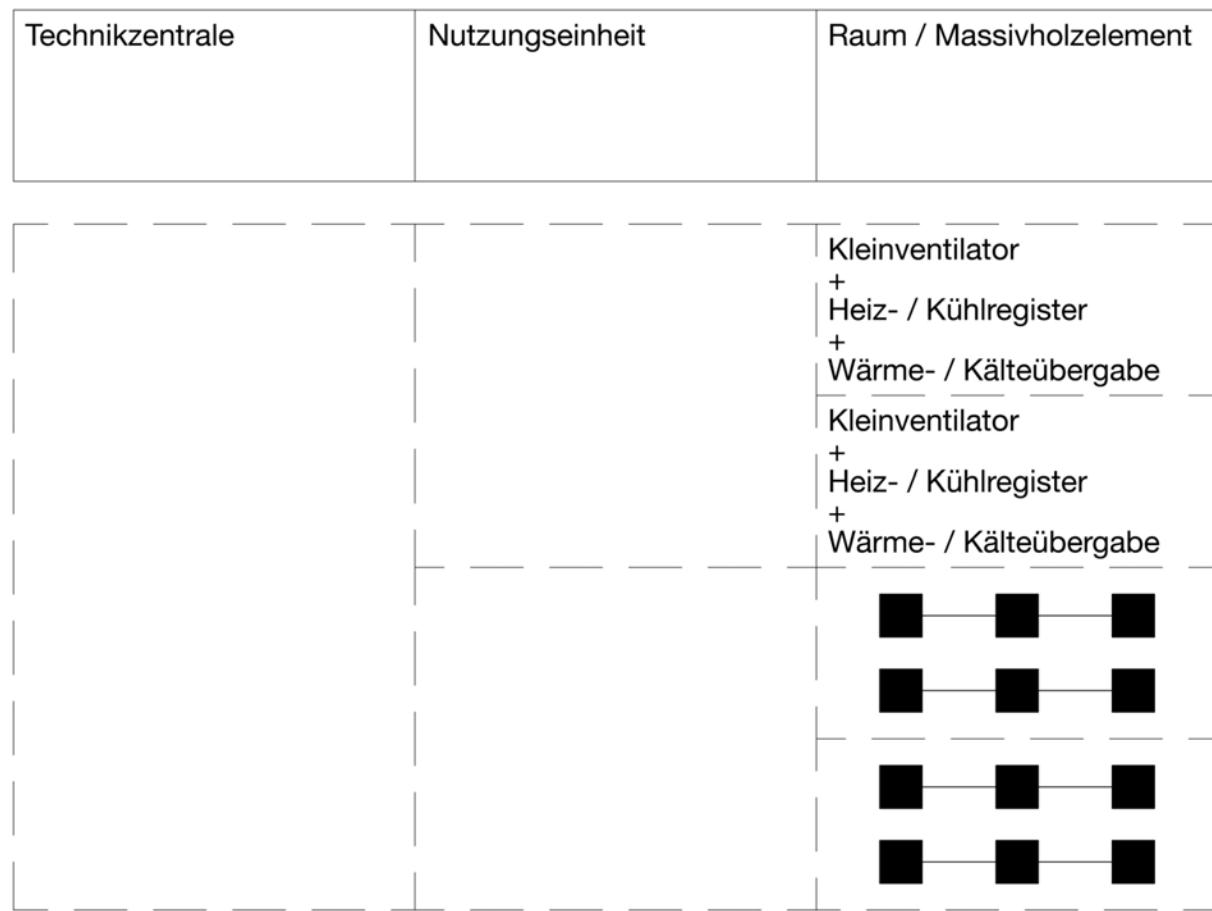


Bei einer Sanierung auf Stockwerkebene kann die semizentrale Verteilung auch für die Bestandsintegration sinnvoll sein. Im Gegensatz zur Versorgung der Räume durch die zentrale Klimatechnik wird ein Wärmetauscher in einer Nutzungseinheit an ein bestehendes Heizsystem angeschlossen.

Dezentrale Verteilung

Bei der dezentralen Anbindung werden die Elemente individuell im Raum einzeln angeschlossen. Hierbei verfügt jedes Element über eine eigene Gebäudetechnik bestehend aus einem Ventilator und einem Wärmetauscher. Somit kann das Element gesondert mit Wärme und Kälte versorgt werden und somit die thermischen Bedingungen im Raum individuell erzeugt werden.

Abbildung 39 Konzept - dezentrale Anbindung eines luftgeführten Systems an Gebäudetechnik (Ettenhuber, 2020)



Nachfolgend wird erneut eine mögliche Verteilungsstruktur dargestellt. Im Heiz- und Kühlfall sollte auf Revisionsklappen geachtet werden. Darüber hinaus sollte hier erneut auf Schall- und Brandschutz geachtet werden, da die Gebäudetechnik mittlerweile lokal im Raum angesiedelt ist.

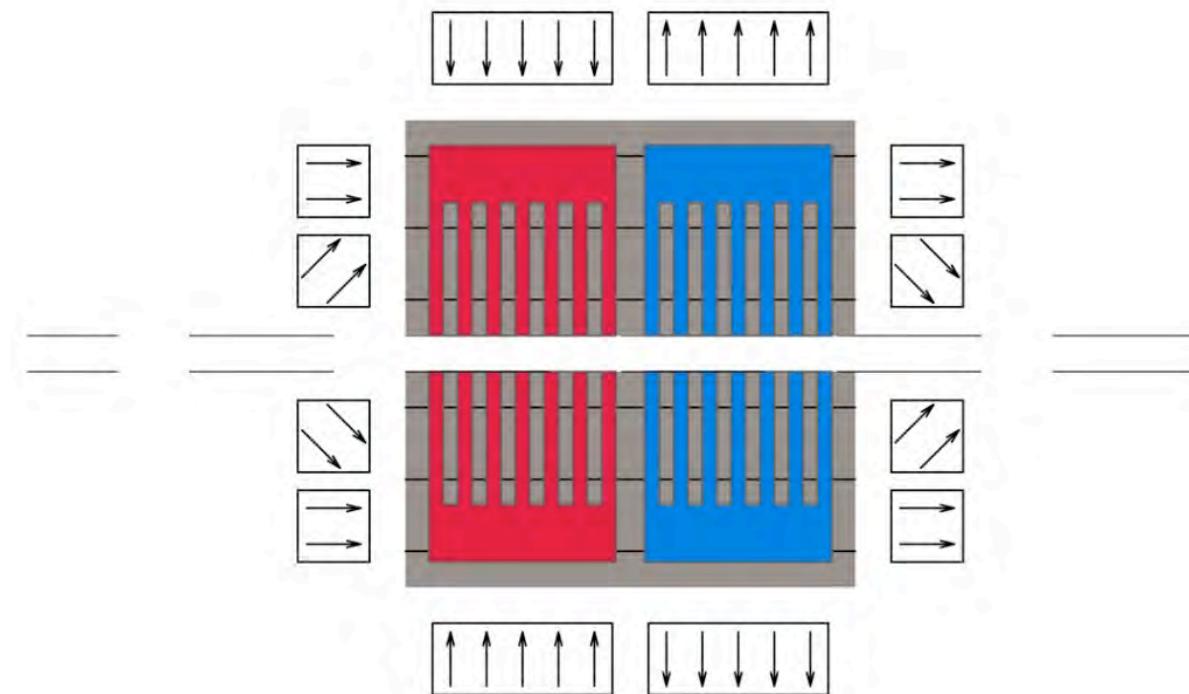
Abbildung 40 Anlagenkonfiguration dezentrale Verteilung eines luftgeführten Systems + Legende Energieverteilung (Ettenhuber, 2020)



Lokale Anbindung des Massivholzelements

Thermisch aktivierte Massivholzelemente werden wie Heizkörper oder andere Heizelemente zweifach angeschlossen, am Vorlauf und am Rücklauf. Diese können im Falle des Massivholzelements, wie in der nachfolgenden Grafik unterschiedlich am Element angebracht werden. Dies hängt besonders von der Art der Positionierung des Massivholzelements (Boden, Decke oder Wand), aber auch von der vorher beschriebenen Anbindung an die Gebäudetechnik ab. Darüber hinaus können hier Schallschutz, lokaler Randbedingungen und Zugänglichkeit im konkreten Fall eine Rolle spielen. Das potentielle Konzept einer Anbindung des Vor- und Rücklaufs ist in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

Abbildung 41 Konzept - Anbindung Vor- und Rücklauf an TAM (Ettenhuber, 2020)

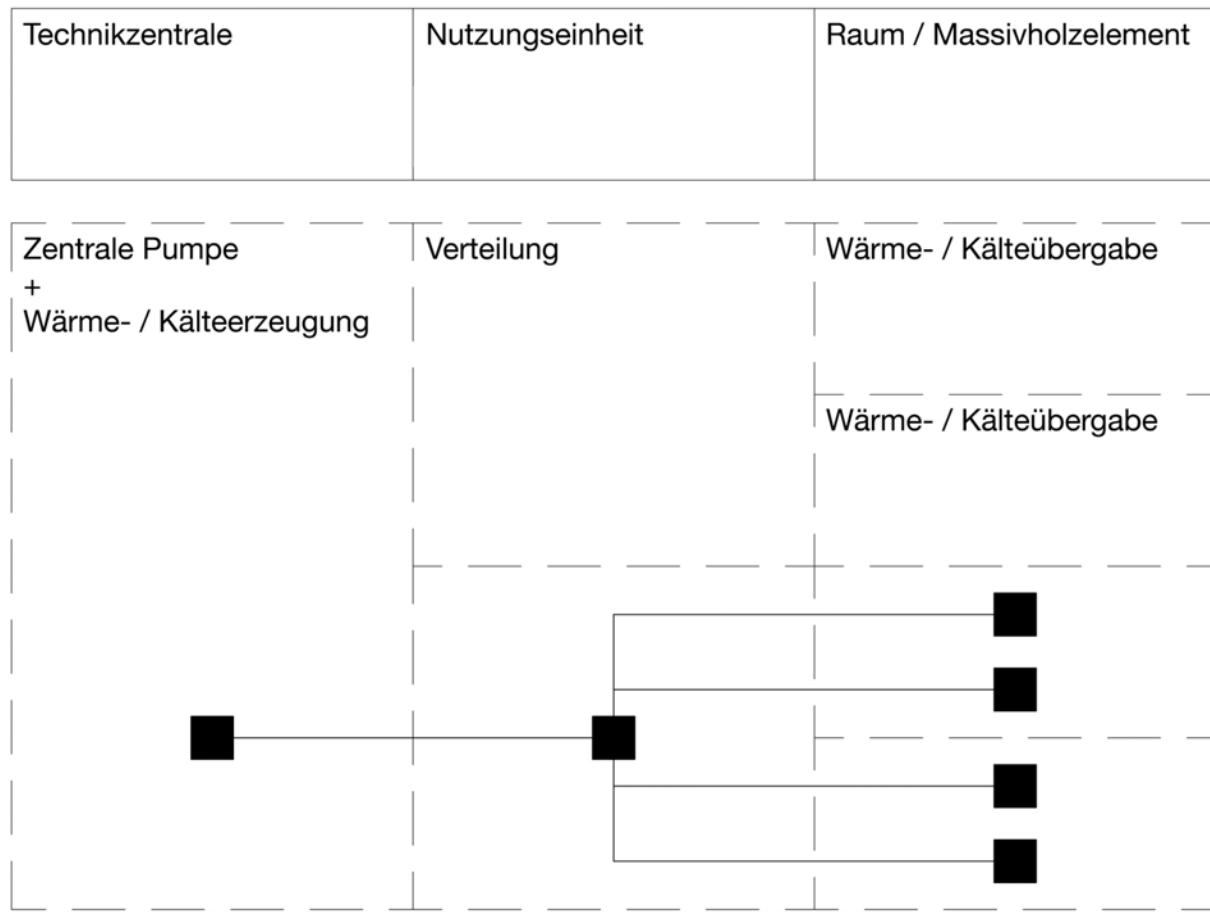


Anbindung von wassergeführte aktivierte Massivholzelemente an Gebäudetechnologie

Optional, in diesem Forschungsprojekt aber nicht betrachtet, könnte das thermisch aktivierte Massivholzelement auch mit Wasser geführt werden. Hierbei müssten wasserdichte Kanäle in die ausgefrästen Luftkanäle integriert werden. Die Musterdetails werden in diesem Forschungsprojekt nicht beschrieben, dennoch wird nachfolgend die konzeptionelle Anbindung an die Gebäudetechnologie beschreiben.

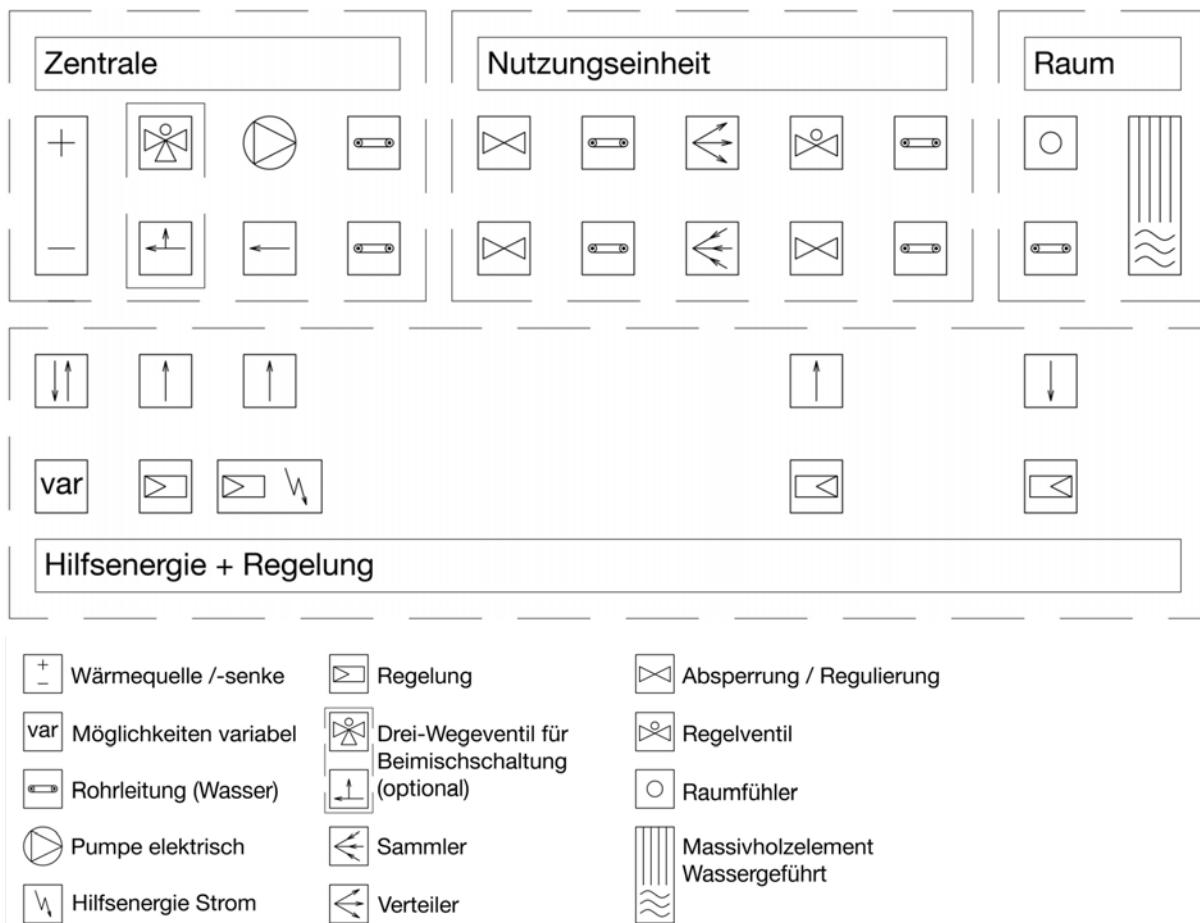
Bei einem wassergeführten System wird ein Wärmetauscher in das Massivholzelement eingehängt. Innerhalb des Wärmetauschers, der in die Schicht zwei eingebracht wird, strömt Wasser und verursacht erzwungene Konvektion zwischen der Innenwand des Wärmetauschers und dem Medium Wasser. Basierend auf der Tatsache, dass das Heiz- und Kühlsysteme in Gebäude zumeist grundsätzlich wassergeführt sind, stellt die Anbindung von wassergeführten Systemen an bestehende Gebäudetechnologie komplett andere Anforderungen wie bei einem luftgeführten System.

Werden die Massivholzelemente mit Wasser versorgt, empfiehlt sich die zentrale Verteilung. Eine Zwischenschaltung eines Wärmetauschers sorgt für Energieverluste und Wärmeabgabe von Medium eins auf Medium zwei. Zudem sprechen die positiven Eigenschaften des Wassers (Wasserspeicherfähigkeit, homogene Energieverteilung etc.) für eine Verteilung durch das Medium Wasser. Die zentrale Verteilung je Nutzungseinheit zeichnet sich durch die Versorgung aus der Technikzentrale über lediglich einen Strang aus. Die weitere Verteilung folgt dann in der jeweiligen Nutzungseinheit bis zur Kälte- bzw. Wärmeübergabe im Raum. In der nachfolgenden Grafik ist das Konzept einer zentralen Verteilung eines wassergeführten Systems dargestellt.

Abbildung 42 Konzept - Zentrale Anbindung eines wassergeführten Systems an Gebäudetechnik (Ettenhuber, 2020)


Standardmäßig werden durch Wasser aktiverter Bauteile von einem zentralen System durch Pumpen mit Energie versorgt. Klassischer Weise werden hier die Zieltemperaturen über die Regelung der Vorlauftemperatur und des Massenstroms kontrolliert. Gleichzeitig kann durch ein Drei-Wege-Ventil und dem Rücklauf die Energieeingabe im Raum zusätzlich geregelt werden. Zusätzliche Regelventile koordinieren den Massenstrom im gesamten Gebäude, um allen Heizübergabesystemen potentiell die gleiche Menge an Energie zur Verfügung zu stellen. Die nachfolgende Abbildung stellt die schematischen Möglichkeiten zur Versorgung der Elemente im Raum dar.

Abbildung 43 Anlagenkonfiguration zentrale Verteilung eines wassergeführten Systems + Legende
Energieverteilung (Ettenhuber, 2020)



Einfluss durch den Nutzer

Christian Hepf

Da es sich bei dem TAM bezogen auf die Heiz- und Kühlleistung um ein trüges System handelt, ist der Einfluss durch den Nutzer beschränkt. Durch die verhältnismäßig große Reaktionszeit des Systems auf die operative Temperatur (die gilt für eine zentrale, semi-zentrale oder dezentrale Anbindung) können die thermischen Innenraumbedingungen nur sehr langsam, aber dafür mit einem großen Hebel beeinflusst werden. Dies bringt nachfolgende Vor- und Nachteile mit:

Vorteile

- Durch die große Strahlungsfläche des Systems kann ein großer Einfluss auf die operative Temperatur und somit auf den thermischen Komfort des Nutzers genommen werden
- Durch die große Speichermasse des Elements kann potentiell Lastmanagement mit dem Gebäude betrieben werden (Gerhard Hausladen, 2014)
- Weiterhin kann durch eine intelligente Regelung durch die Trägheit des Systems sehr akkurat eine Grundheiz- oder auch Kühlleistung für einen Raum erzeugt werden (Jungwirth, 2014)

Nachteile

- Durch die Trägheit des Systems können nur sehr langsam die thermischen Bedingungen im Raum durch das TAM reguliert werden, dies führt zu:
 - Einem verzögerten Einfluss auf den thermischen Komfort des Nutzers
 - Der Dringlichkeit einer intelligenten Regelungsstrategie, um den thermischen Komfort und die energetische Performance zu vereinen
 - Optional: Ergänzen des Heiz-bzw. Kühlsystems durch ein weiteres Element, um lokalen Komfort bereitzustellen
- Vermeidung des Verdeckens der Flächen durch beispielsweise Möbel, Wandteppiche oder Aufhängungen im Raum
- Bei einer dezentralen Versorgung kann es zu trockener Luft im Raum führen. Dies sollte weiter durch eine detaillierte Analyse der Partikelströme in einem Raum untersucht werden.

Kapitel III – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung

Modifikation der Oberflächenbeschaffenheit zur Nutzung hygrokopischer Enthalpie-Effekte an Holzoberflächen, Messtechnische Ermittlung fehlender Kennwerte im Labor, Messtechnische Validierung im Labor, Raumklimasimulation zur Quantifizierung der hygrokopischen Enthalpie-Effekte auf die thermische Behaglichkeit im Sommer sowie den Heiz- und Kühlenergiebedarf, Modifikation der Oberflächenbeschaffenheit bei Lehmoberflächen

Grundlegende Untersuchungen des Enthalpieeffekts

Nina Flexeder

Nutzung der Sorptionsenthalpie in der Gebäudeklimatisierung?

Zur Optimierung der Potenziale von hygrothermisch aktivierte Bauteile wird der Untersuchungsrahmen zunächst allgemein auf Bauteile mit hygrokopisch aktiven Oberflächen ausgeweitet. Dies umfasst Holz- aber auch Lehm- oder Gipsbaustoffe, welche in ständigem Austausch mit dem Umgebungsklima stehen. Ändert sich die umgebende relative Luftfeuchte, so passt sich das Material durch Sorption daran an und es wird Sorptionsenthalpie frei beziehungsweise gebunden. Dieser Prozess geschieht stets in Abhängigkeit der Zeit und der materialspezifischen hygrokopischen Umschließungsflächen des jeweiligen Raumes. Das physikalische Phänomen wird in der Regel bei der klimatischen Gebäudesimulation bisher nicht bewusst zur intelligenten Regelung genutzt. Es könnte aber bei der Klimatisierung mit besonders hygrokopischen Materialien wie beispielsweise Holz- oder Lehmaufbauten einen zusätzlichen Vorteil zur Energieeinsparung bringen.

Die möglichen Sorptionsprozesse mit darauffolgender Temperaturänderung lassen sich schematisch zu vier Lastfällen zusammenfassen. Nimmt die Wand Feuchtigkeit auf, kondensiert der Wasserdampf in den Baustoffporen und es wird infolge des Phasenwechsels Enthalpie frei. Die Wand erwärmt sich (Abbildung 44, Abbildung 47). Ist die Raumluftfeuchte trockener als das Bauteil, so verdampft in den Poren gespeichertes Wasser zurück in die Raumluft. Für diesen Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig wird Enthalpie benötigt, sodass die Wand abkühlt (Abbildung 45, Abbildung 46).

Abbildung 44 Kalt + feucht.
Oberflächen sorbieren Wasserdampf, es folgt eine Erwärmung der Wand.

Abbildung 45 Warm + trocken.
Oberflächen desorbieren Wasserdampf, es folgt eine Abkühlung der Wand.

Abbildung 46 Kalt + trocken.
Oberflächen desorbieren Wasserdampf, es folgt eine weitere Abkühlung der Wand.

Abbildung 47 Warm + feucht.
Oberflächen sorbieren Wasserdampf, es folgt eine weitere Erwärmung der Wand.

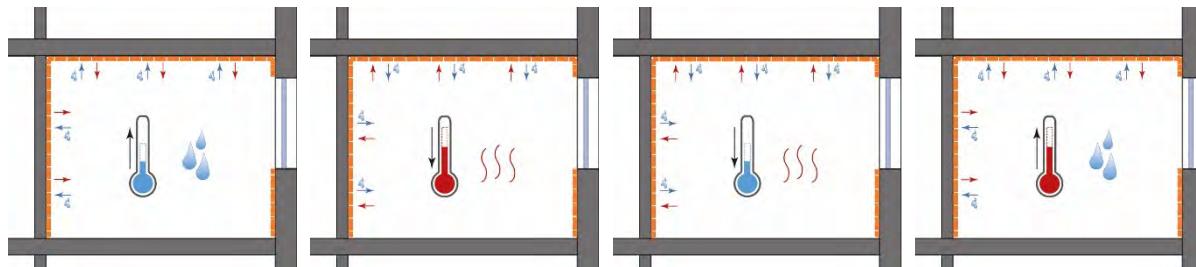


Abbildung 44 – Abbildung 47: eigene Darstellungen (Flexeder)

Derartige Sorptionsprozesse laufen ab, sobald die relative Luftfeuchte nicht mehr der Materialfeuchte entspricht. Die Temperaturänderung kann sich dabei sowohl positiv (Abbildung 44, Abbildung 45) als auch negativ (Abbildung 46, Abbildung 47) auf das Raumklima auswirken. Der Innenraum wird dabei als geschlossenes System betrachtet, an dessen Grenzen feuchtere oder trockenere, wärmere oder kältere Luft zu- beziehungsweise abgeführt wird. Zudem gibt es im Raum potentielle Feuchte- und Wärmequellen. Gemäß dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik ist es nicht möglich, durch diese Herangehensweise tatsächlich 'neue' Energie zu gewinnen. Vielmehr steht im Fokus, Be- und Entlastungen mit Feuchte sowie den damit verbundenen Phasenwechseln so zu steuern, dass die Behaglichkeit für den Raumnutzer am größten ist.

Bauphysikalische Grundlagen zu hygrothermischen Speicherkapazitäten

Thermische Masse

Um zu beschreiben, wie schnell ein Material oder Bauteil auf klimatische Veränderungen reagiert, wird oft metaphorisch der Begriff der „Masse“ verwendet. Er orientiert sich an der kinetischen Trägheit schwerer Objekte. Im Englischen ist der Begriff „thermal mass“ auch im wissenschaftlichen Kontext stark verbreitet und wird dem Begriff „heat capacity“ [J/K] gleichgesetzt. Die im Deutschen sogenannte Wärmekapazität c [J/kgK] eines Materials beschreibt, wie viel Energie nötig ist, um ein Kilogramm davon um ein Kelvin zu erwärmen. Dementsprechend gilt: Je höher die Wärmekapazität eines Bauteils ist, desto höher ist seine sogenannte „thermische Masse“.

Besonders bei der Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes wird der thermischen Trägheit eines Gebäudes große Bedeutung zuteil. Es wird deshalb nach leichter, mittlerer und schwerer Bauweise anhand der Wärmespeicherfähigkeit unterschieden. DIN 4108-2:2013-02 definiert die wirksame Wärmespeicherfähigkeit $C_{wirk, therm}$ einer Wand als die Summe der jeweiligen Wärmekapazitäten, Rohdichten und Volumina aller Baustoffsichten (Schild & Willems, 2013):

$$C_{wirk, therm} = \sum_j c_j \rho_j d_j A_j$$

| | |
|------------|---|
| c_j = | spezifische Wärmekapazität des Baustoffs in Schicht j [J/kgK] |
| ρ_j = | Rohdichte des Baustoffs in Schicht j [kg/m ³] |
| d_j = | wirksame Schichtdicke der Schicht j [m] |
| A_j = | wirksame Bauteiloberfläche [m ²] |

Hygrische Masse

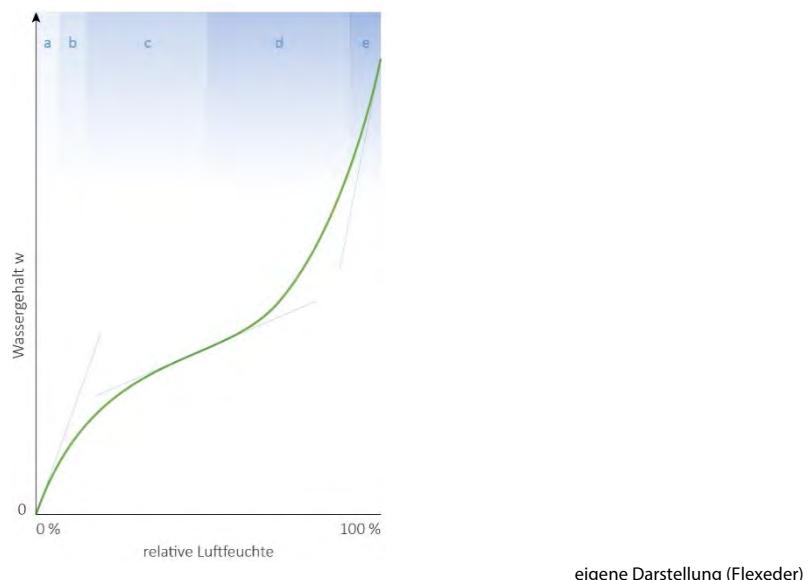
Materialien stehen grundsätzlich mit der Umgebung im ständigen Feuchtigkeits- und Wärmeaustausch. Erhöht sich die relative Feuchtigkeit der Luft, so passt sich der Feuchtegehalt des Materials dementsprechend an. Welche Wassermenge dabei aufgenommen wird und wie lange es dauert, bis ein Gleichgewicht erreicht wird, hängt sowohl von den Materialeigenschaften als auch von Temperatur und Wassergehalt der Umgebungsluft ab. Dabei gilt es zu beachten, dass die Materialfeuchte mithilfe von Sorptionsisothermen in der Regel auf den Wert der relativen Luftfeuchte bezogen wird. Sie beschreiben, welcher Wassergehalt w sich einstellt, wenn ein gewisser Stoff mit einer bestimmten Luftfeuchte φ im Gleichgewicht steht und weisen bei hygrokopischen Baustoffen meist die typische Kurvenform des Typ II auf, vgl. Abbildung 48.

Dazu wird auf der Abszisse eines kartesischen Koordinatensystems die relative Luftfeuchte von 0 % bis 100 % aufgetragen. Jedem Luftfeuchtwert kann ein eindeutiger Wert des Wassergehalts auf der Ordinate

zugeordnet werden. Je nach Literaturquelle wird der Wassergehalt w des Sorbats in Bezug zur gesamten Masse des Sorbens [kg/kg] oder zum Volumen [kg/m³] ausgedrückt. Für die Darstellung der Sorptionsisothermen in diesem Projekt wird ausschließlich der volumenbezogene Wassergehalt verwendet, wo notwendig werden Literaturwerte mithilfe der Rohdichte ρ umgerechnet. In Abschnitt „Ergebnisse der Ermittlung von Sorptionsisothermen“ werden die Sorptionsisothermen der gewählten Baustoffe in eigenen Messreihen bestimmt.

Der Sorptionsprozess ist von Temperatur und Feuchte der Umgebungsluft sowie den Eigenschaften des Materials abhängig. Die Adsorption von Wasserdampf an einen Feststoff kann mit Sorptionsisothermen materialspezifisch beschrieben werden. Analog zur Definition der thermischen Masse, besitzt ein hygrisch „schweres“ Material eine hohe Speicherfähigkeit. Im Vergleich kann dieses Material eine große Menge an Wasserdampf aus einem Raum aufnehmen, speichern, wieder abgeben und hierdurch Feuchteschwankungen ausgleichen (Künzel et al., 2006b). Die hygrische Masse beschreibt demnach das Potential, Feuchte zu puffern. Analog zur Beschreibung der thermischen Speicherfähigkeit durch die Wärmekapazität c [J/kgK] könnte die hygrische Speicherfähigkeit eines Materials durch die Sorptionsisotherme beschrieben werden.

Abbildung 48 Sorptionsisotherme Typ II



Anders als bei der thermischen Masse gibt es für die hygrische Masse keine normative Definition. (Otto, 1995) definiert eine sogenannte wirksame hygrische Raumkapazität über die Verrechnung der wirksamen hygrischen Speicherkapazität einzelner Sorptionselemente, vgl. Abschnitt „Abschätzung der potenziellen Sorptionsenthalpie auf Basis der hygrischen Speicherkapazität“, S. 77 ff.

In der englischsprachigen Fachliteratur werden zur Quantifizierung der Feuchtespeicherung auf Raumlevel verschiedene Berechnungsansätze vorgeschlagen, vgl. Abschnitt „Theoretische Modelle zum instationären Feuchtigkeitsaustausch in Innenräumen“, S. 78 ff.

Hygrothermische Masse

Der Begriff der hygrothermischen Masse ist relativ neu und noch nicht klar definiert. In (Nore, 2016) wird „hygrothermal mass“ als eine Ergänzung zur hygrischen Speicherfähigkeit vorgestellt. Durch die freiwerdende Wärme beim Sorptionsprozess sollen Heizlasten reduziert werden. Ebenso sollen Kühllasten durch die erhöhte Feuchtigkeitsaufnahme und damit verbundener Abkühlung der Wände bei hygrokopischer Bauweise sinken. Eine mögliche Quantifizierung dieses Potentials ist noch nicht bekannt.

Physik der Latentwärmeeffekte am Beispiel der Holzfeuchte

Infolge von Feuchtebewegungen im Material kann es zu Enthalpieströmen und dadurch zu Wärmetransport im Material kommen. Die Ströme sind an Wasser als Medium gebunden. Insbesondere die Enthalpieströme infolge von Wasserdampfdiffusion verbunden mit Phasenänderungen können einen großen Einfluss auf die Wärmebilanz des Bauteils oder Materials haben (Künzel, 1994). Die Enthalpieströme infolge von Flüssigtransport sind vernachlässigbar.

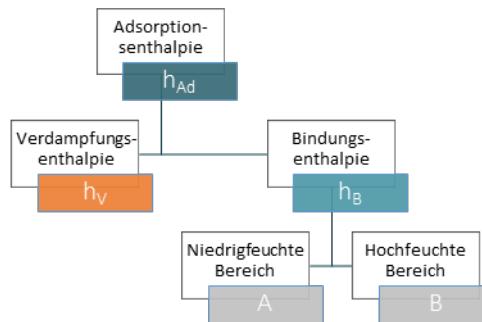
Beim Transport von Feuchte in beziehungsweise durch eine Materialschicht kommt es zu Enthalpieänderungen, welche durch ein Freiwerden sensibler Wärme erfahrbar beziehungsweise messbar werden. Die Wärmebilanz eines Bauteils infolge von Wasserdampfdiffusion in Kombination mit einer Phasenänderung kann durch Enthalpieströme wesentlich beeinflusst werden (Ineichen, 2020; Künzel, 1994).

Diese Phänomene lässt sich aus zwei Komponenten zusammensetzen und wird als Adsorptionsenthalpie h_{Ad} bezeichnet (Schmidt & Gertis, 2015).

$$h_{Ad} = h_V + h_B$$

Die latente Verdampfungsenthalpie h_V beim Phasenwechsel (flüssig-gasförmig) und die sorptive Bindungsenthalpie h_B der Wassermoleküle in den Baustoffporen bilden zusammen die Adsorptionsenthalpie h_{Ad} .

Abbildung 49 Zusammensetzung der Adsorptionsenthalpie nach (Schmidt & Gertis, 2015)



eigene Darstellung (Flexeder) nach (Schmidt & Gertis, 2015)

Die Verdampfungsenthalpie h_V von Wasser bei der Phasenänderung dampfförmig-flüssig ist nicht konstant. Sie fällt im bauphysikalisch interessanten Bereich linear von etwa 2500 kJ/kg bei 0 °C auf etwa 2400 kJ/kg bei 40 °C ab (Schmidt & Gertis, 2015). Die Entropieänderung beim Verdunsten ist damit in Abhängigkeit der Temperatur direkt proportional zur Verdampfungsenthalpie.

$$h_V = T \Delta s_V$$

Bei der Simulation mit den Programmen von WUFI (Wärme und Feuchte instationär, Fraunhofer Institut) wird die Verdampfungsenthalpie h_V auf den konstanten Wert von 2500 kJ/kg vereinfacht (Künzel, 1994). Somit wird die Sorptionswärme bei raumtypischen Temperaturen von 20 °C geringfügig zu hoch berechnet.

Das Phänomen der Materialerwärmung infolge von Anlagerung von Wassermolekülen an die Zellwand wurde bereits 1896 von Volbehr als „Quellungswärme“ beobachtet und experimentell mittels Kalorimeter an Fichtenproben gemessen (Fortuin, 2003; Skaar, 1972). Die hieraus abgeleitete integrale Bindungsenthalpie H_B mit der Einheit [kJ/kg_{trockenes Holz}] lässt sich nach der jeweiligen Holzfeuchte u [M.-%] schrittweise differenzieren. Es ergibt sich die differentielle Bindungsenthalpie h_B [kJ/kg_{Wasser}], welche die Bindungsenthalpie bezogen auf 1 kg sorbiertes Wasser in Abhängigkeit der Holzfeuchte u angibt.

Die sorptive Bindungsenthalpie h_B wird in (Künzel, 1994) und zum Teil in (Schmidt & Gertis, 2015) auch als „baustoffabhängige Sorptionsenthalpie“ bezeichnet. Um Verwechslungen vorzubeugen, wird im Folgenden nur der Begriff der Bindungsenthalpie h_B verwendet. Sie kann gemäß (Krischer & Kast, 1978; Schmidt & Gertis, 2015) als jene Energiemenge begriffen werden, die nötig ist, um den Wasserdampf von einem beliebigen Dampfdruck p (gasförmig) bis zum Taupunkt, das heißt bis zum Sättigungsdampfdruck p_s , isotherm zu verdichten. Es kommt zu einer Entropieänderung Δs_B .

$$h_B = T \Delta s_B$$

Mit zunehmendem Abstand des Sorbats vom Sorbens verringert sich die Bindungsenthalpie (Künzel, 1994). Die Unterscheidung der Sorptionsenthalpie h_B in Niedrig- und Hochfeuchtebereich orientiert sich an der Kurvenform der Sorptionsisotherme. Etwa im Bereich rund um 50 % relativer Feuchte ändert sich die Krümmungsrichtung, hier verläuft die Grenze zwischen Feuchtebereich A und B. (Schmidt & Gertis, 2015) leiten nach (Krischer & Kast, 1978) über den Gleichgewichtsdampfdruck in der Baustoffkapillare folgende Beschreibung ab:

$$h_B = -R T \ln \varphi$$

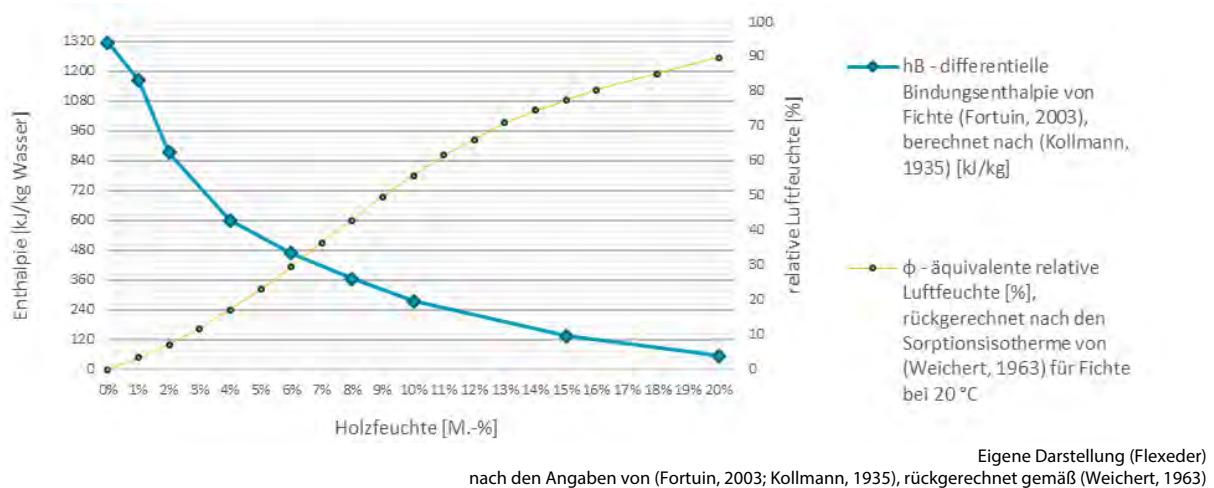
Der Niedrigfeuchtebereich A endet mit dem Erreichen einer monomolekularen Sorbatschicht. Dementsprechend dominieren die Van der Waals'schen Bindungskräfte die sorptive Bindung h_B im Niedrigfeuchtebereich A (vgl. Abbildung 48, a-b).

Ab einer mehrschichtigen Belegung der Poreninnenwand tritt Kapillarkondensation auf. Die daraus resultierenden Grenzflächenkräfte bestimmen die sorptive Bindungsenthalpie h_B im Hochfeuchtebereich B (vgl. Abbildung 48, c-e). In diesem Bereich wird der Wert der Bindungsenthalpie h_B bei hohen Luftfeuchten durch die logarithmische Beziehung nahezu konstant. Das bedeutet: je höher die relative Luftfeuchte φ [%], desto geringer ist der Einfluss der Bindungsenthalpie h_B auf den Wert der gesamten Adsorptionsenthalpie h_{Ad} .

Kenntnisse über die Adsorptionsenthalpie h_{Ad} von Holzsorten spielen insbesondere bei der technischen Trocknung von Konstruktionsholz eine bedeutende Rolle. Eine Sammlung ausgewählter Ansätze zur Berechnung der Bindungsenthalpie h_B (und H_B) über den Vergleich von Sorptionsisothermen bei verschiedenen Messtemperaturen findet sich in (Fortuin, 2003). Des Weiteren finden sich in (Krischer & Kast, 1978) Werte für die Bindungsenthalpie h_B verschiedener Materialien wie beispielsweise Holz oder Kartoffeln.

In der folgenden Abbildung 50 ist beispielhaft die Bindungsenthalpie h_B vom Material „Fichte“ nach den Berechnungen von (Fortuin, 2003) in Abhängigkeit der Holzfeuchte in Massenprozent [M.-%] aufgetragen. Zur Orientierung findet sich auf der sekundären Ordinate die äquivalente relative Luftfeuchte φ [%], rückgerechnet nach der Sorptionsisotherme für Fichtenholz bei 20 °C (Weichert, 1963).

Abbildung 50 Bindungsenthalpie h_B von Holz nach (Fortuin, 2003)

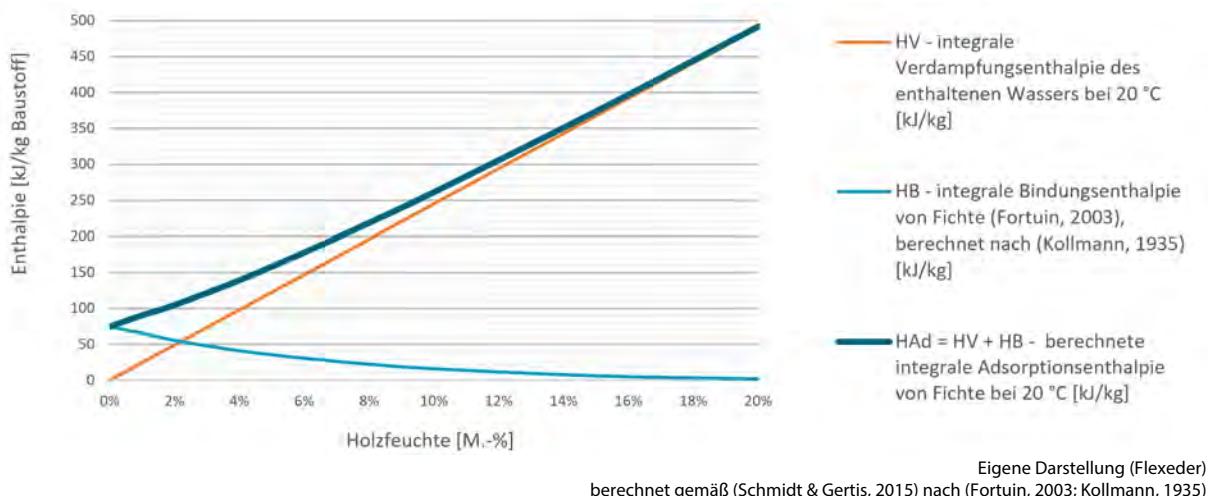


Während die differentielle Bindungsenthalpie h_B im Niedrigfeuchtbereich absolut betrachtet relativ hohe Werte aufweist, relativiert sich deren Bedeutung für die gesamte Adsorptionsenthalpie, sobald der Wert nicht auf die Masse des Wassers (Abbildung 50), sondern auf-integriert auf die Masse des Baustoffes selbst bezogen wird, vgl. Abbildung 51. Es gilt die Summenregel der Integration:

$$h_{Ad} = h_V + h_B$$

$$H_{Ad} = H_V + H_B$$

Abbildung 51 Adsorptionsenthalpie von Holz in Abhängigkeit des Wassergehalts



Dementsprechend kann die Bindungsenthalpie h_B bei Berechnungen im Hochfeuchtbereich gegebenenfalls vernachlässigt werden. Notabene: Die Berechnung der Bindungsenthalpie h_B ist nicht in die Algorithmen der WUFI Simulation integriert (Künzel, 1994). Wird vom vereinfachten Ansatz einer konstanten Adsorptionsenthalpie h_{Ad} ausgegangen und der Verdampfungsenthalpie h_V (beispielsweise mit dem konstanten Wert von 2450 kJ/kg) gleichgesetzt, so erhält man eine lineare Gleichung H_V , welche lediglich in Abhängigkeit der adsorbierten Wassermenge x [kg] steht.

Die Untersuchungen könnten somit zunächst auch rein auf die Berechnung der hygrischen Speicherfähigkeit reduziert werden. So lässt sich mit den Modellen des folgenden Abschnitts „Ergebnisse der instationären Labormessreihen“ abschätzen, wie viel Enthalpie beim Sorptionsprozess frei wird.

Der nächste Schritt, die Ermittlung der damit einhergehenden Temperaturänderung des Bauteils, erfordert dann wiederum allerdings auch die Kenntnis der thermisch relevanten Materialparameter.

Über die Wirkung hygroskopischer Baustoffe in Innenräumen

Nina Flexeder

Abschätzung der potenziellen Sorptionsenthalpie auf Basis der hygrischen Speicherkapazität

Soll vereinfacht abgeschätzt werden, wie viel Enthalpie beim Sorptionsprozess frei wird, so könnte unter Vernachlässigung der Bindungsenthalpie h_B und der Temperaturabhängigkeit von h_{Ad} (vgl. Abschnitt „Physik der Latentwärmeeffekte am Beispiel der Holzfeuchte“) die Adsorptionsenthalpie als konstanter Wert angenommen werden. Dies ermöglicht eine einfache, stationäre (!) Abschätzung der Temperaturänderung infolge von Wasserdampfsorption nach Schätzung der jeweils thermisch und hygrisch wirksamen Schichtdicken.

$$\Delta T = h_V \frac{C_{wirk, therm}}{C_{wirk, hygr}}$$

Die wirksame hygrische Speicherkapazität eines Bauteils (beziehungsweise eines ganzen Raumes) wird dabei analog zur wirksamen thermischen Speicherkapazität berechnet, vgl. Abschnitt „Bauphysikalische Grundlagen zu hygrothermischen Speicherkapazitäten“.

Bereits in den 90er Jahren wird der Einfluss von Sorptionsvorgängen auf die Raumluftfeuchte untersucht. In (Otto, 1995) wird für zahlreiche Innenraummaterienien den Wasserdampfdiffusionswiderstand μ , den Wasseraufnahmekoeffizienten w sowie die Sorptionisotherme experimentell bestimmt. Durch die Verrechnung der wirksamen hygrischen Speicherkapazität einzelner Sorptionselemente mit der wirksamen hygrischen Raumkapazität kann die Sorptionsfähigkeit von Räumen abgeleitet werden. Dabei beschränkt sich die analytische Lösung von (Otto, 1995) auf sinusförmige Randbedingungen, in der Regel mit einer Periode von 24 h. Daher liegen den Berechnungen die Kreisfrequenz ω [h^{-1}] als Reziprok einer Stunde zugrunde.

Die Schwankungen der Raumluftfeuchte stehen dabei in Abhängigkeit zu einer sogenannten sorptionstechnischen Kenngröße $F_{R,C}$ [-]. Diese Kenngröße bezieht sich auf den gesamten untersuchten Raum und beschreibt die Sorption in Abhängigkeit der wirksamen hygrischen Raumkapazität $C_{wirk, hygr, Raum}$ [kg] und der Differenz des Massenstroms der Feuchteproduktion $\dot{M}_{Prod.}$ [kg/h].

| | |
|--------------------------|---|
| $\varphi =$ | Relative Luftfeuchte im Raum [%] |
| $F_{R,C} =$ | Sorptionstechnische Kenngröße [-] |
| $C_{wirk, hygr, Raum} =$ | wirksame hygrische Raumkapazität [kg] |
| $\omega =$ | Kreisfrequenz [h^{-1}] |
| $\dot{M}_{Prod.} =$ | Massenstrom der Feuchteproduktion [kg/h] |
| $C_{wirk, hygr} =$ | Wirksame hygrische Speicherkapazität [kg/m ²] |
| $A_j =$ | wirksame Bauteiloberfläche [m ²] |

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\frac{1}{\Delta\varphi_{max}} + F_{R,C}}$$

$$F_{R,C} = \frac{C_{wirk,hygr,Raum} \omega}{\Delta\dot{M}_{Prod.}}$$

Die wirksame hygrische Raumkapazität $C_{wirk, \text{hygr}, \text{Raum}}$ [kg] wird dabei durch die Summe der einzelnen Oberflächen A_i [m^2] im Raum und jeweils deren (material- oder konstruktionsspezifische) wirksame hygrische Speicherkapazität $c_{wirk, \text{hygr}, i}$ [kg/m^2] abgebildet.

$$C_R = \sum_{i=1}^n c_{wirk, \text{hygr}, i} A_i$$

Durch die wirksame hygrische Speicherkapazität $c_{wirk, \text{hygr}, i}$ [kg/m^2] wird –analog zur wirksamen thermischen Speicherkapazität– beschrieben, wie viel kg Wasser ein ebener Körper auf einem Quadratmeter unter sinusförmigen Randbedingungen der absoluten Temperatur T [K] speichern kann. Hierzu werden konstante Stoffeigenschaften, das heißt Mittelwerte angenommen.

In (Otto, 1995) wird auch auf die Umstände eingegangen, welche im vorliegenden Forschungsbericht zunächst vernachlässigt werden: Für eine ganzheitliche, realitätsnahe Untersuchung der hygrischen Masse eines Raumes müssten alle darin befindlichen Oberflächen miteinberechnet werden, das heißt beispielsweise auch Möbel, Vorhänge und Polster. Außerdem spielt die möglicherweise versiegelnde Oberflächenbehandlung eine entscheidende Rolle (Lustig-Rössler, 1992).

Theoretische Modelle zum instationären Feuchtigkeitsaustausch in Innenräumen

Effective Capacitance Model (EC)

Generell kann der Feuchtigkeitsaustausch in einem Raum nur in vereinfachten Modellen numerisch angenähert werden. Dabei wird in allen vorgestellten Modellen eine gleiche Verteilung der Feuchtigkeit, des Druckes und der Temperatur in der gesamten Raumluft angenommen.

Beim EC Modell wird davon ausgegangen, dass der Feuchtigkeitsgehalt der Umgrenzungsflächen jederzeit mit der Raumluft im Gleichgewicht steht. Das bedeutet, dass in diesem Modell keine zeitverzögerte Anpassung bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte stattfindet. Folglich kann die Kapazität des Raumes und der Umgrenzungsflächen als Summe ihrer stationären effektiven Feuchtespeicherkapazität angenommen werden (Janssen & Roels, 2009; Osanyintola et al., 2006).

Effective Moisture Penetration Depth EMPD

Das EMPD Modell vereinfacht den Feuchtigkeitsaustausch zwischen Raumluft und den Oberflächen auf die dünne obere Pufferschicht des Materials. Die Dicke dieser Schicht hängt dabei von der effektiven Eindringtiefe und damit von der Luftfeuchte ab. Sie kann für zyklische Feuchtigkeitsänderungen durch eine Gleichung bestimmt werden. Das Modell ist vor allem für die Berechnung einzelner Innenwände gedacht, für die jeweils die entsprechenden Materialwerte (Feuchtigkeitsspeicherung und Dampfdurchlässigkeit) bekannt sein müssen. Die in der Praxis teils erhebliche Feuchtespeicherung durch komplexere Objekte wie Möbel und Teppiche wird vernachlässigt (Janssen & Roels, 2009; Woods & Winkler, 2018).

Moisture Buffering Value MBV

(Janssen & Roels, 2009) schlagen eine produktionsadaptive Charakterisierung des Feuchtigkeitspufferpotentials von Innenelementen vor. Dies stellt eine Alternative zu den bis dahin gebräuchlichen Modellen der inneren Feuchtigkeitsspeicherung durch die effektive Feuchtigkeitseindringtiefe (effective moisture penetration depth, EMPD Modell) und zu den Effektive-Speicherkapazitäts-Modellen (effective capacitance, EC Modell) dar (Li et al., 2012; Osanyintola et al., 2006). Um das Feuchtepuffer-Potential (moisture buffer potential) eines Raumes zu bestimmen, müssen zunächst die einzelnen Feuchtepufferwerte (MBV) der Raumelemente ermittelt werden. Diese beschreiben deren Fähigkeit Feuchtigkeit bei verschiedenen Raumluftfeuchten zu sorbieren.

Dazu dienen in der Praxis die Bestimmung der Feuchtespeicherkapazität durch Sorptionsisothermen und die Bestimmung der Wasserdampfpermeabilität durch den Diffusionswiderstand, welche beide mit teilweise mehrmonatigen Messreihen sehr zeitaufwendig sind. Außerdem lassen diese Kennwerte keinen direkten Vergleich zwischen Materialien bezüglich ihres Feuchtepufferpotentials zu. Beispielsweise muss ein

niedrigerer Wert der Sorptionsisotherme eines bestimmten Materials nicht unbedingt eine geringere Feuchtespeicherung im instationären Zustand bedeuten. Je nach Schichtdicke kann diese niedrige Feuchtespeicherung durch eine hohe Permeabilität ausgeglichen werden, sodass dieses Material kurzzeitig durchaus mehr Feuchtigkeit sorbiert als ein anderes mit weitaus höheren Werten der absoluten Feuchtesorption (vgl. dazu auch die Messungen in Abschnitt „Ergebnisse der Ermittlung von Sorptionsisothermen“ sowie „Ergebnisse der instationären Labormessreihen“). Die zeitliche Veränderung der maßgebenden Raumluftfeuchte sollte also unbedingt in den Feuchtepufferwert (Moisture Buffering Value, MBV) einfließen, um ein instationäres Verhalten korrekt bestimmen zu können.

Die Lösung dieses Problems könnte gemäß (Janssen & Roels, 2009) die Einführung einer neuen Messmethode sein. Dabei wird ein Probekörper einer zyklisch wechselnden Luftfeuchte φ ausgesetzt. Die Massenänderung Δm wird aber anders als bei der Sorptionsisotherme nicht erst bei Erreichen der Gewichtskonstanz, sondern bereits ab Start in kurzen Zeitabständen gemessen. So wird der Feuchtepufferwert (MBV) eines Materials beispielsweise nach acht Stunden in geänderter Luftfeuchte folgendermaßen definiert:

$$MBV_{8h} = \frac{(m_{max} - m_{min})}{A (\varphi_{max} - \varphi_{min})}$$

| | |
|--------------|--|
| $MBV_{8h} =$ | Moisture Buffering Value bei einem Zyklus von 8 Stunden [kg/m ²] |
| $m =$ | Masse des Materials [kg] |
| $A =$ | Oberfläche des Bauteils [m ²] |
| $\varphi =$ | Relative Luftfeuchte [%] |

Die gewählte Dicke des Probekörpers soll sich dabei an der typischen Schichtdicke orientieren. Ebenso sind Zeit und Amplitude des Feuchtsprungs auf die typischen realistischen Feuchtezyklen abzustimmen. Theoretisch könnte der Feuchtepufferwert (MBV) auch durch eine Fourier-Transformation berechnet werden (Li et al., 2012).

Effective Damped Relative Humidity EDRH

Der Index EDRH beschreibt die Fähigkeit des Raumes, Differenzen der Luftfeuchte zu puffern. Für Laborversuche auf Raumlevel wird ein kleines Testgebäude mit Holzpaneelen ausgekleidet (Li et al., 2012). Dabei wird deutlich, dass sowohl die materialspezifischen Eigenschaften als auch raumspezifische Faktoren wie Feuchtigkeitsproduktion und Luftwechsel einen großen Einfluss auf die insgesamt gepufferten Feuchtelasten haben. Bei verschiedenen Testreihen fallen folgende Aspekte auf:

1. Bei gleichbleibendem Luftwechsel gilt: Je größer die Feuchteproduktion, desto höher ist die resultierende relative Luftfeuchte.
2. Ein Anstieg der relativen Luftfeuchte führt auch zu einem Temperaturanstieg.
3. Ein Abfall der relativen Luftfeuchte führt zu einem Abfall der Temperatur.
4. Je mehr Feuchtigkeit produziert wird, desto mehr kann das Holz aufnehmen.
5. Je niedriger die relative Luftfeuchte zu Beginn ist, desto mehr kann das Holz insgesamt aufnehmen.
6. Durch eine zusätzliche Luftbewegung mittels Ventilator kann das Holz mehr Feuchtigkeit aufnehmen als ohne Luftbewegung.

Materialspezifische Untersuchungen zur Feuchtepufferwirkung von Baustoffen

Hygroskopizität von Holz und Holzbaustoffen

Bereits in (Seifert, 1970) werden die Kapillarradien verschiedener Holzarten (Buche, Fichte) untersucht und deren Sorptionsisothermen bestimmt. Dabei werden insbesondere die Unterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Holzwerkstoffen erforscht. Dazu werden mehrere Sorptionstheorien verglichen und eine Apparatur entwickelt, mit welcher die Sorptionsisothermen im Vakuum gemessen werden können. Die Genauigkeit, mit welcher in dieser Arbeit die einzelnen Stoffwerte der Holzproben ermittelt werden, liegt jedoch weit höher, als es die Stoffwertstreuung dieses inhomogenen Materials natürlicherweise zulassen würde.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei der Untersuchung natürlicher Baustoffe immer mit einem Fehler in den Kennwerten zu rechnen ist. Besonders Holz, welches sich durch seine Anisotropie, Inhomogenität, Rheologie und zudem durch Quellen und Schwinden auszeichnet, zeigt je nach Ort der Probenentnahme große Unterschiede. Dementsprechend sollten Probengröße, -anzahl und Messmethodik daran angepasst sein. Die Verwendung eines zwar sehr genauen Gerätes, welches aber auch nur sehr kleine Probengrößen zulässt, kann mitunter zu irreführenden Messergebnissen führen.

In (Hauser et al., 1991), einem Forschungsbericht mit ähnlichen Ansätzen wie in (Otto, 1995), wird über ein Rechenmodell die relative Feuchte in einem fiktiven Raum berechnet. Die wesentlichen Einflussgrößen sind dabei die zu- und abgeführte Wassermenge, Materialkenngröße c_F und die Bauteiloberflächen A. Eine neu entwickelte „Raumkenngröße“ definiert den dämpfenden Einfluss der sorbierenden Oberflächen auf die relative Luftfeuchte. In Labortests wird die dynamische Feuchtesorption der Materialproben anhand von Feuchtesprüngen beziehungsweise Feuchtezyklen durch kontinuierliches Wägen ermittelt. Etwaige Temperaturveränderungen, verursacht durch den Sorptionsprozess, werden hingegen nicht aufgezeichnet.

Es werden außerdem die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ sowie die Sorptionsisothermen über den volumenbezogenen Feuchtegehalt u [kg/m^3] in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte für folgende Hölzer und Holzwerkstoffe ermittelt: Buche, Fichte, Kiefer, Lärche, Spanplatte, Tischlerplatte und MDF. Für Fichte ergibt sich beispielsweise ein Verlauf für μ vom Wert 175 (trocken) ausgehend bis hin zu 10 (feucht).

Daraus resultierend werden die Veränderungen der relativen Luftfeuchte im Innenraum anhand von exemplarisch gewählten Büro- und Wohnräumen simuliert. Außerdem wird das thermische Verhalten der Bauteile auf Basis der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bauteile berechnet. Die Forschungsarbeit verfolgt mit der Prognose der Raumlufthechte- und Temperaturschwankungen damit zum einen das Ziel, Methoden der Schimmelvermeidung zu finden. Zum anderen wird über die Verminderung der Lüftungswärmeverluste, aber auch der Energieverbrauch abgeschätzt. Sie kommt zu dem Schluss, dass durch hölzerne Wand- und Deckenbekleidungen der Heizwärmeverbrauch um etwa 10 % reduziert werden kann. Es erfolgt keine Berechnung etwaiger Sorptionsenthalpien.

In (Künzel et al., 2006a) wird ein Experiment auf Raumlevel dokumentiert. Mit Hilfe zweier identischer unmöblierter Testräume wird in einem Langzeitversuch die Feuchtepufferwirkung von Holz im Innenraum bei für Wohnräume typischen Feuchtezyklen untersucht. Dabei zeigen alle verwendeten Innenraumbekleidungen (Zellulosedämmung, Vollholzbohlen, Holzweichfaserplatten, Nut- und Federbrettern, Akustikelemente) eine bessere Feuchtepufferung als herkömmlicher Innenputz auf Kalk-Gips-Basis.

Zur Untersuchung bewohnter Testräume werden in (Hameury & Lundström, 2004) vier bewohnte Apartments für einen Feldversuch mit großflächigen Holzoberflächen genutzt. Die Ergebnisse sind ambivalent, da sie zwar ein generelles Feuchtepufferpotential erkennen lassen, die Holzoberflächen aber nicht die täglichen Feuchteschwankungen ausgleichen können.

Hygroskopizität von Lehm

(Lustig-Rössler, 1992) konzentriert sich in der Untersuchung von Sorptionsvorgängen auf den Baustoff Lehm. Je nach Anteil an Ton, Schluff, Sand und Kies variiert das Sorptionsvermögen dieses natürlichen Baustoffes. Das instationäre Verhalten verschiedener Materialkombinationen wird hierbei bei einem längeren (24h) sowie einem kürzeren (8h) Feuchtewechselzyklus von 35 % auf 75 % relative Luftfeuchte getestet. Lößlehm (geringer Ton- und Sandanteil, hoher Schluffanteil) reagiert auf Feuchtewchsel am schnellsten. Allerdings ist die absolute Feuchteaufnahme, wie in sie in den Sorptionisothermen dargestellt wird, bei Lehmen mit hohem Tonanteil am größten.

Die aktive Schichtdicke wird als die maximale Dicke einer Lehmprobe definiert, mit der bei einem Feuchtesprung von 35 % auf 75 % innerhalb von 24 Stunden die Massenkonstanz erreicht wird. Ein Zentimeter dicke Proben des untersuchten Lehmmörtels (geringer Ton, hoher Sandanteil) erreichen nach 24 h den stationären Zustand. Bei Lehmproben mit höherem Tonanteil („fetter“ Lehm) stellt sich nach 24 h noch keine Massenkonstanz ein, das heißt, die Schichtdicke für diese Lehmproben wird dementsprechend als < 10 mm definiert.

Zudem wird experimentell ermittelt, um wie viel das Sorptionsvermögen verschiedener Lehmzusammensetzungen jeweils durch Oberflächenbehandlungen und Beschichtungen zeitlich verzögert wird. Resultierend werden Anstriche auf Basis von Kalk-Kasein, Kreide-Leim oder Mineralbasis empfohlen, welche die Sorptionsfähigkeit der darunterliegenden Lehmschicht am geringsten einschränken. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von (Ineichen, 2020; Künzel, 1997), dass Designputze, Farben und Grundierungen auf der Bauteiloberfläche den Feuchtepufferwert (*moisture buffering value, MBV*) senken und die Feuchteaufnahme nach einem Feuchtesprung verlangsamen.

In (Ziegert, 2004) und (Eckermann & Ziegert, 2006) wird ebenfalls das Sorptionsverhalten von Lehmabaustoffen, vor allem von Lehmputz, im Vergleich zu anderen Wandbaustoffen untersucht. Bereits ein 3 mm dünner Lehmputz auf einer Gipskartonplatte bewirkt laut den Sorptionstests eine Verbesserung des Sorptionsvermögens um 60 % gegenüber einer gespachtelten Gipskartonplatte. Es werden verschiedene Materialien und Schichtaufbauten in Feuchtesprüngen von 50 % auf 80 % relative Luftfeuchte mit 12-stündiger Periode getestet. Insgesamt sorbieren mit Lehmputz innenseitig verspachtelte Wandaufbauten stets eine wesentlich höhere Menge und schneller als konventionelle Konstruktionen wie beispielsweise Gipskartonplatten.

Allerdings besteht innerhalb der Produktpalette der untersuchten Lehmpuze eine ausgeprägte Streuung. So verringern Zuschläge wie Sand oder Fasern den sorptionsaktiven Anteil im Lehmabaustoff und damit das gewünschte Sorptionsvermögen.

Labormessungen zur Feuchtepufferung verschiedener Materialien

Nina Flexeder

Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte

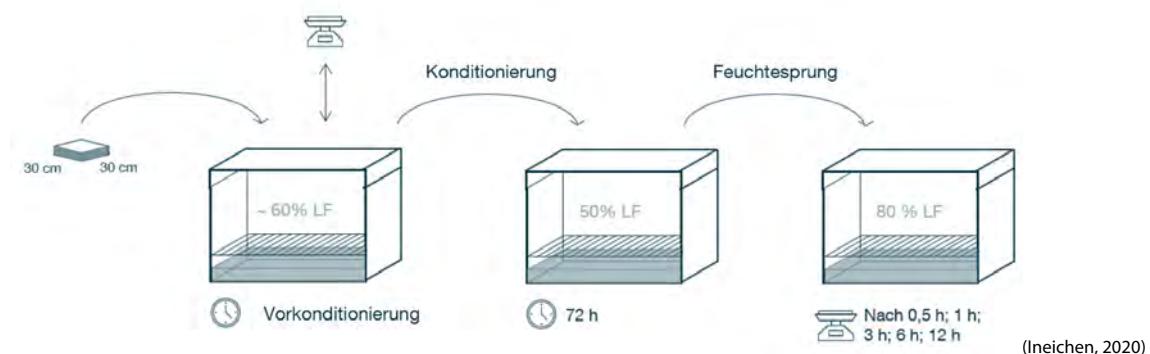
Zur Untersuchung des hygrischen sowie hygrothermischen Verhaltens einzelner Materialschichten unter Laborbedingungen bis hin zu ganzen Bauteilquerschnitten unter realistischen Klimabedingungen werden Messmethoden mit unterschiedlicher Komplexität identifiziert. Die angewandten Methoden stützen sich dabei zum einen auf normative Verfahren, welche entsprechend der Forschungsfrage adaptiert werden. Zum anderen werden neue Methoden in Anlehnung an publizierte Experimente vorangegangener Forschungsarbeiten verwendet (vgl. Abschnitt „Stand der Forschung: Experimente zur Sorptionsenthalpie bei Baustoffen“).

In Tabelle 7 (siehe folgende Seite 85) werden einige der im Forschungsvorhaben PhyTAB genutzten Methoden systematisiert. Sie unterscheiden sich durch die jeweils durch die zugrunde liegende Forschungsfrage. Dementsprechend variiert die durchschnittliche Mess- beziehungsweise Versuchsdauer.

Messmethode #A dient vor allem der Erforschung der neu entwickelten Sensorenhüllen für die hygrometrische Messungen in Kapitel IV (vgl. Abschnitt „Primäre Oberflächentemperaturmessung“). Diese Vergleichsmessungen im Labormaßstab gewähren weitreichende Erkenntnisse, auch in Hinblick auf die Sorptionsgeschwindigkeit in das Bauteilinnere. Die Untersuchungen sind bis dato noch nicht abgeschlossen. Grundsätzlich unterliegt das Innenraumklima sowohl tageszeit- als auch jahreszeitabhängigen Schwankungen. Zur Beschreibung der jahreszeitlichen Schwankungen in Abhängigkeit des Außenklimas wird in der DIN 4108-3:2018-10 eine Gleichung genannt. Zur Berechnung der kurzfristigen Änderungen der relativen Luftfeuchte im Tagesverlauf wird diese allerdings nicht empfohlen (Ineichen, 2020; Künzel, 1997). Es werden stattdessen spontane isotherme Feuchtesprünge, beispielsweise von 50 % relativer Luftfeuchte zu 80 % relativer Luftfeuchte für die folgenden Untersuchungen verwendet.

Durch **Messmethode #B** kann das instationäre Sorptionsverhalten verschiedener Bauteiloberflächen standardisiert bei einem einmaligen isothermen Feuchtesprung von 50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte verglichen werden. Es wird dazu auf eine Methode in Anlehnung an die Lehmputzmortelprüfung nach DIN 18947:2018-12, Anhang A.2 WasserdampfadSORPTION, zurückgegriffen und aber der Zeitabstand der Wägungen verfeinert.

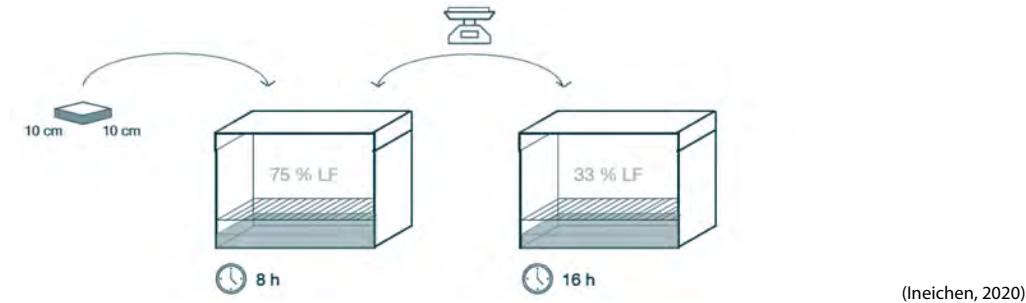
Abbildung 52 Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit, Messmethode #B (Ineichen, 2020)



Ähnlich verhält es sich mit **Messmethode #C**: Um die Auswirkungen verschiedener, alltäglicher Feuchtelasten in einem Wohngebäude systematisch zu untersuchen, wird auf das sogenannte Nordtestprotokoll (Rode, Peuhkuri, Hansen et al., 2005) zurückgegriffen. Dieses simuliert einen Tagesverlauf mit einem zyklischen Wechsel von hoher und niedriger Luftfeuchte bei sonst gleichbleibenden Bedingungen. Innerhalb von 24 Stunden folgen auf acht Stunden bei 75 % relativer Luftfeuchte, 16 Stunden bei 33 % relativer Luftfeuchte. Diese Feuchtelasten in Form von Rechteck-Wellen werden solange wiederholt, bis sich ein konstanter Wert für den sogenannten *Moisture Buffer Value* (MBV, errechnet aus der Massendifferenz zwischen

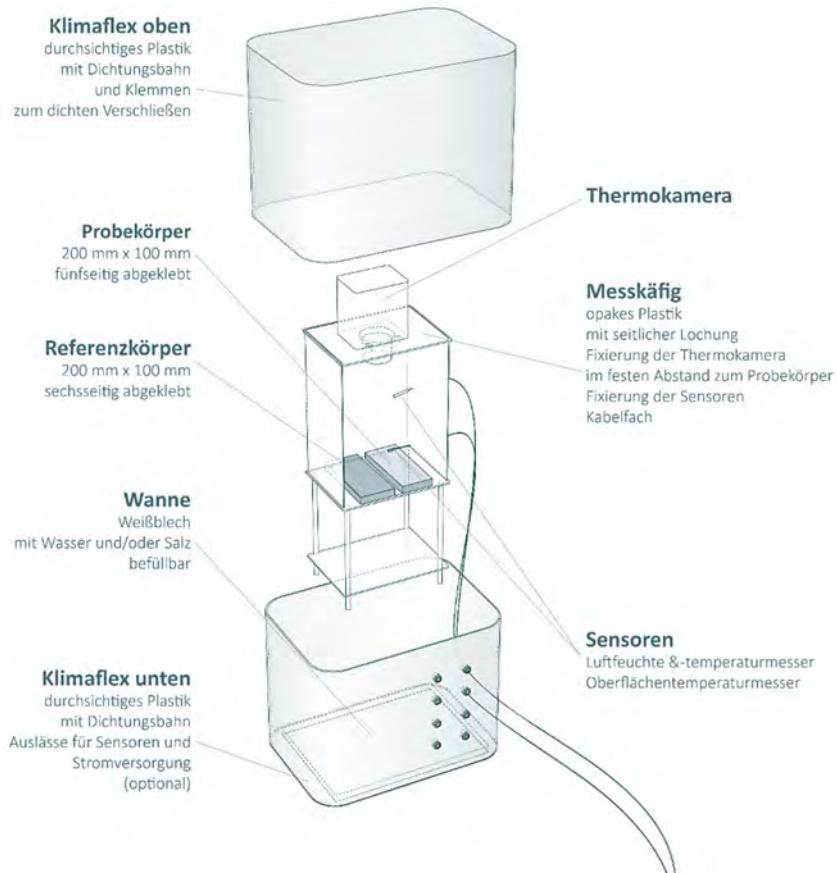
hohem und niedrigem Feuchtegehalt) einstellt. (Ineichen, 2020; Rode, Peuhkuri, Hansen et al., 2005; Rode, Peuhkuri, Mortensen et al., 2005)

Abbildung 53 Bestimmung der Feuchtepufferwirkung, Messmethode #C (Ineichen, 2020)



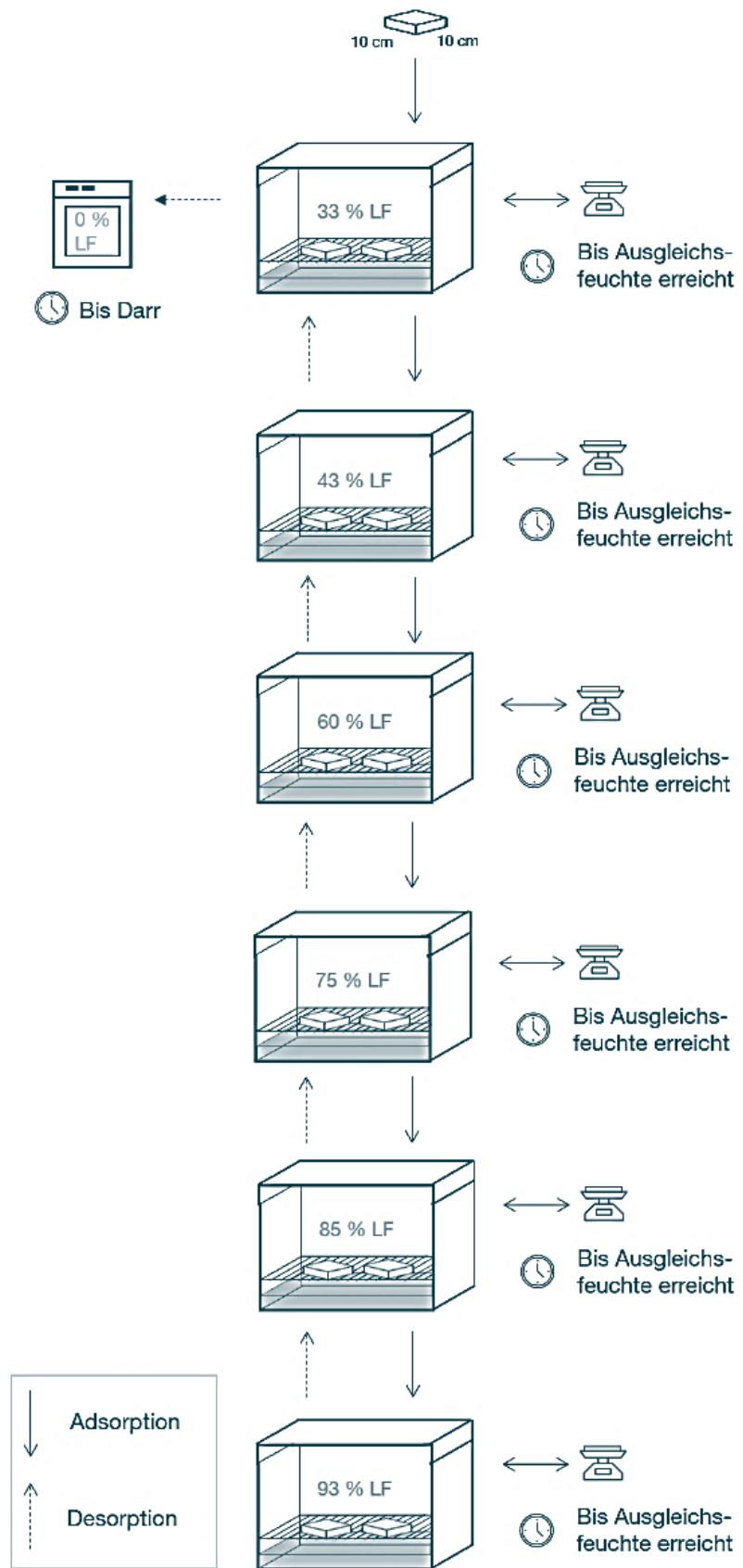
In **Messmethode #D** werden Störfaktoren durch die parallele Messung eines „Zwillings“ herausgerechnet. Dieses Vorgehen ermöglicht die Isolierung eines einzelnen Effektes (der Änderung der Oberflächentemperatur infolge von Wasserdampfsorption) aus Temperaturschwankungen, die auch im Laborbetrieb oft unvermeidlich sind. Diese Messmethode wird mit dem in gezeigten Aufbau für die Messungen in Abschnitt „Ergebnisse und Diskussion der hygrothermischen Laborversuche“, S. 102 f., genutzt. Außerdem findet das Prinzip bei den Langzeitmessungen in Kubus Ost und im Kubus Kösching Anwendung, vgl. #G, #H, Kapitel V.

Abbildung 54 Versuchsaufbau zur Messung von Temperaturunterschieden durch Sorptionsenthalpie im Doppelversuch, Messmethode #D



eigene Darstellung (Flexeder)

Abbildung 55 Messablauf bei der Bestimmung der Sorptionsisotherme, Messmethode #E (Ineichen, 2020)



(Ineichen, 2020)

Messmethode #E stellt ein normatives Verfahren zur Messung von Sorptionsisothermen und somit zur Ermittlung von Baustoffeigenschaften dar. Das Verfahren wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts an die verfügbare Laborausstattung angepasst. Generell gilt: Sorptionsisothermen stellen das tatsächliche Sorptionsverhalten eines Materials generell nur bedingt dar, da sie keinen zeitlichen Bezug aufweisen. Sie sind allerdings ein wichtiger Bestandteil der Eingabeparameter für hygrothermische Simulationen.

Messmethode #F stellt ein weiteres normatives Verfahren zur Ermittlung wichtiger Baustoffeigenschaften dar. Im Rahmen des Forschungsprojekts PhyTAB konnten diese Messungen aus Budgetgründen leider nicht mehr durchgeführt werden. Eine Vertiefung im Rahmen eines Fortsetzungsprojektes wird an dieser Stelle empfohlen.

Messmethode #G dient als Adaption der Messmethode #D zur Verwendung für die instationären Langzeitversuche in den Testkuben auf der Solarstation (Kapitel V). Hierbei werden zwei Fassadentestelemente nebeneinander in einen Kubus eingebaut und gleichzeitig über einen längeren Zeitraum durch Monitoring überwacht. Um den Einfluss der hygroskopischen Innenseite gezielt untersuchen zu können, wird dabei eines der beiden Fassadentestelemente komplett mit dampfbremsender Folie (sd-Wert 5 m) verkleidet.

Messmethode #H ist eine Weiterentwicklung von Messmethode #D, welche hygrothermische Zwillingsversuche durch kleinteiliges Nachrüsten in einem bestehenden Testkubus ermöglichen soll, vgl. Kapitel V. Hierbei werden zwei baugleiche Temperatursensoren auf das Bauteil montiert, wobei unter einem der beiden zuvor eine dampfbremende Folie aufgebracht wurde.

Tabelle 7 Übersicht der verwendeten Messmethoden

| # | Messmethodik | Probekörper | Untersuchungsgegenstand | Kapitel |
|---|--|---|---|---------|
| A | Feuchtesprünge mit und ohne Temperaturänderung (isotherm) | Labor: Würfel 100 mm x 100 mm x 100 mm, 5-seitig abgeklebt + verschiedene Sensoren zum Feuchtemonitoring in verschiedenen Tiefen | Vergleich: Funktionsweise der hygrometrischen Materialfeuchtemessung in verschiedenen Materialien und -tiefen versus elektrische Widerstandsmessung versus Ermittlung mittels periodischer Wägung | IV |
| B | Messungen im Klimaschrank in Anlehnung an DIN 18947:2018-12 (ggf. anschließende Darrprobe) | Klimaschrank: Min. 3 identische Stücke mit je 0,1 m ² Oberfläche | Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit in definierten isothermen Feuchtesprüngen, beispielsweise im Bereich 50 – 80 % RH Periodische Wägungen | III |
| C | Nord-Test Protokoll zur Ermittlung des MBV | Klimaschrank: Min. 4 identische Stücke, 5-seitig abgeklebt, mit je min. 100 mm x 100 mm Oberfläche | Nachbildung alltäglicher Feuchtelasten durch periodische Feuchtesprünge, beispielsweise 8 h 75 %, 16 h 33 %, bis zur Massendifferenz | III |

| # | Messmethodik | Probekörper | Untersuchungsgegenstand | Kapitel |
|---|--|---|---|----------|
| D | Isothermer Feuchtesprungversuch mit nicht-sorbierendem Zwilling, parallele Temperaturmessung | Klimaschrank o.ä., z.B. „Klimaflex“, jeweils 2 identische Probekörper mit 200 mm x 100 mm, einer davon 5-seitig, einer 6-seitig abgeklebt | Experimentelle Untersuchung der sprunghaften Änderung der Oberflächentemperatur durch Wasserdampfsorption | III |
| E | Sorptionsisothermen-Bestimmung in Anlehnung an DIN EN ISO 12571:2013-12 | Methode angelehnt an das Exsikkatorverfahren, Probekörper min. 100 g, min. 3 Stück jeweils | Bestimmung / Verifikation der Sorptionsisothermen mittels wochenlanger Lagerung in verschiedenen relativen Luftfeuchten + regelmäßiger Wägung | III V |
| F | Bestimmung des Dampfdiffusionswiderstands DIN EN ISO 12572:2017-05 | [wurde nicht durchgeführt] | Bestimmung der Dampfdiffusionsdurchlässigkeit mittels dry-cup/wet-cup Methode und periodischer Wägung | - |
| G | Weiterentwicklung von Messmethode #D zum parallelen Vergleich von Fassadentestelementen | Testkubus Ost jeweils 2 Fassadentestelemente, davon eines mit dampfbremsender Folie verkleidet | Experimentelle Untersuchung der graduellen Änderung der Oberflächentemperatur durch Wasserdampfsorption infolge von klimatischen Schwankungen | V |
| H | Weiterentwicklung von Messmethode #D im Feldversuch | Testkuben Ost + Kösching jeweils 2 identische Temperatursensoren, einer auf dem Material direkt, einer auf dampfbremsender Folie montiert | Experimentelle Untersuchung der graduellen Änderung der Oberflächentemperatur durch Wasserdampfsorption infolge von klimatischen Schwankungen | V |

eigene Darstellung (Flexeder)

Untersuchte Baustoffauswahl für den Innenausbau

Die Genauigkeit der mithilfe eines Simulationsprogrammes ermittelten Ergebnisse ist durch jene der initial eingegebenen Parameter grundsätzlich limitiert. Es liegt somit stets in der Pflicht des Nutzers, die richtigen Werte zu bestimmen und einbaugerecht zu verwenden. Dabei spielt es auch eine Rolle, woher die einzelnen Daten stammen und unter welchen Bedingungen sie ermittelt wurden.

Im Forschungsprojekt *PhyTAB* wurden verschiedene Baustoffe untersucht, welche allesamt zumindest als Einzelkomponenten auf dem Markt frei verfügbar sind. Dies bedeutet, dass für jedes Bauprodukt dementsprechend ein Produktdatenblatt mit den vorgeschriebenen Baustoffwerten existiert. In der Regel werden vom Hersteller folgende Werte angegeben:

- Trocknungsschwindmaß (typischerweise bei Putzen)
- Festigkeitsklasse
- Biegezugfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Haftfestigkeit (typischerweise bei Putzen)
- Abrieb (typischerweise bei Putzen)
- Rohdichte(klasse)
- Wärmeleitfähigkeit
- Diffusionswiderstand
- Wasserdampfadsorptionsklasse (speziell bei Lehmputzen)
- Baustoffklasse (bzgl. Brandverhalten)

Bei instationären Simulationen gilt es stets zu beachten, dass im Produktdatenblatt gewöhnlich absolute Werte angegeben werden. In der Realität variieren allerdings alle Baustoffeigenschaften mit den Temperatur- und Feuchteveränderungen (vgl. z.B. Standfestigkeitsnachweis im Brandfall, Wärmeleitfähigkeit von nasser Dämmung, feuchteadaptiver Dampfdiffusionswiderstand, ...). In der jeweiligen Norm ist in der Regel genau angegeben, unter welchen Bedingungen (beispielsweise bei 20 °C) ein Wert zu bestimmen ist. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes getesteten Baustoffe lassen sich in vier Gruppen einteilen. Die Auswahl wird dabei bewusst so getroffen, dass die Wahl verschiedener Konstruktionen, verschiedener Materialien und verschiedener Einzelprodukte untersucht werden kann. Anhand einer Innenwand wird die Fülle an möglichen Materialkombination und damit die Zahl möglicher Testkörper deutlich. Es werden deshalb im Rahmen dieser Arbeit zunächst nur einzelne Kombinationen stichprobenartig im doppelten Laborversuch getestet.

Lehmputze

Um die Differenzen bei der Wahl eines Lehmmörtelputzes aufzuzeigen, werden fünf verschiedene Produkte (#1, #2, #11, #12, #14) auf ihre Hygrскопизität hin untersucht.

Die Putze unterscheiden sich dabei alle in empfohlener Verwendung, Auftragsdicke, Haptik und Farbe sowie in einzelnen Baustoffwerten.

1 - LEHMOBERPUTZ (FEIN): Dies ist ein Lehmputzmörtel für Dünnlagenputze, welcher 2 bis 3 mm dick auf Lehmunterputz (#12), Lehmputzplatten (# 5, 6, 7, 8) und anderen ausreichend ebenen Flächen aus geeigneten Baustoffen (# 3, 4) aufgetragen werden kann.

2 - LEHMOBERPUTZ (GROB): Es handelt sich um einen Lehmputzmörtel mit Strohzusatz für einlagige Oberputze, welcher 5-10 mm dick auf Lehmunterputz (#12), ausreichend ebenem Mauerwerk (#16) und anderen Massivbaustoffen verwendet werden kann.

11 - LEHMOBERPUTZ (MINERALISCH): Dieser Lehmmautmörtel eignet sich als ein- oder mehrlagiger Grund- und Deckputz. Er hat keine organischen Bestandteile und kann 5-20 mm auf Mauerwerk (#16), Massivbaustoffen, Schilfrohr oder Ähnlichem aufgetragen werden.

12 – LEHMUNTERPUTZ: Dieser Lehmmautmörtel ist ein Unterputz mit Strohzusatz, welcher sich zur Schlitzverfüllung, für dicke Lagen (z.B. auf unebenem Mauerwerk, für Wandflächenheizungen oder die Denkmalsanierung, auf Schilfrohr und ähnlichem, mit einer Dicke von 8-35 mm verwendet wird.

14 - LEHMOBERPUTZ (FEIN): Dieser Lehmmautmörtel ähnelt Putz #1. Er kann 2-5 mm dick auf Lehmbauplatten (# 5, 6, 7) oder Lehmunterputz (#12), verputzfähigen Holzweichfaserplatten (#13) oder Alputzen verwendet werden, nach Behandlung mit einer geeigneten körnigen Grundierung auch auf Gipsplatten (# 3, 4) und Beton (#16).

Plattenwerkstoffe

Bei den untersuchten Plattenwerkstoffen handelt es sich um zwei gipsbasierte (# 3, 4) und vier lehm-basierte (# 5, 6, 7, 8) Trockenbauplatten.

3 – GIPSKARTONPLATTE: Diese Trockenbauplatte mit außenseitig Karton und innen Gipskern (Dicke = 12,5 mm) gilt als Standardtrockenbauplatte und wird in Deutschland so sehr häufig verbaut. Sie eignet sich zur Wand- und Deckenbekleidung auf Unterkonstruktionen, Deckenabhängung und zur Beplankung von nichttragenden Innenwänden. Die klassische Gipskartonplatte wird auch als Trockenputz z.B. auf Beton, Altanstrichen oder Porenbeton (# 16) verwendet.

4 – GIPSFASERPLATTE: Dies ist eine homogene gipsgebundene Trockenbauplatte mit Papierfasern, zur Wand- und Deckenbekleidung auf Unterkonstruktionen, Deckenabhängung und zur Beplankung von nichttragenden Innenwänden.

5 – LEHMBAUPLATTE (HOLZFASERN): Dies ist eine relativ schwere Lehmbauplatte mit rückseitiger Jutebewehrung (Dicke = 22mm) zur Bekleidung und Beplankung, z.B. für Vorsatzschalen, Installationsebenen im Holzbau, Holz- und Metallständerwänden abgehängte Decken, Dachschrägen und im Dachgeschossausbau (zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes).

6 – LEHMBAUPLATTE (SCHILF, DÜNN): Diese Trockenbauplatte (Dicke = 20 mm) aus Lehm mit Schilfrohrbewehrung eignet sich zum Beplanken von Holz- und Metallständerkonstruktionen von Innenwänden, Vorsatzschalen, Decken- und Dachflächen und kann gleichzeitig auch als Putzschicht verwendet werden.

7 – LEHMBAUPLATTE (SCHILF, DICK): Hierbei handelt es sich um eine dickere Variante der Platte #6. Diese Trockenbauplatte (Dicke = 25 mm) aus Lehm mit Schilfrohrbewehrung eignet sich eben-falls zum Beplanken von Holz- und Metallständerkonstruktionen von Innenwänden, Vorsatzschalen, Decken- und Dachflächen und kann gleichzeitig auch als Putzschicht fungieren.

8 – LEHMBAUPLATTE (HANF): Diese Trockenbauplatte (Dicke = 22 mm) aus Lehm und Hanfschäben zeichnet sich durch ihre sauberen Schnittkanten und damit einfache Verarbeitbarkeit aus. Sie dient zum Beplanken von Holz- und Metallständerkonstruktionen von Innenwänden, Vorsatzschalen, Decken- und Dachflächen und kann als Untergrund für dicke Lehmmautze verwendet werden.

Massivbaustoffe

Bei den untersuchten Baustoffen, welche sich zur Massivbauweise eignen, handelt es sich um verschiedene Brettschichtholzproben und eine anorganische Alternative aus Porenbeton.

9 – BRETSCHICHTHOLZ TANGENTIAL: Hierbei handelt es sich um eine Probe aus einem GL 24 (glued laminated timber) Balkens aus Fichtenholz. Es wird die Fladerseite, also der eine Oberfläche parallel zur Faser

untersucht. Der eindimensionale Feuchte- und Wärmestrom erfolgt damit senkrecht zur Faserrichtung des Holzes und ist damit mit Brettsperrholz vergleichbar.

10 – BRETTSCHEICHTHOLZ QUER: Hier wird die Stirnseite eines GL 24 (glued laminated timber) Balkens aus Fichtenholz betrachtet. Der eindimensionale Feuchte- und Wärmestrom erfolgt in Faserrichtung des Holzes.

15 – BRETTSPERRHOLZ TANGENTIAL: Die Fladerseite eines durch Luftkanäle klimatisierten Wandelements aus Fichtenholz wird untersucht. Die Klimatisierung selbst wird vernachlässigt.

16 – PORENBETONSTEIN: Hierbei handelt es sich um einen Planblock für homogenes Mauerwerk, welcher gleichzeitig als tragendes, aussteifen-des und wärmedämmendes Element dient.

17 – STAMPFLEHM: Mit diesem natürlichen Material werden in der Regel vor Ort massive Wände gebaut. Für die Labormessungen im Projekt PhyTAB wurden vom Hersteller sechseckige Prismen mit einer Kantenlänge von 100 mm erstellt.

Dämmung

Gewöhnlich wird die Dämmschicht einer Außenwand durch eine dampfbremsende Schicht (z.B. eine OSB-Platte oder PE-Folie) vom Innenraum getrennt, um Tauwasserausfall in der Dämmebene zu vermeiden. Da sich Holzfaserdämmplatten unter Umständen aber auch als Putzgrund eignen, wird die folgende in die Untersuchung miteinbezogen.

13 – HOLZWICHFASERPLATTE: Es handelt sich um eine druckfeste Dämmplatte aus unbehandeltem Tannen- und Fichtenholz. Sie ist zur Wärmedämmung für Boden- und Wandaufbauten geeignet und kann unter Estrichen und Bodenbelägen, als Aufdach- und Zwischensparrendämmung und zur Innendämmung verwendet werden.

Die verwendeten Baustoffwerte werden zum Teil den Produktdatenblättern und –falls nicht vorhanden– aus Datenbanken übernommen. Besonders die Werte für den Diffusionswiderstand sind kritisch zu sehen, da dieser gewöhnlich sehr stark feuchteabhängig ist. Der Wert der dry-cup-Messung ist in der Regel um ein Vielfaches größer, als der wet-cup-Messung. Im Vergleich zeigen sich typische Charakteristika der einzelnen Baustoffgruppen.

Ergebnisse der Ermittlung von Sorptionsisothermen

Die Ausgleichsfeuchte u_{80} bei 80 % relativer Luftfeuchte sowie der Wert der freien Wassersättigung w_f , die mindestens nötig sind, um in WUFI eine materialspezifische Feuchtespeicherfunktion zu approximieren, werden von Baustoffherstellern in der Regel nicht gemessen.

Die Angabe der Wasserdampfadsorptionsklasse (WS I, II oder III), wie es bei den Lehmmörtelputzen gemäß DIN 18947:2018-12, Anhang 2, praktiziert wird, gibt einen Aufschluss darüber, wie schnell und wie ausgeprägt das Material auf einen isothermen (23 °C) Luftfeuchtesprung von 50 auf 80 % relative Luftfeuchte reagiert. Dabei wird durch regelmäßige Wägungen nach einer halben, einer ganzen, drei, sechs und zwölf Stunden die zeitbezogene Kurve der Wasseraufnahme bestimmt. Der Lehmputzmörtel wird dann entsprechend dieser Messwerte einer der drei Klassen zugeordnet. Die absolut sorbierte Wassermenge bis zur Gewichtskonstanz wird dabei allerdings nicht untersucht. Der in diesem Abschnitt, Seite 91 f., beispielhaft näher diskutierte grobe Lehmoberputz #2 wird so beispielsweise der Klasse WS III zugewiesen. Für die restlichen Baustoffe stehen keine spezifischen Daten zum Sorptionsverhalten zur Verfügung. Teilweise könnten Literaturwerte herangezogen werden, jedoch differieren diese teils weit von den eigenen Messwerten und sollten daher lediglich zur Orientierung dienen.

Die Varianz der Feuchtfunktion kann für den Untersuchungszweck nicht vernachlässigt werden. Deshalb werden die Sorptionsisothermen der Baustoffe (# 1–12 sowie # 14–16) in eigenen Messreihen selbst ermittelt.

Messablauf

Die verwendete Methode entspricht der in Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“ beschriebenen Messmethode #E, vgl. S. 82 f.. Die Sorptionsisothermen der Baustoffproben werden hierbei in Anlehnung an die DIN EN ISO 12571:2013-12 (Exsikkatorverfahren) mit anschließender Messung des Trockengewichts nach DIN EN ISO 12570:2018-07 bestimmt. Aus Letzterem lässt sich nicht nur der erste Punkt der Adsorptionsisotherme, sondern auch die Trockenrohdichte ableiten. DIN EN ISO 12571:2013-12 beschreibt zur Bestimmung der hygrokopischen Sorptionseigenschaften von porösen Baustoffen zwei verschiedene Verfahren. Ähnlich den dort beschriebenen Exsikkatoren werden dichtschließende Plastikbehälter mit innenliegenden Gitterrosten und Luftfeuchtesensoren verwendet. Der Boden des Behälters wird jeweils von einer 30 bis 40 mm dicken Schicht aus Salz und /oder Flüssigkeit bedeckt. Mit Hilfe dieser Salze werden konstante relative Luftfeuchten erzeugt. Tabelle 8 zeigt die im Rahmen dieses Forschungsprojekts verwendeten Medien zur Langzeitkonditionierung im Labor. Plattenwerkstoffe und Massivbaustoffe werden mehrere Tage vor Start der Messreihen zu Quadern mit den Maßen ca. 100 mm x 100 mm x spezifische Plattenstärke zugeschnitten. Putze werden in den üblichen Dicken auf zuvor leer abgewogene Weißblechzuschnitte (100 mm x 100 mm) aufgetragen und eine Woche lang luftgetrocknet.

Tabelle 8 Medien zur Erstellung verschiedener relativer Luftfeuchten

| Relative Luftfeuchte | Summenformel | Medium |
|----------------------|--|---|
| 8 % ± 3% | K ₂ CO ₃ | Kaliumcarbonat, trocken |
| 33 ± 5 % | MgCl ₂ · 6 H ₂ O | Magnesiumchlorid-Hexahydrat |
| 35 % ± 5 % | - | Klimatisierter Laborraum (1) |
| 43 % ± 3 % | K ₂ CO ₃ | Kaliumcarbonat, gesättigte Lösung |
| 54 % ± 3 % | Mg(NO ₃) ₂ · 6 H ₂ O | Magnesiumnitrat-Hexahydrat, gesättigte Lösung |
| 75 ± 5 % | NaCl | Natriumchlorid, gesättigte Lösung |
| 70 % ± 5 % | - | Klimatisierter Laborraum (2) |
| 80 ± 5 % | KBr | Kaliumbromid, gesättigte Lösung |
| 85 ± 5 % | KCl | Kaliumchlorid, gesättigte Lösung |
| 94 % ± 3 % | KNO ₃ | Kaliumnitrat, gesättigte Lösung |
| 100 % | H ₂ O | Destilliertes Wasser* |

*#6,7,8: Substratgruppe 0. Messung vorzeitig wegen Sporenbildung abgebrochen
eigene Darstellung (Flexeder)

Die Messreihen starten mit einer Lagerung bis zur Gewichtskonstanz in einem klimatisierten Laborraum bei ca. 70% rel. Luftfeuchte und 20°C. Daraufhin werden für jeden Baustoff individuell zunächst die Desorptions- und anschließend die Adsorptionsisotherme bestimmt. Dazu werden jeweils vier identische Baustoffproben (a-d) solange auf ein bestimmtes Feuchtelevel klimatisiert, bis sich Gewichtskonstanz einstellt. Gewichtskonstanz ist dabei als eine Änderung des Gewichts < 0,1 % innerhalb drei verschiedener Messungen mit mindestens 24 h Abstand voneinander definiert.

Es wird die Desorptionsisotherme zu Teilen und die Adsorptionsisotherme mit mindestens fünf Messpunkten gemessen. Dabei zeigt sich eine typische Hysterese, bei der die Kurve der Desorption leicht versetzt über jener der Adsorption verläuft.

Bedingt durch die Fehlergrenze der Waage von maximal 0,01 % der Masse des Probekörpers, ist die Erstellung der Messreihen durch das Mindestgewicht von 100 Gramm pro Probekörper relativ zeitintensiv und dauert je nach Beschaffenheit der einzelnen Baustoffe etwa drei Monate. Die Messungen erfolgen annähernd bei isothermen Bedingungen ($20^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ K}$), wobei, wie in (Künzel, 1994) und (Krus, 1995) gezeigt wird, Temperaturschwankungen in diesem Größenbereich auf Sorptionsisothermen nur einen sehr geringen (vernachlässigbaren) Einfluss haben. Die für das Exsikkatorverfahren nach DIN EN ISO 12571:2013-12 vorgeschriebene Feuchteabweichung von maximal 2 % kann nicht bei jedem Feuchtelevel eingehalten werden. Dementsprechend zeigen sich am Beispiel des groben Lehmoberputzes (#2) bei einer Mittelung der Einzelergebnisse mögliche Abweichungen in x- und y- Richtung (siehe Fehlerindikatoren).

Die einzelnen Sorptionsisothermen der untersuchten Baustoffe können im Anhang eingesehen werden. Im Folgenden werden lediglich Unterschiede ausgewählter Sorptionsisothermen verglichen und diskutiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung der Desorptionsisothermen verzichtet.

Abbildung 56 gemessene Werte der Sorptionsisotherme für Baustoff #2

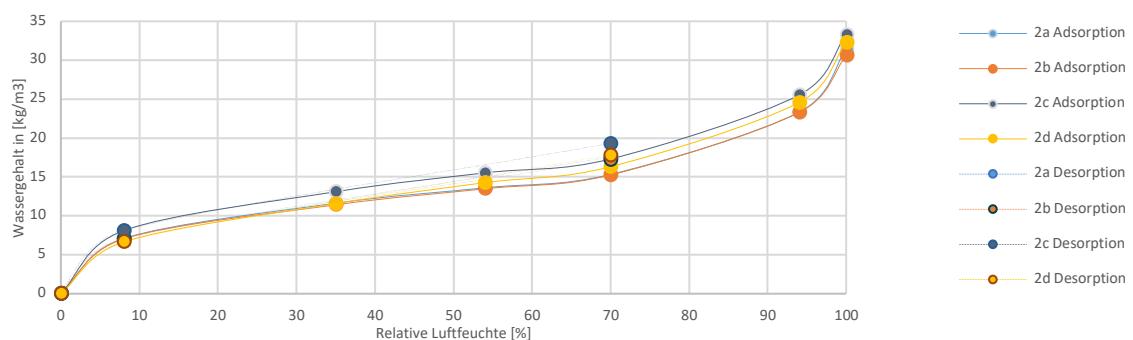


Abbildung 57 resultierende Sorptionsisotherme, inklusive Hysterese für Baustoff #2

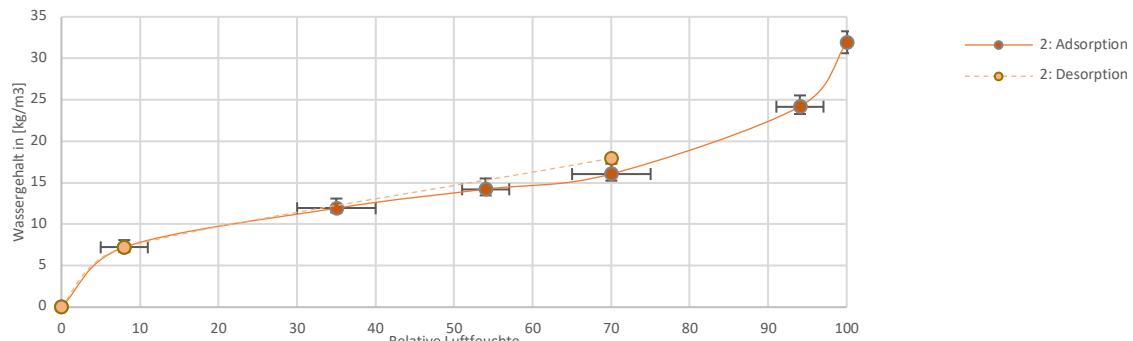
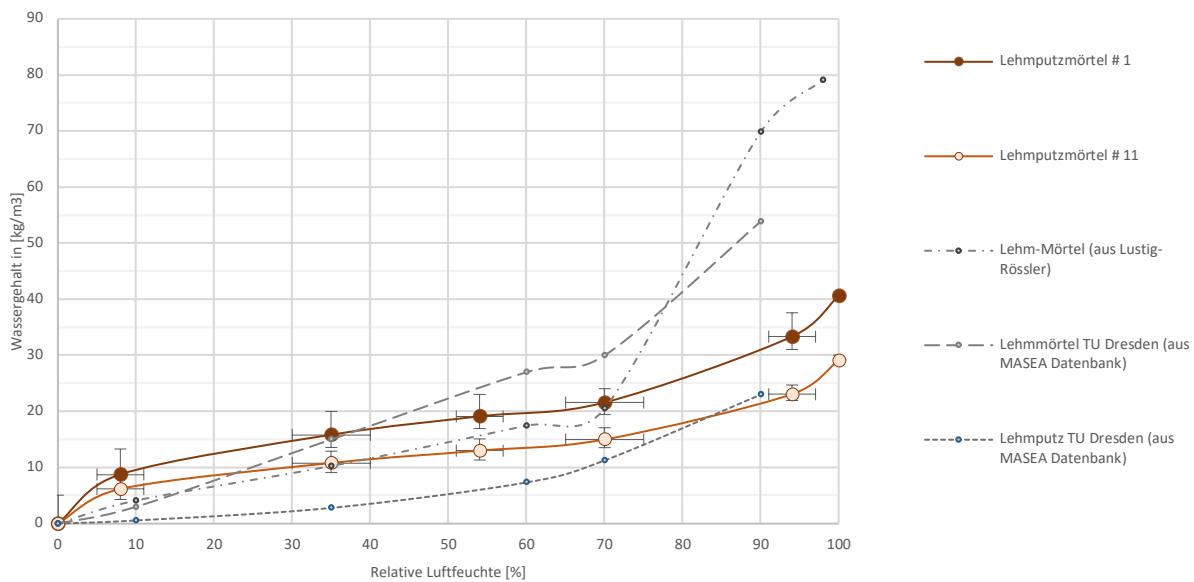
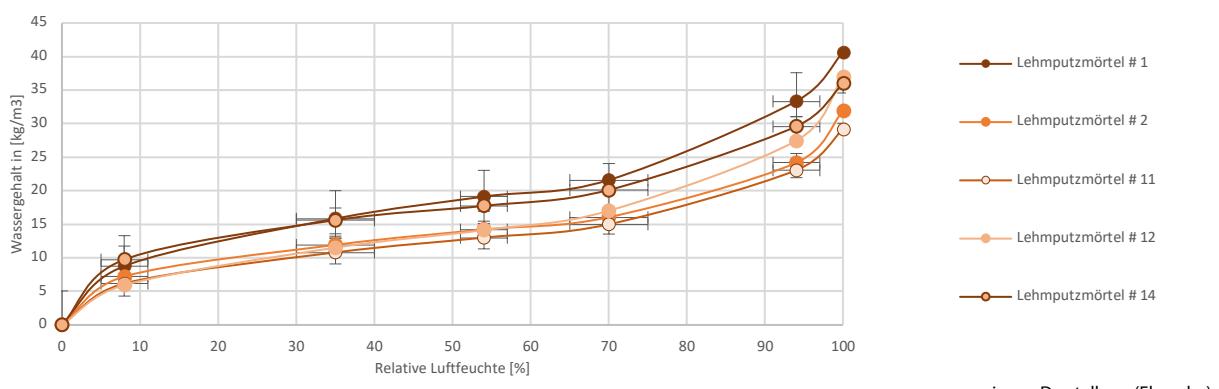


Abbildung 58 Sorptionsisothermen für Lehmmörtelputze: eigene Messwerte und Literaturwerte

Abbildung 56 bis Abbildung 58: eigene Darstellungen (Flexeder)

Vergleich der Sorptionsisothermen

Im Rahmen dieser Arbeit werden fünf verschiedene Lehmputze untersucht (# 1, 2, 11, 12, 14), vgl. Kapitel 6.1. Ein Vergleich der individuell gemessenen Sorptionsisothermen zeigt die Abweichung aus der Literatur entnommener Werte (Lustig-Rössler, 1992) und (MASEA Datenbank) für Lehmmörtelputze. Die Literaturwerte für „Lehmmörtel“ und „Lehmputz“ liegen dabei im Niedrigfeuchtebereich wesentlich unter denjenigen dieser Arbeit. Im Hochfeuchtebereich weisen die Sorptionsisothermen der zwei „Lehmmörtel“ einen um bis zu 200 % erhöhten Wassergehalt auf. Die Sorptionsisotherme für den „Lehmputz“ verläuft dagegen flacher und erreicht erst ab 80 % relativer Luftfeuchte die in diesem Projekt ermittelten Wassergehalte. Die Sorptionsisothermen der untersuchten Lehmmörtelputze liegen damit innerhalb des Bereichs der untersuchten Literaturwerte, verlaufen aber insgesamt wesentlich flacher. Daher ist für akkurate Simulationsergebnisse eine eigene Messung erforderlich.

Abbildung 59 Vergleich der Sorptionsisothermen: Lehmmörtelputze

eigene Darstellung (Flexeder)

Die Ermittlung der Sorptionsisothermen der verwendeten Lehmbauplatten ist ebenfalls zwingend notwendig, da in der Literatur soweit keine verlässlichen Quellen vorhanden sind. Ein Vergleich der Platten # 5 mit # 6, 7 und 8 zeigt außerdem, dass die reine Bezeichnung als ‚Lehmbauplatte‘ nicht ausreicht, um ein Produkt mit seinen individuellen Eigenschaften zu spezifizieren, da sie gravierende Unterschiede sowohl im Sorptionsverhalten als auch bei den restlichen Kennwerten aufweisen. Ergänzend werden die

Sorptionsisothermen und Trockenrohdichten einer Gipskartonplatte (#3), einer Gipsfaserplatte (#4) sowie von Proben aus Konstruktionsholz (GL24) (#9,10,15) und Porenbeton (#16) bestimmt.

Ein Vergleich der ermittelten Sorptionsisothermen aller untersuchter Baustoffgruppen gibt einen ersten Aufschluss über die hygrische Kapazität der untersuchten Baustoffe (siehe Anhang). Dabei fällt auf, dass sich die Sorptionsisothermen der fünf untersuchten Lehmmörtelputze (vgl. Abbildung 59) innerhalb eines schmalen Bereiches bewegen. Die Sorptionsisothermen der untersuchten Brettschichtholzproben weisen ebenfalls große Ähnlichkeit auf. Die Sorptivität der LehmBauplatten (vgl. Abbildung 60) unterscheidet sich dagegen stark je nach Produkt. Es lässt sich kein enger homogener Bereich wie bei den anderen Baustoffgruppen feststellen. Die mineralischen Baustoffe Gipskarton-, Gipsfaserplatte (#3, #4) und Porenbetonstein (#16) weisen jeweils eine vergleichsweise flache Sorptionsisotherme auf.

Betrachtet man lediglich eine Be- und Entfeuchtung innerhalb des Intervalls von 35 % bis 70 % lässt sich das absolute Sorptionsvermögen bei typischem Raumklima abschätzen. Der Wassergehalt bei 35% relativer Luftfeuchte wird dabei als Nullpunkt aller Sorptionsisothermen normiert. Auf der Ordinate wird dementsprechend die Differenz des volumenbezogenen Wassergehalts w [kg/m^3] aufgetragen. Bei einem Anstieg der relativen Luftfeuchte von 35 zu 70 % ist die höchste Sorption bei den untersuchten Brettschichthölzern festzustellen. Die verschiedenen Brettschichtholzproben sorbieren bei der gewählten Befeuchtung zwischen 11,1 und 15,8 kg/m^3 . Die Probekörper #9 und #10 stammen aus demselben Brettschichtholzbalken und unterscheiden sich lediglich durch die vorherrschende Faserrichtung.

Die Differenz der zwei Kurven liegt innerhalb der jeweiligen Fehlgrenzen. Zur Bestimmung der Gewichtskonstanz wurde eine Abweichung < 0,1 % innerhalb dreier Messungen mit jeweils 24 h Abstand zueinander toleriert. Wird diese Fehlertoleranz enger gewählt, verlängert sich die Dauer der Messreihen und die Bestimmung der Sorptionsisothermen wird genauer. Diese Präzisierung würde dazu führen, dass die Sorptionsisothermen der Probekörper #9 und #10 schlussendlich identisch sind.

Abbildung 60 Vergleich der Sorptionsisothermen für LehmBauplatten

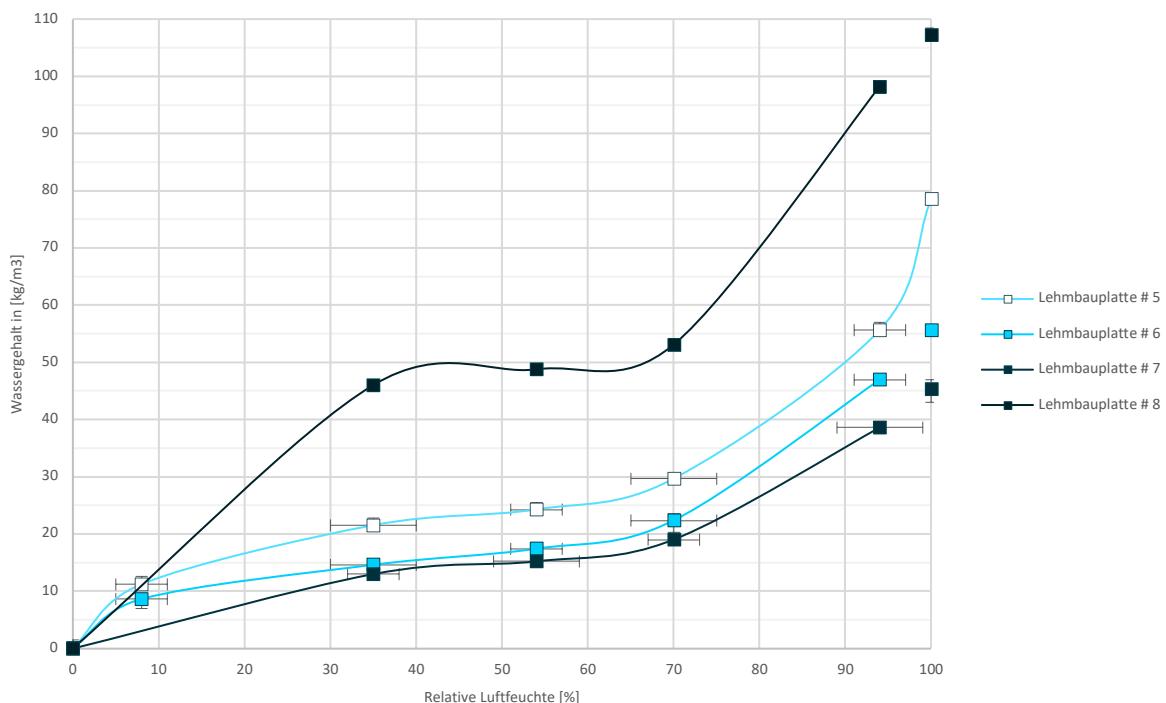
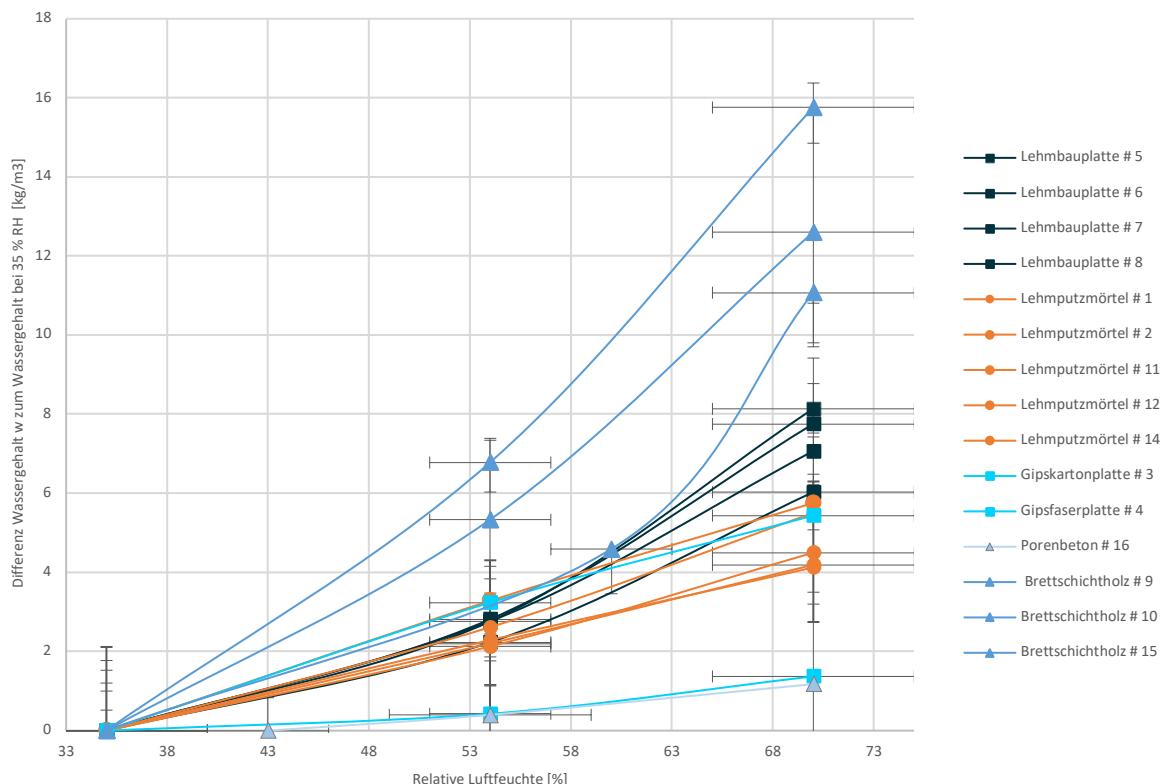


Abbildung 61 Vergleich aller untersuchter Baustoffgruppen im Bereich 30 % - 75 % relative Luftfeuchte

Abbildung 60 und Abbildung 61: eigene Darstellungen (Flexeder)

Bei einer Betrachtung der gesamten Sorptionsisotherme weisen die Lehmplatte (# 5–8) eine breite Streuung auf. Normiert auf das 35 % - 70 % Intervall ist das sorptive Verhalten allerdings sehr ähnlich, vgl. Abbildung 61. Alle untersuchten Lehmplatte sorbieren bei einer Befeuchtung von 35 % auf 70 % zwischen 6,0 und 8,1 kg Wasser pro m³ Baustoff.

Die untersuchten Lehmmörtelputze weisen im gewählten Intervall eine nahezu identische Wasseraufnahme zu rund 4,2 – 4,6 kg/m³ auf. Lediglich Lehmputz #1 sorbiert mit 5,5 kg/m³ deutlich mehr Wasser.

Der Porenbetonstein (#16) sowie die Gipskartonplatte (#3) sorbieren nicht nur im gesamten Bereich von 0 – 100 % relativer Luftfeuchte, sondern auch im untersuchten Intervall mit 1,2 – 1,4 kg/m³ wesentlich weniger als die untersuchten organischen Baustoffe. Die ebenfalls mineralisch basierte Gipsfaserplatte (#4) hingegen ist mit einer Wassergehaltdifferenz von 5,4 kg/m³ mit den untersuchten Lehmmörtelputzen vergleichbar.

Ergebnisse der instationären Labormessreihen zum Feuchtepufferwert (MBV)

Gemäß der in Abschnitt „Physik der Latentwärmeeffekte am Beispiel der Holzfeuchte“, S. 74 ff., dargelegten Zusammenhänge lässt sich auf Basis des dynamischen hygrokopischen Verhaltens auch das Freiwerden von Sorptionsenthalpie abschätzen.

Eine Analyse eines typischen Innenraumklimas in (Ineichen, 2020; Künzel, 1997) zeigt, dass der Großteil der jährlichen Feuchteaufnahmen und -abgaben vor allem durch kurzzeitige Feuchteschwankungen bedingt sind. Dementsprechend ist die Materialfeuchte nicht nur von der stationär zu erreichenden Ausgleichsfeuchte, sondern auch stark von der zeitlichen Komponente des auftretenden Feuchtesprungs abhängig. Es werden deshalb zum realistischeren Vergleich verschiedener Baumaterialien die dynamischen Messmethoden, wie Messmethode #B und #C, vgl. Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“, S. 82 f., verwendet.

Die in Tabelle 9 gelisteten Feuchtepufferwerte (moisture buffering value, MBV) wurden in Labormessreihen von (Ineichen, 2020; Künzel, 1997) im Rahmen des Forschungsprojekts PhyTAB nach Messmethode #C und gemäß der Formeln in Abschnitt „Theoretische Modelle zum instationären Feuchtigkeitsaustausch in Innenräumen“ ermittelt. Als Probekörper dienten dabei jeweils Materialproben aus derselben Charge, wie bei der Erstellung der Fassadentestelemente in Kapitel IV.

Tabelle 9 Ermittelte Feuchtepufferwerte (moisture buffering values, MBV) für verschiedene Materialkombinationen nach den Messungen von (Ineichen, 2020)

| Material # | Baustoffgruppe | Untersuchte Probekörper | Vgl. Fassaden-testelement | MBV [kg/m ² %RH] |
|-----------------|---|---|---------------------------|-----------------------------|
| #3 | Gipskartonplatten (d = 12,5 mm) | Gipskartonplatte ohne weitere Beschichtung | - | 0,73 |
| | | Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe | HRLB_01 | 0,20 |
| | | Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe | HRLB_02 | 0,49 |
| #15 | 5-lagiges Brettspernhholz (d = 100 mm) | Brettspernhholz ohne weitere Beschichtung | BSP_01 Variante 1 | 0,70 |
| | | Ergebnisse der instationären Labormessreihen | BSP_02 | 0,61 |
| #5 | Lehmplatte (d = 22 mm) | Lehmplatte ohne weitere Beschichtung | - | 1,23 |
| | | Lehmplatte mit Lehmdesignputz | BSP_03 | 0,89 |
| #1 #2 #12 | Lehmputzaufbauten (d = 19 mm) | Lehmputzaufbau mit Lehmdesignputz | HRLB_03 HRLB_04 | 0,90 |
| #17 | Stampflehm (d = 40 mm) | Massive Lehmprobe ohne weitere Beschichtung | - | 0,63 |

Eigene Darstellung (Flexeder) nach (Ineichen, 2020)

Experimenteller Nachweis der Bauteilerwärmung durch Sorptionsenthalpie

Nina Flexeder

Stand der Forschung: Experimente zur Sorptionsenthalpie bei Baustoffen

Untersuchung der Sorptionsenthalpie auf Materiallevel

Die in Abschnitt „Grundlegende Untersuchungen des Enthalpieeffekts“, S. 71 ff, erläuterten physikalischen Zusammenhänge der Sorptionsenthalpie sind in der Wissenschaft wohl bekannt und werden in vielfältigen Disziplinen, wie beispielsweise in der Pharmazie, seit Jahrzehnten erfolgreich angewendet. Im Kontext des Bauwesens wird latente Wärme erst seit kurzem als positiv zu nutzendes Potential betrachtet. Besonders für stark hygrokopische Materialien wie Holz eröffnet sich hier eine neue Argumentationsmöglichkeit.

Es finden sich in der Literatur bereits zwei Laborversuche mit dem Material Holz. In (Dimitrios Kraniotis et al., 2015) wird in einem Laborversuch die Erwärmung von kleinen Holzkörpern bei einer Befeuchtung dokumentiert. Dazu wird in einer schwarz ausgekleideten Klimakammer die relative Luftfeuchte innerhalb von etwa 12 Minuten von 20 % auf 90 % erhöht. Ein hölzerner Probekörper (100 mm x 200 mm x 10 mm) wird mit einem Probekörper identischer Abmessungen verglichen, welcher in PE-Folie eingepackt ist und somit die Feuchtigkeit nicht aufnehmen kann. Das Gewicht des ersten Probekörpers erhöht sich simultan zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit um rund 5 %. Gleichzeitig kann mit der Wärmebildkamera eine kurzzeitige Erwärmung der Oberfläche um 2,1 K beobachtet werden. Der zweite Probekörper erwärmt sich indes nur um 0,9 K. Während des Sorptionsvorgangs wird ein zunächst exponentieller, anschließend ein linearer Anstieg des Gewichts verzeichnet. Nach 60 Minuten hat der Versuchskörper 11,7 g Wasser aufgenommen und damit sein Anfangsgewicht um rund 10 % erhöht. Es bleibt in (Dimitrios Kraniotis et al., 2015) ungeklärt, weshalb sich das Referenzobjekt zwar geringfügiger, aber dennoch erwärmt.

In (Dupleix et al., 2018) wird das Auftreten von Adsorptionswärme beim Sprung von 1 % (absolut trockenes Holz) zu 95 % relativer Luftfeuchte im Laborversuch mit einer Wärmebildkamera genauer untersucht. Es zeigt sich, dass aufgrund der Anisotropie des Holzes die Erwärmung an der quergeschnittenen Fläche (Hirnschnitt) um rund 2 K höher ist als an den radialen und tangentialen Seitenflächen (Spiegel und Fladerschnitt).

Sorptionswärme als Potenzial zur Energieeinsparung?

In (Winkler et al., 2014) wird sowohl die Pufferung der relativen Luftfeuchte als auch der Wärmetransport infolge von Sorption mithilfe einer Simulation untersucht. Es soll geklärt werden, inwieweit eine Variation der Innenbekleidung eines fiktiven Beispielraums in Holzbauweise den Jahresenergiebedarf beeinflusst. Dazu werden Materialdaten ohne weitere Prüfung aus der WUFI Datensammlung übernommen. Beim Vergleich von Oberflächen aus Gipsputz, Fichte oder Holzfaser werden lediglich signifikante Unterschiede bezüglich des Energieverbrauchs für die Be- und Entfeuchtung festgestellt.

Die potentiellen Energieeinsparungen, welche sich durch den Phasenwechsel bei der Sorption ergeben, sind zum einen sehr gering und heben sich gegenseitig zum anderen wieder auf. So kommt es in der gewählten Konstellation beispielsweise bei der Verwendung von stark sorptiver Holzfaser zwar zu einer Verringerung der jährlichen Heizlasten, aber dafür zu einem erhöhten Kühlbedarf. Zur Untersuchung wird der Raum in WUFI Plus modelliert und verschiedenen Lastprofilen in stündlichen sowie teilweise minutenweisen Rechenschritten ausgesetzt. Der Luftwechsel wird zwar in verschiedenen Varianten auf seinen Einfluss untersucht, allerdings wird er stets als konstant angenommen.

In (Nore et al., 2017) werden ähnliche Simulationen anhand von Experimenten in zwei Testräumen aus Massivholz validiert. Dabei werden der Luftwechsel und die Feuchteproduktion konstant gehalten. Es zeigt sich ein großes Potential für indirekte Energieeinsparungen bei einer Kombination von Holzbau mit einer präzise geregelten Klimaanlage. Auf Basis der Validierung werden kleine holzverkleidete Badezimmer an verschiedenen skandinavischen Standorten simuliert. Bedingt durch eine Temperaturabsenkung von 3 K (23°C zu 20°C), werden Energieeinsparungen von rund 40 % prognostiziert. Die Absenkung wird dadurch begründet, dass die Feuchtigkeitsproduktion während des Duschens durch die Sorptionswärme zu einer Temperaturerhöhung von ca. 3 K führen würde. Die Autoren fordern, dass die Ausnutzung von diesen

Latentwärmeeffekten in die Gesamtenergiebilanz aufzunehmen ist. Dementsprechend sollen Energiebedarfsberechnungen in kleinen Rechenschritten ausgeführt werden, um die Vorteile hygroskopischer Materialien mit einbeziehen zu können.

Kritische Diskussion der Hypothesen aus der Literatur

In den Versuchen von (Dimitrios Kraniotis et al., 2015) wird die unbereinigte Kurve der Temperaturerwärmung des Probekörpers dargestellt. Die Unregelmäßigkeiten der Kurvenform lassen auf sekundäre Wärmequellen schließen. So wäre es beispielsweise denkbar, dass die Probekörper durch die Abwärme von Messinstrumenten wie der Thermokamera zusätzlich erwärmt werden. In der Darstellung von (Dimitrios Kraniotis et al., 2015) erwärmt sich ein Referenzkörper (T_{ref}) auf von rund 20,0 °C auf 21,4°C. Dementsprechend ist die alleinige Darstellung der Erwärmung des Probekörpers irreführend.

In (Winkler et al., 2014) sowie in (Nore et al., 2017) werden ausschließlich konstante Luftwechsel angesetzt. Dies ist in der Realität meist nicht der Fall. Bei einem natürlichen Lüftungskonzept würde nach einer schlagartigen Befeuchtung, beispielsweise nach dem Duschen, eine Stoßlüftung von etwa 10 Minuten erfolgen. Auch bei einer mechanischen Lüftung wird die Leistung meist für einen kurzen Zeitraum nach oben geregelt. So sind die Ventilatoren der Schachtlüftung bei innenliegenden Bädern (Neubau) beispielsweise oft luftfeuchtegesteuert.

Die Einsparungen der Heizenergie aus (Nore et al., 2017) sind vermutlich zu hoch prognostiziert. In dem vorgestellten Modell muss der Bewohner zunächst ein 20°C kaltes Bad nutzen, welches sich während und nach dem Duschen aufheizt. Die Komfortanforderungen des Nutzers werden dadurch herabgesetzt. Um eine echte Vergleichbarkeit zu schaffen, müsste diese Reduktion auch im Referenzfall eingerechnet werden.

Alle bisher zitierten Arbeiten untersuchen lediglich die Sorptionsenthalpie bei verschiedenen Holzprodukten im Vergleich zu Gipsputz. Holz zeichnet sich zwar durch eine große Feuchteadsorption aus, besitzt aber je nach Faserrichtung auch einen relativ hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde die bisherige Auswahl deshalb um eine Vielzahl an Baustoffen erweitert und dabei der Fokus auf Lehmprodukte sowie eine Kombination aus Holz- und Lehmbaustoffen gelegt.

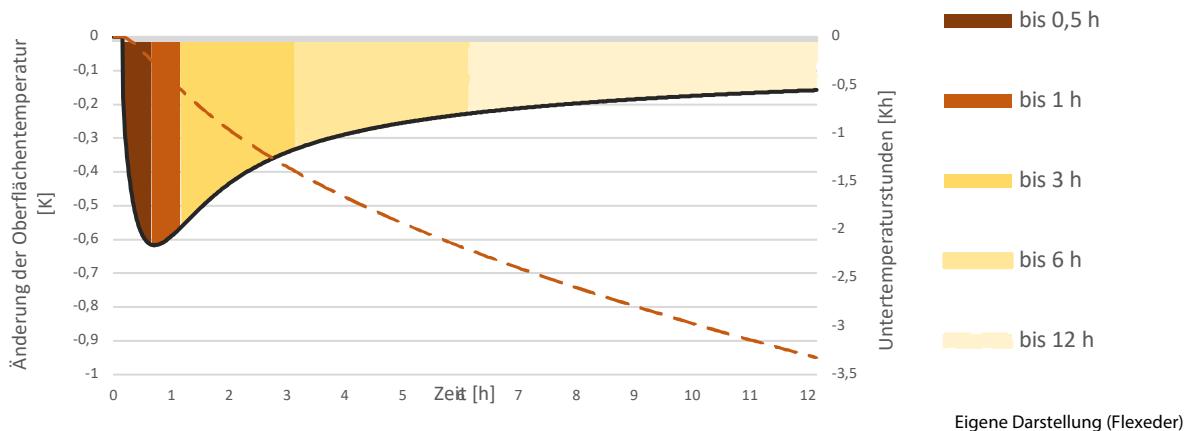
Definitionen zur Beurteilung der instationären thermischen Messergebnisse in Bezug auf die hygrothermische Masse

Es existiert soweit keine definierte Methode, um das hygrothermische Potential eines bestimmten Materials zu benennen (vgl. Abschnitt Bauphysikalische Grundlagen zu hygrothermischen Speicherkapazitäten). Für die Klimatisierung eines Raumes können je nach Nutzungsprofil verschiedene Materialeigenschaften optimal sein. Abhängig von Nutzungs- und Feuchtezyklus kann sich das hygrothermische Verhalten eines Bauteils somit vorteilhaft oder nachteilig auf das Raumklima auswirken. Eine reine Reduktion auf die Höhe des Maximums des Temperaturdifferenzengraphen g [K] ist zu kurz gegriffen. Der zeitliche Abstand zwischen Luftfeuchteveränderungen sowie die gewünschte Temperaturveränderung müssen in eine Beurteilung einer Wandkonstruktion miteinfließen.

Die hygrothermische Masse eines Materials hängt sowohl von den wärmetechnischen als auch den feuchtespezifischen Eigenschaften eines Materials ab. Sie bildet dadurch eine Symbiose der thermischen und der hygrischen Masse.

Im Rahmen dieses Forschungsberichts wird die hygrothermische Masse durch das Integral der Temperaturdifferenz definiert. Dieser Graph G [Kh] wird durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Um einen Vergleich von Materialien und Baustoffkombinationen zu ermöglichen, eignen sich feste Kennwerte. In Anlehnung an die zeitliche Unterteilung bei der Bestimmung der Sorptionsklassen die Fläche G unter dem Temperaturdifferenzengraphen g deswegen in folgende zeitlich gestaffelte Abschnitte unterteilt, vgl. Abbildung 62.

Abbildung 62 Oberflächentemperaturänderung g und Integral G infolge von Desorption nach einem isothermen Abfall der relativen Umgebungsluftfeuchte



Es ergeben sich so fünf Punkte des Graphen G ($x = 0,5; 1; 3; 6; 12$), welche durch die Werte der Überbeziehungsweise Untertemperaturstunden [Kh] das hygrothermische Verhalten eines Materials bei einem bestimmten isothermen Luftfeuchtesprung beschreiben.

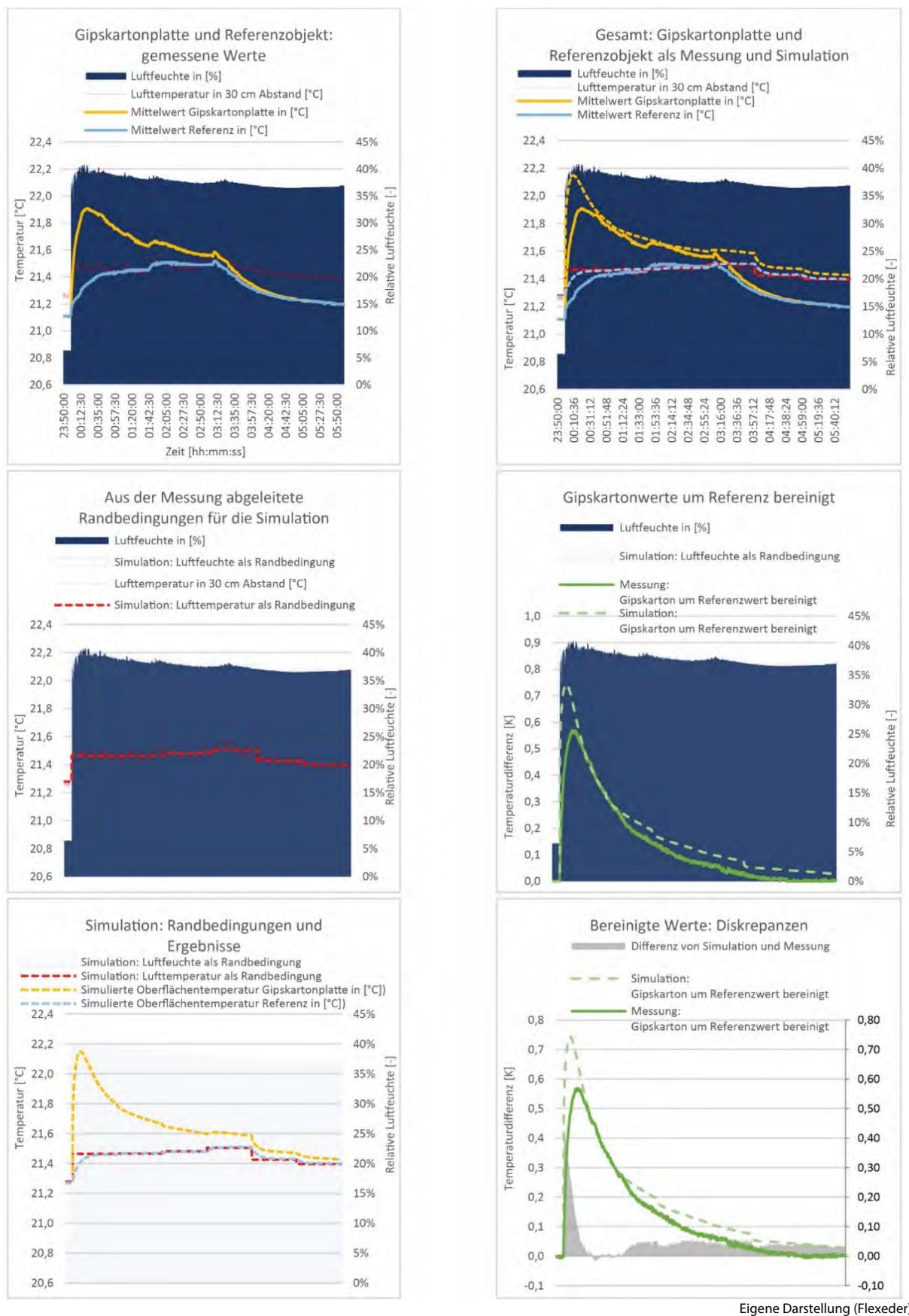
Versuchsablauf im Labor zur Messung der Bauteilerwärmung

Die verwendete Methode entspricht der in Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“ beschriebenen Messmethode #D, vgl. S. 82 f.. Vor dem Experiment werden die Materialproben bei konstanten Verhältnissen in einem Versuchsraum über mehrere Wochen lang vorkonditioniert. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustands werden zwei identische Materialproben mit dampfbremsendem Klebeband mehrlagig abgeklebt. Dabei bleibt bei einem der beiden Körper die Oberseite frei. Der Probekörper, also jene Materialprobe, deren Oberseite nicht abgeklebt wurde, de- und absorbiert mit dieser freien Seite Wasserdampf.

Wesentliche Temperaturänderungen des vollständig abgeklebten Referenzkörpers sind dementsprechend auf andere Einflüsse als die Sorption zurückzuführen. Beide Körper werden mit Oberflächensensoren versehen und in den Messkäfig eingelegt. Dann wird der Messkäfig in den Versuchsaufbau gestellt, welcher mit Klemmen dicht verschlossen wird. Die Blechwanne am Boden des Versuchsaufbaus enthält je nach gewünschtem Feuchtesprungversuch ein Salz, eine Salzlösung oder reines Wasser. Die mit der Wannenfüllung angestrebte relative Luftfeuchte sollte sich signifikant von jener der Umgebungsluft im Versuchsraum unterscheiden. Durch das günstige Verhältnis zwischen Oberfläche der Wanne und dem Volumen des Versuchsaufbaus (etwa $1/6 \text{ m}^{-1}$) stellt sich innerhalb etwa drei Stunden isotherm eine konstante Luftfeuchte ein. Der eigentliche Feuchtesprungversuch startet, wenn der Versuchsaufbau wieder geöffnet und der Messkäfig herausgenommen wird. Ab diesem Moment beginnt der Sorptionsprozess im Probekörper. Die Temperaturänderung auf beiden Körpern wird durch die Oberflächensensoren gemessen und mit einem Datenlogger kontinuierlich in Schritten von sechs Sekunden aufgezeichnet. Zur zusätzlichen Beobachtung kann eine Wärmebildkamera in die passgenaue Aussparung des Messkäfigs eingehängt werden. Zur primären Auswertung werden allerdings die Messdaten aus den am Messkäfig befestigten Sensoren verwendet.

Methoden zum Abgleich von Simulation und Messergebnissen

Unter der Beachtung der möglichen Messfehler lässt sich eine repräsentative Übereinstimmung von Experiment und Simulation feststellen. Zur Validierung werden verschiedene Materialproben nach Messmethode #D getestet. Hierfür werden zwei identische Stücke einer Gipskartonplatte (#3, $d = 12,5 \text{ mm}$) nebeneinander in die Probekörperhalterung gelegt. Eine Platte dient als sorbierender Probekörper

Abbildung 63 Ablaufschema der Validierung der Simulation mithilfe der Daten aus einem Doppelversuch im Labor


und ist an der Unterseite und den Seitenrändern mit Folienband dampfdicht (sd-Wert $\geq 3,00\text{ m}$) verklebt. Die zweite Platte ist als Referenzkörper auf allen sechs Seiten abgedichtet. Die Halterung wird in den Versuchsaufbau gestellt und darin mit Hilfe von Kaliumcarbonat ein stabiles Klima von ca. $21,3\text{ }^\circ\text{C}$ und 7 % relativer Luftfeuchte erzeugt. Nach 48 Stunden werden beide Probekörper schlagartig einer neuen Luftfeuchte von ca. 35% ausgesetzt. Es wird zunächst die umgebende Lufttemperatur (rot), die Luftfeuchte (dunkelblau), die Oberflächentemperatur am Probekörper (gelb) und die Oberflächentemperatur am Referenzkörper (hellblau) gemessen. Der Referenzkörper erwärmt sich schlagartig mit der Erhöhung der Lufttemperatur beim Start des Experiments (vermutlich, weil sich eine Person in der Klimakammer aufhält). In den folgenden drei Stunden erwärmt sich die Referenz stetig weiter (wahrscheinlich durch Wärmestrahlung der Thermokamera). Danach wird die Kamera entfernt und Referenz- und Probekörper kühlen simultan ab. Da die Luftfeuchte und die umgebende Lufttemperatur nicht exakt konstant sind, werden sie stündlich gemittelt und als Randbedingungen für die Simulation verwendet. Anhand dieser Werte kann das Experiment nachsimuliert werden. Die Kurve für die Referenzoberflächentemperatur passt sich dabei stets mit etwas zeitlicher Verzögerung an die Temperatur der Umgebungsluft an. Beim Vergleich aller gemessenen und simulierten Werte ist eine grobe Übereinstimmung der Kurven bereits gut erkennbar. Die gemessenen sowie die simulierten Oberflächenwerte der Gipskartonplatte werden bereinigt, indem die Referenztemperaturwerte jeweils abgezogen werden. Die Diskrepanzen sind vor allem in den ersten Minuten deutlich. Nach etwa 30 Minuten stellt sich eine annähernd konstante Differenz zwischen Simulation und Messung von ca. 0,05 Kelvin ein.

Fehlerabschätzung der Validierungsmethodik

Systematische Abweichungen der Berechnungsmethode

Die verwendete ‘Referenzkörper – Probekörper – Methode’ liefert Ergebnisse, welche den Simulationsergebnissen sehr ähnlich sind. Allerdings ist das Maximum der Messwerte nicht so ausgeprägt, wie das der Simulation. Die Simulationssoftware WUFI weist zwei Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Sorptionswärme auf, vgl. hierzu auch Abschnitt „Physik der Latentwärmeeffekte am Beispiel der Holzfeuchte“, S. 74 ff.

Die Verwendung einer präzisierten Verdampfungsenthalpie h_v (*Problem 1*) würde im vorliegenden Fall zu einem weniger ausgeprägten Maximum der Simulationskurve und damit zu einer höheren Übereinstimmung mit der Messkurve führen. Die Einbeziehung der Bindungsenthalpie h_b in die Berechnung (*Problem 2*) würde in einer noch größeren Differenz zwischen Simulation und Messung resultieren. Zudem gilt es zu beachten, dass das verwendete Simulationsprogramm viele Einflüsse wie beispielsweise Luftströmungen im Raum nur bedingt berücksichtigt.

Systematische Fehler der Temperatursensoren

Über den gesamten Messzeitraum lässt sich eine verminderte Erwärmung im Experiment gegenüber der Simulation feststellen. Grund dafür könnte sein, dass die Oberflächensensoren nicht die direkte Sorptionswärme messen. An der Stelle, wo der Oberflächenfühler aufliegt, ist die Materialoberfläche durch eben diesen abgedeckt. Genau auf dieser Fläche (4 mm x 16 mm) kann die Materialoberfläche folglich kaum Wasserdampf aufnehmen oder abgeben. Es findet dort nur eine stark verminderte Sorption statt. Für eine weiterführende Bereinigung der Messergebnisse müsste die Wärmeleitung in den Sensorkopf berechnet werden. Für die folgenden Untersuchungen wird angenommen, dass die divergierenden Maxima von Simulation und Messung auf diesen Fehler zurückzuführen sind.

Im Verlauf des Forschungsprojektes wird deshalb ein spezieller Sensorkopf in Pyramidenform mit deutlich reduzierter Auflagefläche und zusätzlichem Strahlungsschirm in Kapitel IV entwickelt und für die Langzeitmessungen in Kapitel V erstmals erfolgreich angewendet, vgl. Abschnitt „Primäre Oberflächentemperaturmessung“, S. 163.

Differenzierung zu den Pufferungseffekten durch thermische Masse

Die hygrothermische Trägheit beim Sorptionsprozess darf nicht mit der Trägheit der thermischen Masse bei einer konventionellen Erwärmung verwechselt werden. Die Graphen, welche schlussendlich miteinander verglichen werden, stellen Temperaturdifferenzen dar. Die absolut gemessenen Oberflächentemperaturen der Probekörper wurden bereits durch die des jeweiligen Referenzkörpers bereinigt. Durch die vollständige Abklebung vor der Trocknung im Versuchsaufbau, entspricht die Materialfeuchte des Referenzkörpers bereits ab Versuchsstart der Zielfeuchte des Probekörpers. Das System der Subtraktion der Referenzmesswerte weist hier einen systematischen Fehler auf.

Die Wärmekapazität des enthaltenen Wassers sorgt in der Regel für eine höhere Gesamtwärmekapazität und eine höhere Wärmeleitfähigkeit von feuchten Baustoffen. Dies heißt zunächst, dass die Erwärmung eines feuchten Baustoffes mehr Energie benötigt als die eines trockeneren mit gleichem Volumen. Dafür sind zwei Gründe zu nennen: Zum einen besitzt eine feuchte Baustoffprobe mehr Masse als eine trockene mit denselben Außenmaßen. Zum anderen besteht die feuchte Baustoffprobe anteilig aus einer größeren Menge Wasser mit einer höheren Wärmekapazität. In Anlehnung an die Berechnung der wirksamen Speicherfähigkeit $C_{wirk, therm}$ werden die Speicherfähigkeiten C bei 8 % und 54 % relativer Luftfeuchte verglichen:

$$\frac{C_{Wirk, therm \ 8 \%}}{C_{Wirk, therm \ 54 \%}} = \frac{c_{8 \%} \rho_{8 \%} d A}{c_{54 \%} \rho_{54 \%} d A} = \frac{c_{8 \%} \rho_{8 \%}}{c_{54 \%} \rho_{54 \%}}$$

Als Beispiel werden die Wassergehalte der folgenden Proben (200 mm x 100 mm x 12,5 mm) aus den Labormessungen in Abschnitt „Ergebnisse der Ermittlung von Sorptionsisothermen“ gewählt.

Die weiteren Baustoffwerte stammen aus den Angaben der Hersteller (vgl. Abschnitt „Untersuchte Baustoffauswahl für den Innenausbau“).

Tabelle 10 Vergleich der feuchteabhängigen Wärmekapazität c der Gipskartonplatte # 3 (d=12,5 mm)

| Relative Luftfeuchte | 8 % | 54 % |
|----------------------|---|---|
| Wassergehalt [g] | 0,51 g | 1,07 g |
| | 0,3 % des Trockengewichts ist Wasser | 0,6 % des Trockengewichts ist Wasser |
| Gesamtgewicht [g] | 170,14 g + 0,51 g = 170,65 g | 170,14 g + 1,07 g = 171,21 g |
| | 99,7 % Trockenmasse | 99,4 % Trockenmasse |
| | 0,3 % sorbiertes Wasser | 0,6 % sorbiertes Wasser |
| Wärmekapazität c | 0,997 x 1100 J/kgK + 0,003 x 4182 J/kgK = | 0,994 x 1100 J/kgK + 0,006 x 4182 J/kgK = |
| | 1109 J/kgK | 1118 J/kgK |

eigene Darstellung (Flexeder)

Daraus folgt für die Gipskartonplatte (#3):

$$\frac{C_{wirk8 \%}}{C_{wirk54 \%}} = \frac{\frac{1109}{kgK} * 170,65 g}{\frac{1118}{kgK} * 171,21 g} = 0,98870\dots$$

Die thermische Speicherfähigkeit der Gipskartonplatte (#3) beträgt also bei 8 % relativer Luftfeuchte nur rund 99 % der Speicherfähigkeit bei 54 % relativer Luftfeuchte.

Dies bedeutet, dass sich bei einem Feuchtesprungversuch von 8 % zu 54 % relativer Luftfeuchte der Referenzkörper durch ungewollte thermische Nebeneffekte zunächst minimal langsamer erwärmt als der sorbierende Probekörper. Die Temperaturdifferenz wird demnach also anfangs etwas zu groß eingeschätzt. Allerdings wird die Differenz durch den Sorptionsprozess selbst relativiert, der Probekörper passt seinen Wassergehalt an die Zielfeuchte äquivalent zu 54 % relativer Luftfeuchte an.

Für die folgende Berechnung wird ein stationärer Fall angenommen. Die Wärmemenge Q aus thermischen Störungen wird für beide Körper identisch angenommen. Daraus ergibt sich für das Beispiel der folgende Quotient:

$$\begin{aligned}\frac{Q_{8\%}}{Q_{54\%}} &= \frac{c_{8\%} m_{8\%} \Delta T_{8\%}}{c_{54\%} m_{54\%} \Delta T_{54\%}} \\ &= \frac{C_{wirk\ 8\%} \Delta T_{8\%}}{C_{wirk\ 54\%} \Delta T_{54\%}} = 1\end{aligned}$$

| | | |
|-----------------|---|---|
| $C_{Wirk\ x\%}$ | = | Wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} bei x % relativer Luftfeuchte [J/K] |
| $c_{x\%}$ | = | Spezifische Wärmekapazität des Baustoffs bei x % relativer Luftfeuchte [Wh/kgK] |
| $P_{x\%}$ | = | Rohdichte des Baustoffs bei x % relativer Luftfeuchte [kg/m³] |
| d | = | wirksame Schichtdicke der Schicht [m] |
| A | = | wirksame Bauteiloberfläche [m²] |

Angenommen, der Referenzkörper erwärmt sich in der Messung von etwa 21,1 °C auf 21,7 °C. Das heißt, in diesem Beispiel ist $\Delta T_{54\%} = 0,6$ K. Es folgt für die Erwärmung des Probekörpers:

$$\Delta T_{8\%} = 0,98870 \dots * 0,6 K = 0,59322 \dots K$$

Der Unterschied der thermischen Masse von Referenz- und Probekörper ist demnach marginal und verringert sich zudem im Laufe des Sorptionsprozesses. Er wird deswegen als vernachlässigbar angesehen. Außerdem gilt es zu beachten, dass der Wert für die spezifische Wärmekapazität c von Baustoffherstellern gewöhnlich nur auf zwei Stellen gerundet angegeben wird.

Ergebnisse und Diskussion der hygrothermischen Laborversuche

Die Ergebnisse aller individuellen Messungen sind im Anhang einsehbar. Im Folgenden werden deshalb nur ausgewählte Versuche diskutiert und in Relation gesetzt. Um verlässliche Daten als Basis einer Entscheidung für oder gegen einen bestimmten Wandaufbau oder eine Konstruktion zu gewinnen, werden geeignete Versuchsreihen miteinander verglichen. Die Messdaten werden dazu nach dem Referenzkörper-Verfahren (vgl. Abschnitt „Methoden zum Abgleich von Simulation und Messergebnissen“) bereinigt. Die verwendeten Materialien werden in Abschnitt „Untersuchte Baustoffauswahl für den Innenausbau“ näher erläutert.

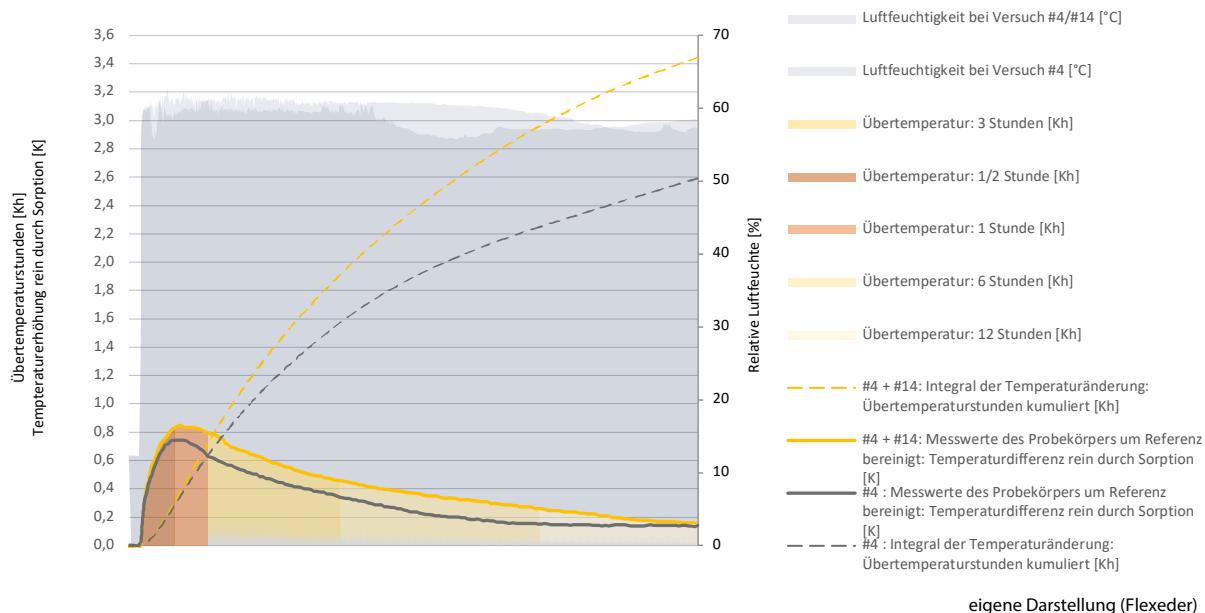
Für eine Wand sind vielfältige Baustoffkombinationen möglich. Die Materialwahl hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie zum Beispiel Tragverhalten, Brandschutz, Wärmedämmung, Herstellkosten, Verfügbarkeit oder Anforderungen an den Wetterschutz. Es werden verschiedene Szenarien der Materialentscheidung untersucht.

- **Addition:** Ein vorhandener Baustoff wird durch eine weitere Schicht ergänzt.
- **Substitution:** Das Material einer bestimmten Konstruktionsschicht wird durch ein anderes ersetzt. Das Konstruktionsprinzip bleibt bestehen.
- **Rekonstruktion:** Ein Material wird zugunsten eines anderen Materials ausgetauscht, weshalb eine grundlegende konstruktive Neuplanung nötig werden kann.

Addition von zusätzlichem Lehmputz

Die Untersuchung des additiven Verfahrens zeigt, dass eine Gipsfaserplatte (#4) mit der Dicke 10 mm durch eine zusätzliche Lehmputzschicht (#14) mit der Dicke 2-5 mm sein hygrothermisches Verhalten signifikant verändert, vgl. Abbildung 64. Es wird darauf hingewiesen, dass sich durch eine zusätzliche Schicht auch die Masse der untersuchten Materialprobe erhöht. Allerdings wird die dadurch bedingte Steigerung der thermischen Trägheit bereits durch das Referenzverfahren größtenteils aus den Messwerten bereinigt, da sich die wirksame Speicherfähigkeit C_{wirk} des Referenzkörpers analog erhöht.

Abbildung 64 Vergleich von Gipsfaserplatte (#4) und Gipsfaserplatte verputzt (#4 + #14)



Die Gipsfaserplatte (#4, grau dargestellt) erwärmt sich bei einem Feuchtesprung von 12 % zu 60 % relative Luftfeuchte um maximal 0,75 Kelvin. Das Integral der Erwärmungskurve lässt sich in Kelvinstunden aufsummieren. Die Gipsfaserplatte mit der addierten dünnen Lehmputzschicht (#4 + #14, gelb dargestellt) zeigt bei demselben Feuchtesprung nicht nur ein höheres Erwärmungsmaximum (0,85 Kelvin), sondern hält diesen Zustand auch wesentlich länger.

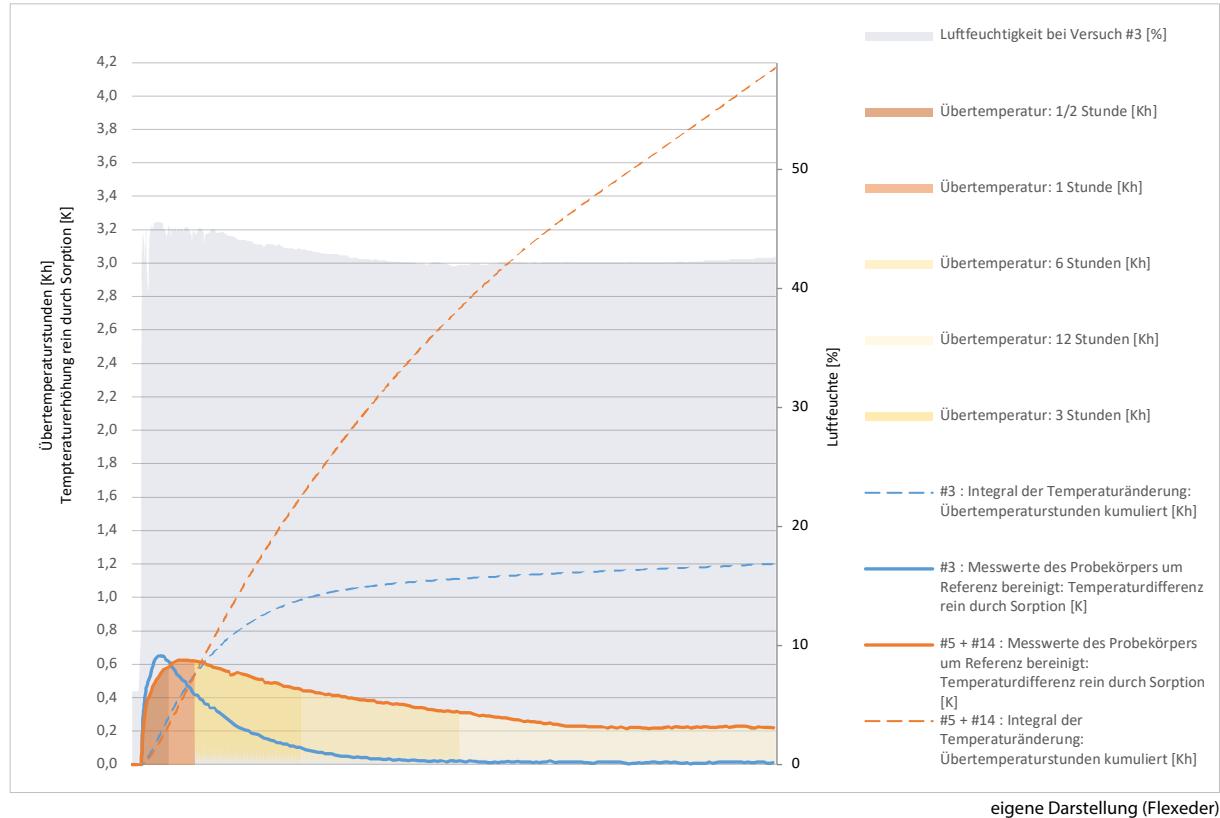
Substitution der Gipskartonplatte durch eine Lehmbauplatte

In Abbildung 65 wird beispielhaft eine Substitutionsmöglichkeit in Bezug auf die Beplankung einer Wand in Ständerbauweise vorgestellt, bei welcher der 'Trockenbau-Klassiker' Gipskartonplatte mit einer verputzten Lehmbauplatte verglichen wird. Die Ergebnisse aus dem Feuchtesprungversuch mit Oberflächentemperaturmessung zeigen eindeutig, dass die hygrothermische Leistungsfähigkeit der Lehmkonstruktion (#5 + #14, orange dargestellt) nach 12 h Sorptionszeit bereits über 4,0 Kelvinstunden über der Starttemperatur liegt und auch danach noch einige Zeit sorbiert. Der Sorptionsprozess der Gipskartonplatte (#3, blau dargestellt) endet nach ca. 6 h endgültig, sodass die Kumulation der zeitlichen Erwärmung bei ca. 1,1 Kelvinstunden stagniert.

Bemerkenswert ist, dass die Gipskartonplatte nicht nur absolut gesehen ein um 0,04 K höheres Maximum der Temperaturerwärmung zeigt, sondern auch die erste Stunde die höhere Gesamtzahl an Übertemperaturstunden aufweist. Das bedeutet, dass bei der Beurteilung des hygrothermischen Potentials unbedingt die Zeitkomponente zu beachten ist. Auf ein Raummodell übertragen heißt dies, dass eine Beurteilung ganz entscheidend von Feuchte – beziehungsweise Lüftungszyklus abhängt.

Bei einer Entscheidung zwischen Materialien mit verschiedenen konstruktiven Eigenschaften kann eine komplette Umplanung nötig werden. Die vorgestellten Fälle sind abhängig von der Bauteilfunktion und müssen immer im Kontext der Einbausituation betrachtet werden.

Abbildung 65 Vergleich: Gipskartonplatte (#3) und verputzte Lehmbauplatte (#5 + #14)



Rekonstruktion des gesamten Wandaufbaus

Als Beispiel für eine rekonstruktiven Baustoffentscheidung wird der Vergleich zwischen einer Gipskartonplatte (#3) mit der Dicke 12,5 mm und Brettsperrholz (#9) mit einer Dicke von 45 mm gewählt, vgl. Abbildung 66. Die Gipskartonplatte (#3, blau dargestellt) erreicht bei einem Luftfeuchtesprung von 6 % zu 43 % ein wesentlich höheres Maximum als die Brettsperrholzprobe (#9, braun dargestellt) bei einem ähnlichen Sprung. Allerdings endet der Sorptionsprozess der Gipskartonplatte schneller als bei der Brettsperrholzprobe. Nach 3 h ist die Temperaturdifferenz der Probe #9 größer als die der Probe #3. Die gestrichelte Kurve der aufsummierten Übertemperaturstunden steigt bei #9 (braun) nach 6 h noch deutlich steiler an, als bei #3 (blau). Es wird prognostiziert, dass das Erwärmungsintegral der Holzprobe (#9) bei einer sehr langen Testdauer wesentlich größer als das des Gipskartons (#3) sein wird. Sollten statt einer Gipskartonbeplankung tragende Brettsperrholzelemente verwendet werden, kann das einen Wechsel von Ständerbauweise zu Holzmassivbauweise bedeuten. Eine Entscheidung für einen kompletten Wechsel der Tragkonstruktion hat in der Regel weitreichende Folgen und ist meist nur in sehr frühen Planungsphasen möglich.

Der zweite rekonstruktive Messungsvergleich zeigt eine verputzte Lehmbauplatte (#5 + #14, orange dargestellt) mit der Gesamtdicke 24-27 mm und eine verputzte Holzdämmplatte (#13 + #14, dunkelrot dargestellt), vgl. Abbildung 67. Die verputzte Holzdämmplatte erreicht eine wesentlich größere Erwärmung, sowohl im Maximalwert, als auch bei den aufsummierten Kelvinstunden. Bei einer Übertragung dieser Ergebnisse in die Planung sollte bedacht werden, dass eine verputzte Holzdämmplatte nur für ausgewählte Wand- oder Deckenkonstruktionen in Frage kommt.

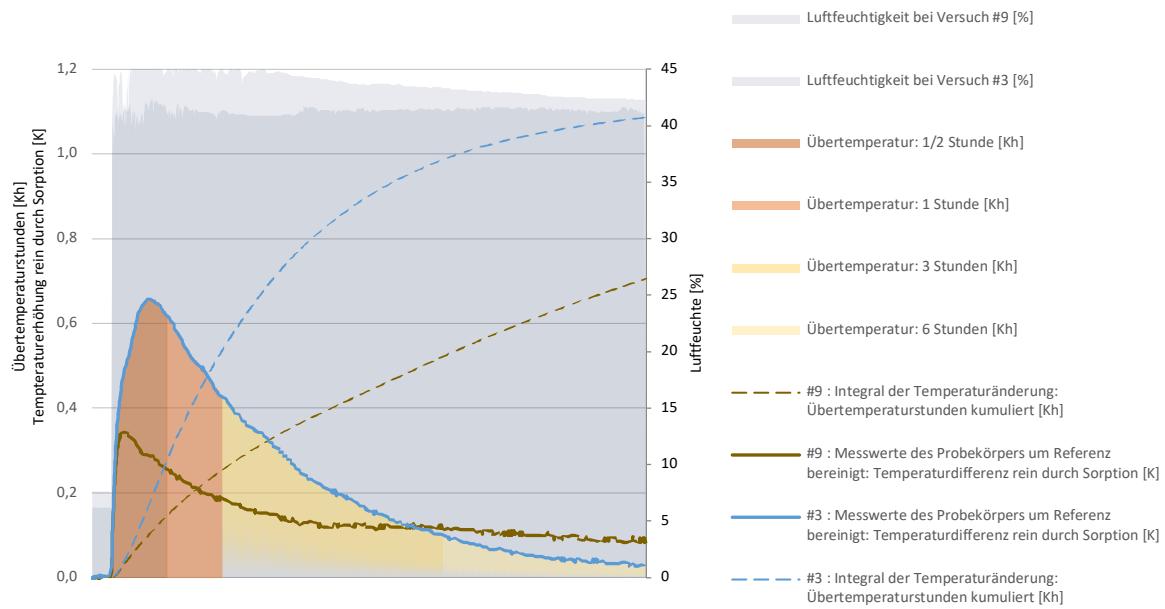
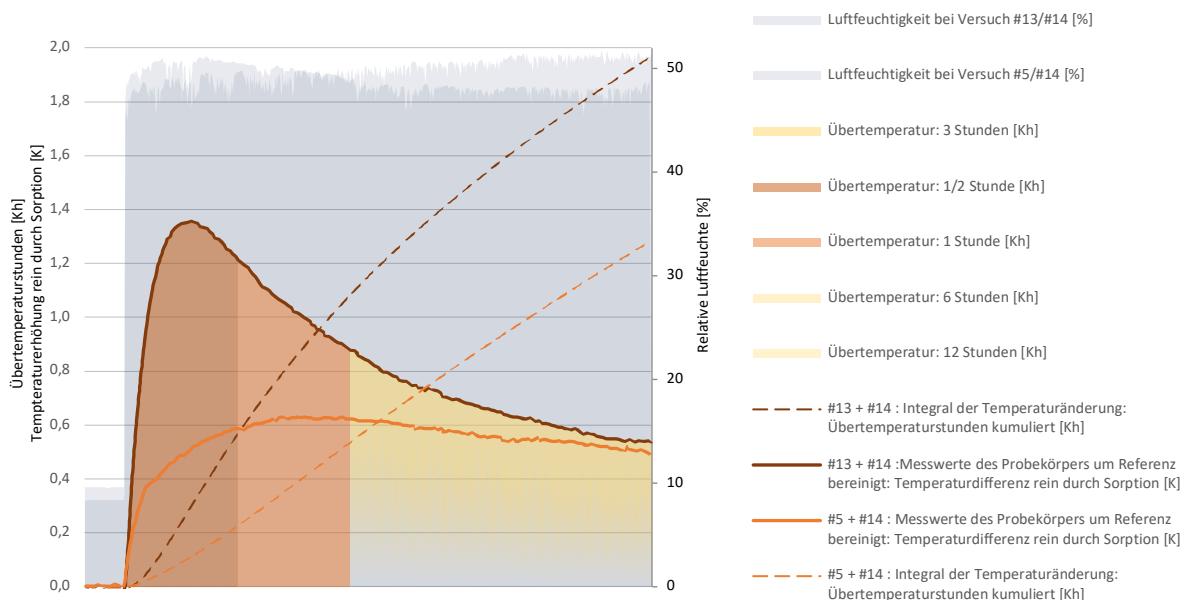
Abbildung 66 Vergleich: Brettsperrholz (#9) und Gipskartonplatte (#3)**Abbildung 67 Gegenüberstellung einer Lehmbauplatte mit Lehmputz (#5 + #14) und Holzdämmplatte mit Lehmputz (#13 + #14)**

Abbildung 66 und Abbildung 67: eigene Darstellungen (Flexeder)

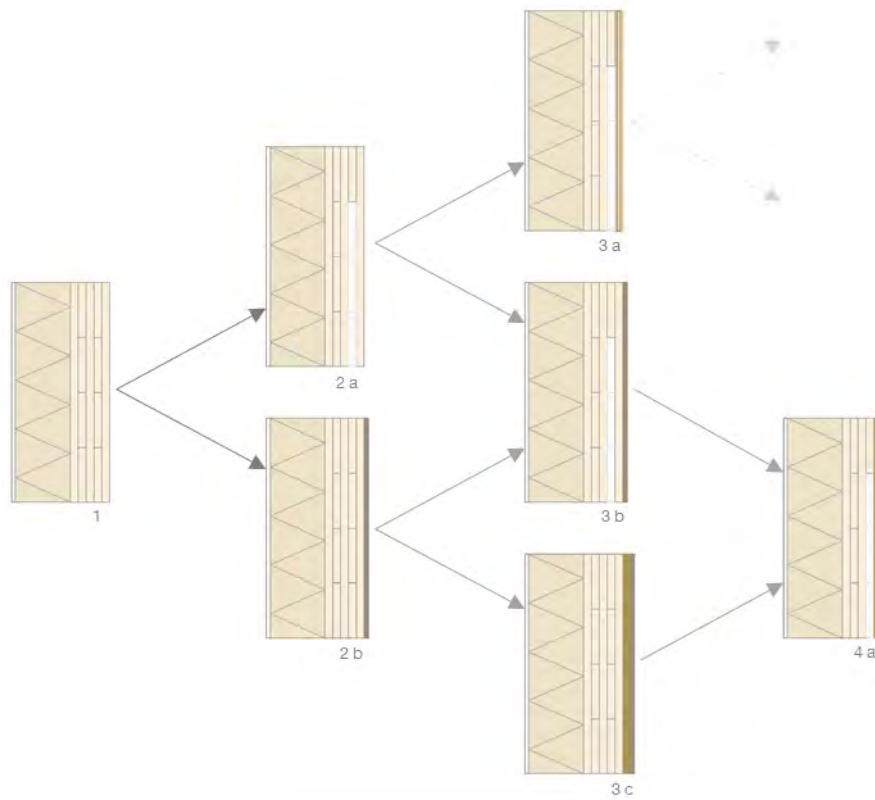
Variantenstudie zur TAM-Beplankung via hygrothermischer Bauteilsimulation

Nina Flexeder

Übersicht über die Variantenstudie auf Basis von unbehandeltem massivem Brettsperrholz

Der bereits im Vorgängerforschungsprojekt „Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente“ vorgeschlagene Aufbau einer thermisch aktivierte Massivholzwand wird in einem mehrstufigen Prozess weiterentwickelt. Dazu wird zunächst auf das Ausgangsprodukt, ein fünflagiges Brettsperrholzelement mit 100 mm Dicke zurückgegriffen, vgl. Abbildung 68. Dieser Bauteilaufbau wird im folgenden Abschnitt als Variante 1 bezeichnet und gleicht dem Aufbau des Fassadentesteils BSP_01 (vgl. Abschnitt „Bauteilaufbauten in Brettsperrholzkonstruktion“, S. 152) sowie dem Wandaufbau des Kubus in Kösching. Die möglichen Variationen dieser Basisvariante sind vielfältig und werden schrittweise durch Oberflächenmodifikation und / oder Luftkanäle gebildet. Mithilfe von hygrothermischer Bauteilsimulationen sowie der experimentellen Überprüfung ausgewählter Varianten im Langzeitversuch (siehe Kapitel V) werden die Potentiale zur idealen Wärmeabgabe an den Innenraum sowie Ausnutzen des Enthalpieeffektes der raumseitigen Decklage untersucht.

Abbildung 68 Weiterentwicklung einer Brettsperrholzwand mittels thermischer Aktivierung und/oder verschiedener Decklagen



eigene Darstellung (Flexeder)

Zur Gewährleistung der besseren Vergleichbarkeit der Varianten untereinander sowie mit den Bauteilaufbauten aus massivem Lehm, Ziegel und der Holzrahmenleichtbauweise ist der restliche Wandaufbau mit 140 mm Holzfaserdämmung und 10 mm Außenputzsystem jeweils identisch. Alle Varianten 1 – 4 weisen einen ähnlichen U-Wert von rund 0,26 – 0,28 W/m²K auf.

Um die hygrothermischen Effekte der mechanischen Luftkanalerwärmung/-abkühlung sowie möglicher weiterer Einflüsse und Wechselwirkungen durch das Innenraumklima auf Bauteilebene isoliert zu untersuchen,

wird zunächst ein stark vereinfachtes Modell verwendet. Wärme- und Stofftransport im Bauteil werden lediglich in eindimensionaler Richtung, also lotrecht zur planaren Materialschichtebene berechnet. Das im Schnitt dargestellte Bauteil wird also in Länge und Breite, so wie der angrenzende fiktive Innenraum als unendlich groß angenommen.

Für einen beispielhaften Vergleich wird im Folgenden die Erwärmung der Bauteilschichten infolge eines isothermen Luftfeuchtesprungs von 50 % auf 80 % relativer Luftfeuchte bei konstanten 23 °C im Innenraum mittels dynamischer eindimensionaler hygrothermischer Simulation ermittelt.

Es folgt zunächst die Untersuchung der Enthalpiefreisetzung jeweils bei einem isothermen Feuchtesprung ohne thermische Aktivierung des teilweise vorhandenen Luftkanals.

Abbildung 69 illustriert in roten Kurven (rechte Ordinate) die Temperaturverteilung, welche sich nach zwölf Minuten (0,2 h), einer halben Stunde (0,5 h), sowie nach einer, drei, sechs und zwölf Stunden im Bauteilquerschnitt von Basisvariante 1 einstellt. Der prognostizierte Feuchtetransport kann über die grünen Kurven (linke Ordinate) als Werte der äquivalenten relativen Luftfeuchte nachvollzogen werden. Es fällt auf, dass sich die Erwärmung der Bauteilschichten durch den gesamten Querschnitt hindurch nachverfolgen lässt, während hingegen die innenseitige Befeuchtung im simulierten Zeitraum von zwölf Stunden kaum Auswirkungen auf die tieferen Schichten zeigt.

Eine zusätzlich aufgebrachte Innenlage wie bei Variante 2b führt zu einem verminderten Wärmetransport in die tieferen Schichten des Bauteils, vgl. Abbildung 70. Im Gegensatz hierzu wird durch das Einfräsen eines Luftkanals in der zweiten Brettsperrholzschicht wie in Variante 2a, hier vereinfacht als abgeschlossene Luftsicht simuliert, der Querschnitt in thermischer Hinsicht geschwächt, vgl. Abbildung 71.

Abbildung 69 Simulationsergebnisse für die Basisvariante 1 nach einer einmaligen isothermen Luftbefeuhtung innenseitig (rechts). Der Wandaufbau entspricht dem Fassadentestelement BSP_01, sowie den Außenwänden des Testkubus in Kösching (vgl. Kapitel V).

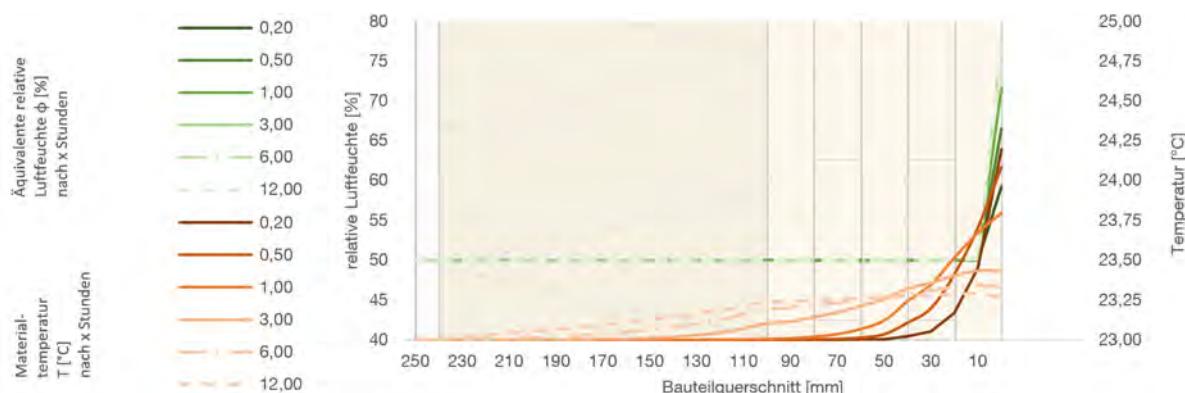


Abbildung 70 Simulationsergebnisse für die Variante 2b nach einer einmaligen isothermen Luftbefeuhtung innenseitig (rechts). Der Wandaufbau entspricht der Basisvariante 1 mit einer zusätzlichen Lehmputzschicht.

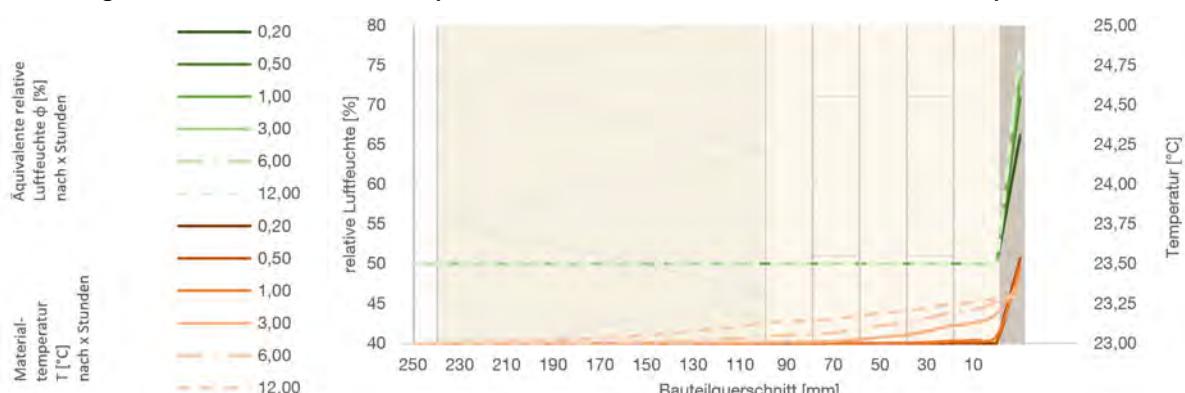


Abbildung 71 Simulationsergebnisse für die Variante 2a nach einer einmaligen isothermen Luftbefeuchtung innenseitig (rechts), jedoch noch ohne thermische Aktivierung. Der Wandaufbau entspricht dem TAM aus Kapitel V.

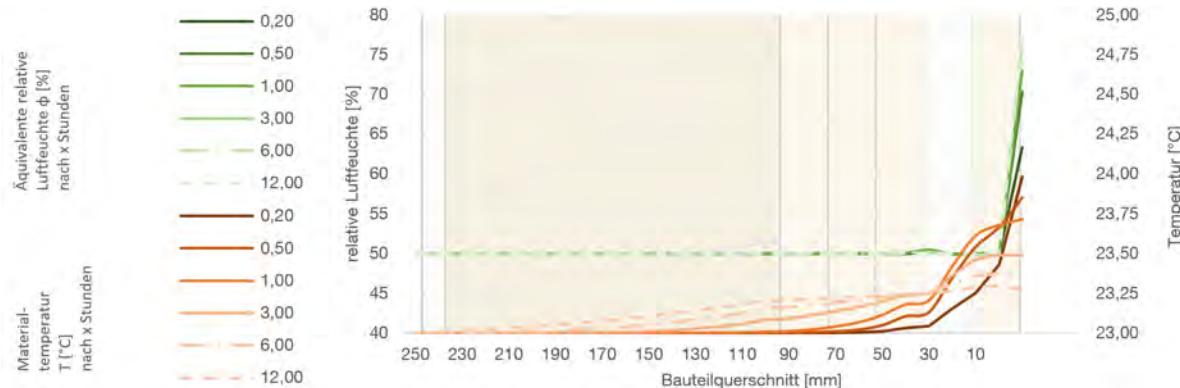
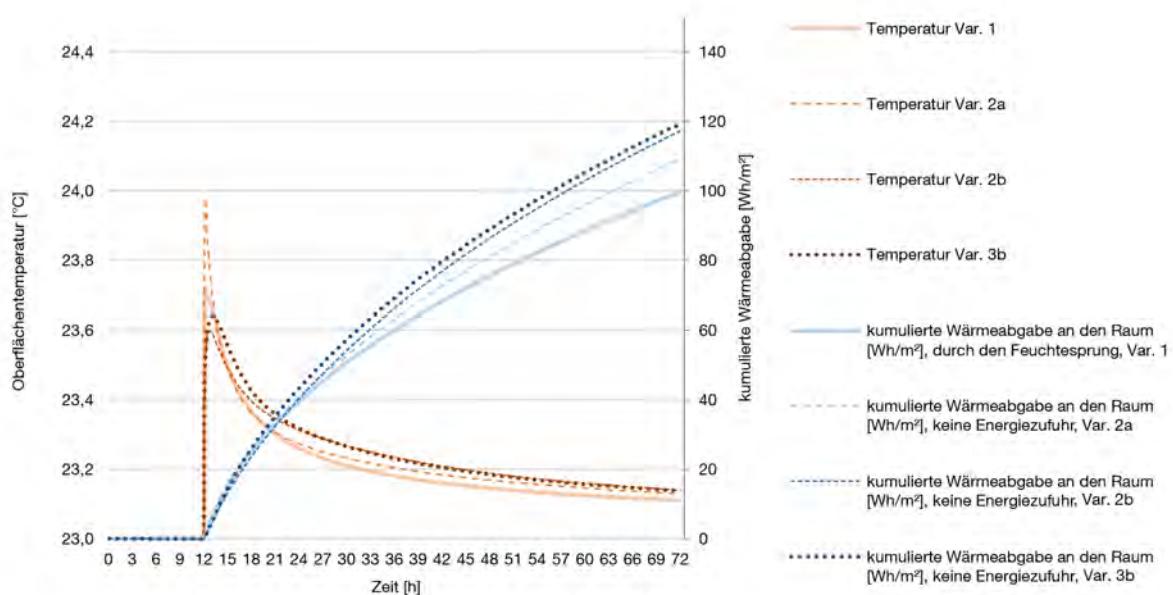


Abbildung 69 - Abbildung 71: eigene Darstellungen (Flexeder)

In Abbildung 72 wird die Erwärmung der Bauteiloberfläche sowie die kumulierte Wärmeabgabe infolge eines Sprungs von relativer Luftfeuchte für die Varianten 1, 2a, 2b und 3b gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass sich die Bauteiloberfläche der Variante 2a, welche ein Brettsperrholzelement mit Luftkanal in der zweiten Schicht auf Basis von Variante 1 darstellt, um rund 0,3 K mehr als die zugrunde liegende Basis Variante 1 erwärmt. Auch ist die kumulierte Wärmeabgabe von Variante 2a nach 60 Stunden gegenüber Variante 1 höher.

Bemerkenswert sind die Ergebnisse der Varianten 2b (auf Basis von 1) und 3b (auf Basis von 2a und 2b), vgl. Abbildung 72. Diese Varianten (2b und 3c) verfolgen das Konzept der zusätzlich aufgetragenen Innenlage aus Lehmputz auf das massive Brettsperrholz zur Modifikation der hygrothermischen Eigenschaften. Hier zeigt der Vergleich bei sonst identischen Rahmenbedingungen, dass eine zusätzliche Lehmputzschicht von 10 mm die Wasserdampfdiffusion in die tieferen Schichten des Bauteils zunächst verzögert und vor allem der Wärmetransport in die tieferen Bauteilschichten deutlich eingeschränkt ist (Abbildung 70). Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Oberfläche der Lehmputzschicht (Variante 2b) infolge der Wasserdampfadsorption weniger stark als die reine Holzoberfläche erwärmt. Das Temperaturgefälle, also das treibende Potential für den Wärmestrom, ist bei Variante 2b somit ebenfalls geringer als bei Variante 1.

Abbildung 72 Vergleich der Oberflächenerwärmung durch Enthalpiefreisetzung infolge eines isothermen Luftfeuchtesprungs von 50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte



eigene Darstellung (Flexeder)

Die durch den Lehmputz modifizierten Varianten 2b und 3b weisen zwar geringere maximale Oberflächentemperaturen nach dem Feuchtesprung auf, dafür geben sie allerdings kumuliert mehr Wärme an den Innenraum ab. (Es gilt zu beachten, dass die Auswertung der Simulationsstudie lediglich die Phänomene der ersten 60 Stunden nach diesem theoretischen Experiment berücksichtigt.)

Die rechnerische Untersuchung der verschiedenen Varianten ist durch die einheitlichen Rahmenbedingungen so parametrisiert, dass durch eine weiterführende Überprüfung im Baustofflabor ähnliche Messergebnisse erzielt werden könnten. Hierzu eignen sich instationäre Messreihen zur Gewichtszunahme mit den in Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“ beschriebenen Messmethoden #B, #C und #D, vgl. S. 82 f..

Theoretische Weiterentwicklung der Varianten in Bezug auf Beplankung für TAM

(Mindrup, 2019) konnte bereits mit ersten Versuchen und Simulationen zeigen, dass eine Heizleistung von 47 W/m^2 (Elementfläche) für thermisch aktivierte Massivholzelemente mit einem Aufbau nach Variante 2a bei durchschnittlichen Raumluftkonditionen (20°C und 50 % relative Luftfeuchte) ohne Beeinträchtigung der Brettsperrholzelemente durch Schwindrisse dauerhaft möglich sei. Zur weiteren Untersuchung mittels hygrothermischer Simulationsstudie werden deshalb im Folgenden jene Varianten, welche über einen thermisch aktivierbaren Luftkanal verfügen, jeweils die Dauer einer Stunde mit einer Heizleistung von 47 W/m^2 und äquivalenten relativen Luftfeuchten im Bauteilquerschnitt untersucht.

Anhand einer gezielten Entkopplung von zusätzlich eingebrachter Leistung und Freisetzung von latenter Wärme aufgrund von Physisorption werden im Folgenden die potentiellen Auswirkungen der thermischen und hygrothermischen Aktivierung anhand von Variante 2a mittels instationärer Simulationen gezeigt.

Allein durch den Feuchtesprung von 50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte berechnet sich an der Oberfläche der Variante 2a (Brettsperrholzelement mit Luftkanal in der 2. Schicht) nach rund zwölf Minuten (0,2 h) eine maximale Temperaturerhöhung von bis zu $0,98 \text{ K}$ auf $23,98^\circ\text{C}$, vgl. Abbildung 71.

Würde das TAM-Element lediglich für die Dauer einer Stunde erwärmt, ohne einen aktiven Wechsel der relativen Luftfeuchte im Innenraum, so wäre die Oberfläche nach zwölf Minuten auf lediglich $23,23^\circ\text{C}$ erwärmt. Das Temperaturmaximum der Luftsicht wäre mit Abschluss der Energiezufuhr, also nach den sechzig Minuten mit $27,73^\circ\text{C}$ und an der raumseitigen Oberfläche kurze Zeit später (nach rund 66 Minuten, nicht dargestellt) mit $24,47^\circ\text{C}$ erreicht, vgl. Abbildung 73.

Die Kombination von thermischer Aktivierung und Luftfeuchtesprung würde zu einer deutlich schnelleren Erwärmung führen, vgl. Abbildung 74: Durch den zeitgleichen Start des Feuchtesprungs (50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte bei $t = 0 \text{ h}$) und der thermischen Aktivierung mittels erwärmter Luft ($+47 \text{ W/m}^2$ für $t = 0 \text{ h}$ bis $t = 1 \text{ h}$) ergibt sich bereits nach zwölf Minuten eine Oberflächentemperatur von $24,18^\circ\text{C}$, sowie das Maximum von $24,97^\circ\text{C}$ nach 66 Minuten.

Die Wasseraufnahme des gesamten Bauteils wird innerhalb der ersten Stunde bereits auf rund 16 g/m^2 berechnet und hält während des Betrachtungszeitraumes von 12 h stetig an. Die Differenz der Oberflächenerwärmung von rund $0,95 \text{ K}$ ($t = 0,2 \text{ h}$) bei einer thermischen Aktivierung jeweils mit und ohne Feuchtesprung bei sonst gleichbleibenden Bedingungen lässt sich zurückführen auf die latente Enthalpie, welche beim Verflüssigen des aufgenommenen Wasserdampfes in den Baustoffporen frei wird.

Abbildung 73 Simulationsergebnisse für die Variante 2a bei der Erwärmung der eingefrästen Luftschicht mit 47 Watt pro m² Elementfläche für eine Dauer von 60 Minuten (von t = 0 h bis t = 1 h). Das aus dem Innenraum (rechts) anliegende Klima war mit 23 °C und 50 % konstant.

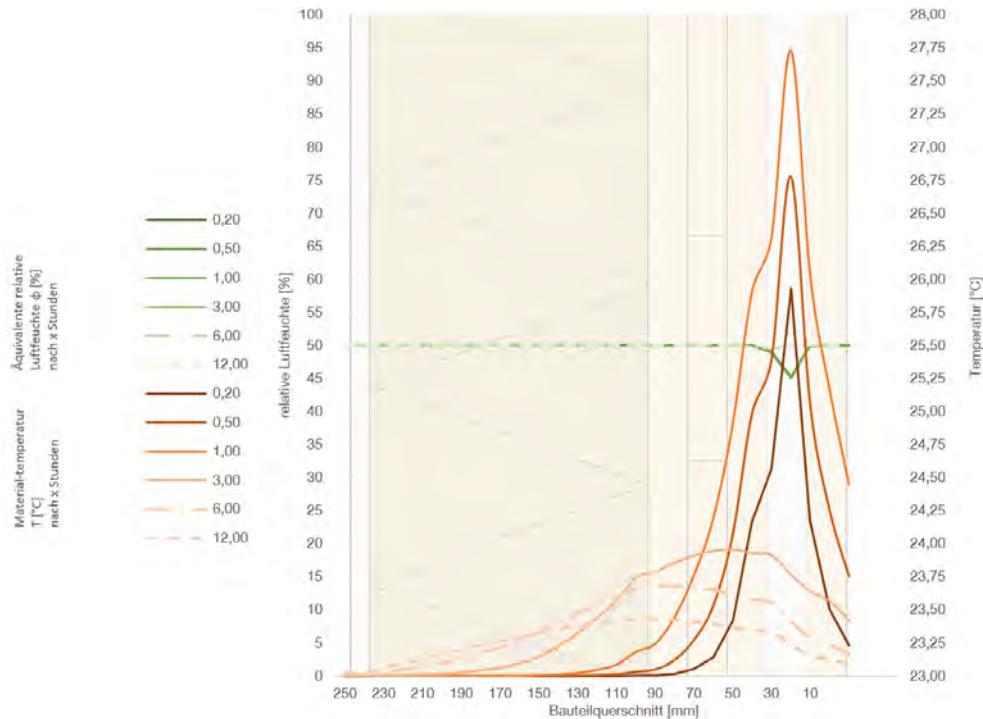


Abbildung 74 Simulationsergebnisse für die Variante 2a bei der Erwärmung der eingefrästen Luftschicht mit 47 Watt pro m² Elementfläche für eine Dauer von 60 Minuten (von t = 0 h bis t = 1 h), kombiniert mit einem einmaligen Feuchtesprung im Innenraum (rechts) von 50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte zum Zeitpunkt t = 0 h.

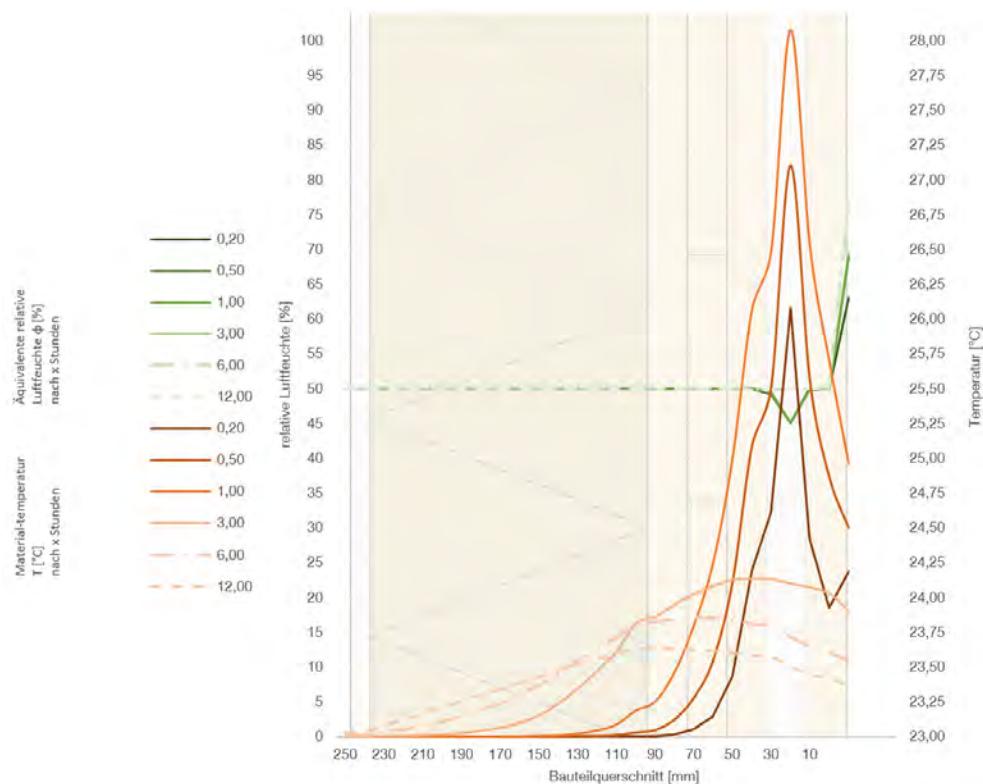


Abbildung 73 + Abbildung 74: eigene Darstellungen (Flexeder)

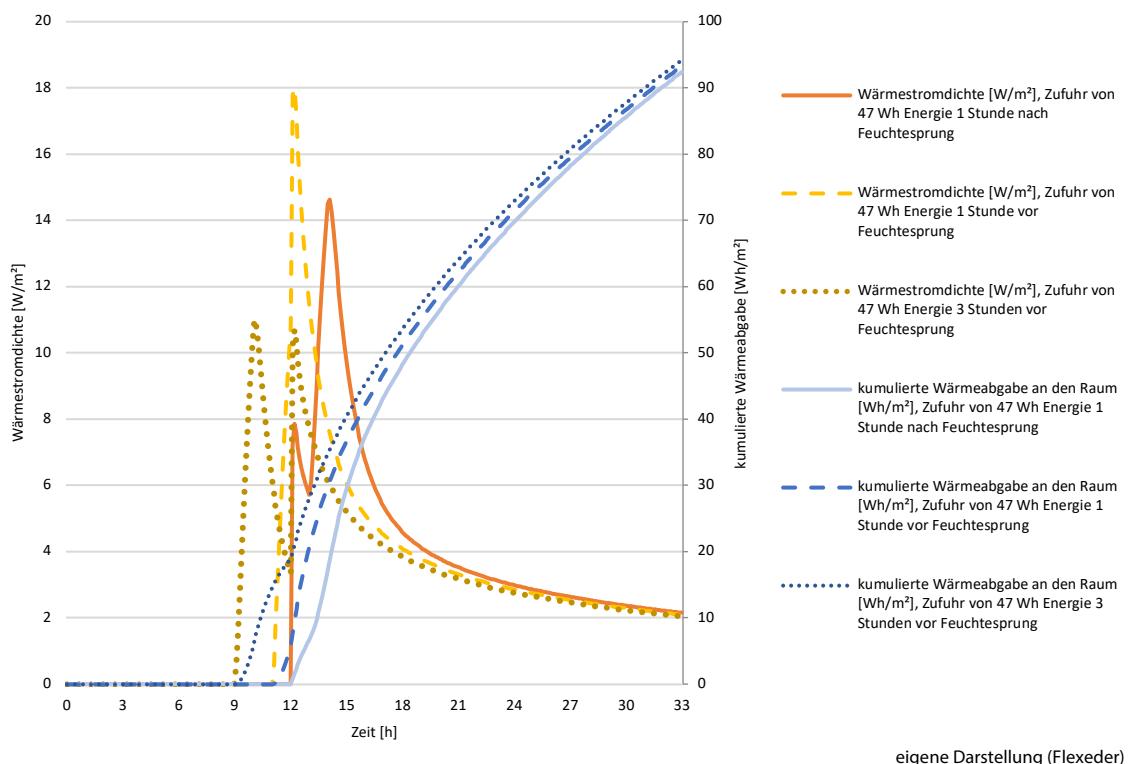
Ansätze zur Entwicklung einer hygrothermischen Regelungsstrategie des TAMs

Die vorangegangene Variantenstudie hat gezeigt, dass durch die Materialwahl der innenseitigen Beplankung empfindlich beeinflusst werden kann, welches Temperaturmaximum durch den hygrothermischen Effekt erzielt wird. Auch das Zusammenspiel von thermischer Aktivierung im Luftkanal und Einflüsse durch Luftfeuchtesprünge im Innenraum bestimmen, wie schnell sich die raumseitige Deckschicht des TAMs erwärmt.

Je nach den Anforderungen der Raumnutzung kann es wünschenswert sein, dass sich die Wandheizung vergleichsweise schnell aufheizt oder aber langsamer und dafür die Wärme über einen längeren Zeitraum gleichmäßig an den Raum abgibt. Zur Untersuchung des Einflusses von Zeitabständen auf die resultierende Wärmestromdichte wird anhand von Variante 2a ein weiterer generischer Vergleich in Abbildung 75 dargestellt. Zur Quantifizierung der Effekte werden die berechneten Wärmestromdichten [W/m^2] an der raumseitigen Oberfläche und die über die Zeit aufsummierte Wärmeabgabe an den Innenraum [Wh/m^2] über die Zeit aufgetragen. Es werden dabei drei Lastfälle mit unterschiedlichen Zeitpunkten für die einstündige thermische Aktivierung unterschieden, vgl. Abbildung 75:

- Beim ersten Fall (als glatte Linie dargestellt) erfolgt zunächst ein Feuchtesprung ($t = 12 \text{ h}$) und eine Stunde später wird die Luftsicht für eine weitere Stunde lang erwärmt (+ 47 Wh für $t = 13 \text{ h}$ bis $t = 14 \text{ h}$).
- Der zweite Fall (gestrichelt dargestellt) entspricht einer thermischen Aktivierung (+ 47 Wh für $t = 11 \text{ h}$ bis $t = 12 \text{ h}$), welche mit einem zusätzlichen Feuchtesprung endet ($t = 12 \text{ h}$).
- Für den dritten Fall (gepunktet dargestellt) wird die thermische Aktivierung bereits drei Stunden ($t = 9 \text{ h}$ bis $t = 10 \text{ h}$) vor der schlagartigen Befeuchtung ($t = 12 \text{ h}$) gestartet.

Abbildung 75 Vergleich Wärmestromdichten und Gesamtenergieabgabe anhand Variante 2 a. Zufuhr von 47 Wh zu verschiedenen Zeitpunkten vor oder nach Feuchtesprung



eigene Darstellung (Flexeder)

Der Vergleich der verschiedenen Lastkurven zeigt, dass mit einem bewusst gewählten Zeitpunkt der Energiezufuhr die Leistungsverteilung empfindlich beeinflusst werden kann. Generell lässt sich aus der generischen Simulationsstudie anhand Variante 2a ableiten, dass die Steuerung in Abhängigkeit der Raumluftfeuchteänderung die Wärmeabgabe der Wandheizung beschleunigen oder verzögern (ergo noch trüger machen) kann.

Die kumulierte Energieabgabe an den Raum gesamt bleibt dabei am Ende bilanziell stets dieselbe, wobei im gewählten Beispiel nach 24 Stunden rund 58 Wh/m^2 aus dem Enthalpieeffekt infolge eines Luftfeuchtesprungs von 50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte und rund 37 Wh/m^2 aus der einmaligen Erwärmung der Luftsicht (mit 47 Wh/m^2) resultieren. Die Differenz von rund 10 Wh/m^2 folgt aus der Tatsache, dass der Wärmetransport aus der Luftsicht stets in alle Richtungen erfolgt und durch das jeweilige Temperaturgefälle getrieben wird. Aus dieser numerischen Untersuchung am Beispiel der Variante 2a lassen sich für die Entwicklung zukünftiger Steuerungen folgende Pauschalwerte als Orientierungshilfe rückschließen:

Tabelle 11 Berechnete Pauschalwerte für eine optimierte Konditionierung

| Ziel: Temperatur an der Bauteiloberfläche | thermische Behandlung der Luftsicht | Wechsel der Raumluftfeuchte |
|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Maximales, schlagartiges Hoch zum Zeitpunkt x | Start der Erwärmung: x – 1 h | Start der Befeuchtung: x – 0,2 h |
| Möglichst gleichmäßiges, langes Plateau der Erwärmung ab Zeitpunkt x | Start der Erwärmung: x – 0,5 h | Start der Befeuchtung: x + 2 h |
| Maximales, schlagartiges Tief zum Zeitpunkt x | Start der Abkühlung: x – 1 h | Start der Entfeuchtung: x – 0,2 h |
| Möglichst gleichmäßiges, langes Plateau der Abkühlung ab Zeitpunkt x | Start der Abkühlung: x – 0,5 h | Start der Entfeuchtung: x + 2 h |

eigene Darstellung (Flexeder)

Die in Tabelle 11 benannten Pauschalwerte sind stark abhängig von den tatsächlichen klimatischen Gegebenheiten wie graduellen Änderungen der relativen Luftfeuchte sowie der verwendeten Heizbeziehungsweise Kühlleistung. Des Weiteren wurden in den bisher diskutierten Beispielen und Varianten die klimatischen Außenbedingungen stets vernachlässigt, um eine klare Darstellung der Effekte zu ermöglichen. Diese Einflüsse können allerdings maßgebend sein, siehe hierzu auch die Messergebnisse in Kapitel V.

Zur Weiterentwicklung wird empfohlen, die vorgeschlagenen Pauschalwerte in einer instationären hygrothermischen Simulationsstudie auf Raumlevel mit standardisierten Feuchteprofilen weiter zu entwickeln.

Anwendung einer realistischen Bauteilsimulation

Valentin Übelhör, Christian Hepf

Eine der Herausforderungen beim Holzhausbaus, verglichen mit einer Stahlbetonbauweise kann, bei fehlender Masse, der sommerliche Wärmeschutz sein. Durch die geringere (thermische) Masse des Holzes heizt sich ein solches Bauteil und folglich auch der Innenraum deutlich schneller auf. Die Simulation in diesem Kapitel soll zeigen, wie man dieses Defizit potentiell minimieren kann. Hierfür wird zuerst eine thermische und anschließend eine hygrothermische Gebäudesimulation mit rein thermischer Konditionierung untersucht und verglichen. Anschließend sollen durch eine gezielte hygrische Konditionierung die Potentiale des sommerlichen Wärmeschutzes näher untersucht werden.

Dabei werden folgende Forschungsfragen untersucht werden:

- Verändert sich das thermische Verhalten eines Bauteils / Raums bei einer hygrothermischen Simulation, verglichen mit einer thermischen Simulation?
- Kann durch das hygrokopische Verhalten eines Bauteils die thermische Behaglichkeit eines Raums gezielt beeinflusst werden? Welche Bauteilaufbauten eignen sich hierfür besonders?

Aufbau des Simulationsmodells

Bei dem Forschungsprojekt PHYTAB sollen grundlegende Potentiale der hygrothermischen Aktivierung von verschiedenen Elementen erforscht werden. Aus diesem Grund orientiert sich der Aufbau des Simulationsmodells stark an dem Versuchsaufbau auf dem Dach der TU München. Dort befindet sich ein Kubus mit einer Grundfläche von 1.2 m² und einem Innenvolumen von 1.2 m³. Dieser ist dem Wetter Münchens exponiert ausgesetzt. (Molter, 2016)

Konstruktionsaufbau des Kubus

Der Kubus bietet die Möglichkeit ein einzelnes Wandelement modular auszuwechseln. Dort werden die verschiedenen untersuchten Wandaufbauten eingefügt. Der Rest des Kubus ist hochdämmend und die nicht betrachteten Oberflächen sind maximal abgedichtet ausgeführt, um die Effekte der untersuchten Bauteile nicht zu beeinflussen. Der hier erreichte U-Wert von $0.125 \frac{W}{m^2K}$ wird durch Vakuumdämmpannels mit einer Dicke von 50 mm, in Verbindung mit einer Holzständerbauweise erreicht. Der Zugang zum Rauminneren ist via eines 3-fach verglasten Fensters mit einem U-Wert von $0.95 \frac{W}{m^2K}$ und einem SHGC (engl. Solar Heat Gain Coefficient) von 0.5 möglich. Der SHGC stellt das Verhältnis zwischen der gesamten Sonnenenergie die auf ein Element strahlt und dem Teil der Energie, welcher durch das Element in das Rauminnere gelangt, dar. Somit wurde einerseits ein hochgedämmtes Fenster gewählt, welches aber andererseits einen Sonneneintrag in den Innenraum zulässt.

Interne Wärme- und Feuchtequellen

Um die erhöhten internen Wärmelasten der elektrischen Geräte (wie im vorherigen Kapitel ausführlich erläutert) darzustellen, wurde eine pauschale Leistung von 40 W angesetzt. Die stellt zunächst eine erhöhte interne Last dar, welcher mit dem Vorhandensein der zahlreichen Messsensoren und Datenloggern sowie der internen Stromversorgung zu begründen ist. Die Raumwärmeverzeugung in der Simulation wird über eine ideelle Heizung mit einem Temperatursollwert von 20 °C operativer Raumtemperatur angelegt.

Um die Auswirkungen der hygrothermischen Effekte auf die sommerliche Bauteilaufheizung untersuchen zu können, wurde eine Nachtkühlung implementiert. Diese gewährleistet, dass die Raumbedingungen jeden Tag vom gleichen Ausgangspunkt starten. Dasselbe Prinzip wurde auch bei den Messungen auf der Solarstation angewendet. Dadurch können jeden Tag die Auswirkungen der unterschiedlichen Wetterbedingungen auf das Bauteilverhalten isoliert betrachtet werden. Durch die hohen internen Wärmelasten der Messgeräte war eine reine Nachtlüftung nicht ausreichend, um den Temperatursollwert von 22 °C zu erreichen. Aus diesem Grund wurde eine nächtliche ideelle Kühlung mit dem Zeitplan „RH_Shift_Week“ implementiert. Als Luftfiltration wird ein Luftwechsel von $1 \frac{1}{h}$ angesetzt. Eine Fensterlüftung und Wärmequellen durch

Menschen im Raum wurden nicht abgebildet, da der Kubus nicht groß genug ist und der Fokus der Analysen auf den Bauteileigenschaften liegt.

Simulationsvarianten

Die Simulationsvarianten basieren auf den unterschiedlichen Bauteilaufbauten der dynamischen Messungen. Diese umfassen zwei Brettsperrholzvarianten (BSP) und vier Holzrahmenleichtbauvarianten (HRLB). Die beiden BSP Elemente unterscheiden sich in ihrer Oberfläche. Während das BSP_01 Element in Sichtholzbauweise ausgeführt ist, wird das BSP_03 Element mit einer 3 cm dicken Lehmschicht ergänzt. Die HRLB Elemente unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Innenoberfläche: HRLB_01 hat eine Gipskartonplatte, HRLB_03 eine 12 mm dicke Lehmschicht, HRLB_04 und HRLB_05 haben beide jeweils eine 32 mm dicke Lehmschicht. HRLB_05 unterscheidet sich von den anderen Bauteilen durch seine Schlankheit. Statt einer 14 cm dicken Holzständerschicht, sind es hier nur 12 cm. Zusätzlich wird auf die Innenbeplankung durch eine OSB Platte verzichtet. Da der Fokus auf dem hygrischen Verhalten liegt, wurden die Bauteilaufbauten so entwickelt, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten und somit folglich die U-Werte möglichst identisch sind. Bei den BSP Varianten wird dabei ein U-Wert um $0.24 \frac{W}{m^2K}$ angestrebt, und beim HRLB von $0.2 \frac{W}{m^2K}$. Dennoch ist hier zu ergänzen, dass natürlich auch die thermische Masse einen wichtigen Einfluss auf den thermischen Komfort hat. Im Nachfolgenden werden die einzelnen Bauteilaufbauten mit ihren Schichten und deren thermischen Eigenschaften aufgezeigt.

Tabelle 12 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils BSP_01 inkl. der Bauteilschichten

| BSP_01 | U-Wert [W/(m ² K)] | | Real. Wärmekapazität [kJ/(m ² K)] | |
|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| | 0.246 | | 129.20 | |
| Schichtname | Dicke [m] | Dichte [kg/m ³] | Massenbelegung [kg/m ²] | Spez. Wärmekapazität [kJ/(kgK)] |
| Mineral. Oberputz | 0.003 | 1300 | 3.9 | 0.85 |
| Grundspachtelung | 0.007 | 1600 | 11.2 | 0.85 |
| Holzfaserdämmung | 0.14 | 140 | 19.6 | 2.1 |
| Brettsperrholz | 0.1 | 470 | 47 | 1.6 |
| Gesamt | 0.25 | 326.8 | 81.70 | 1.58 |

Tabelle 13 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils BSP_03 inkl. der Bauteilschichten

| BSP_03 | U-Wert [W/(m ² K)] | | Real. Wärmekapazität [kJ/(m ² K)] | |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| | 0.235 | | 159,67 | |
| Schichtname | Dicke [m] | Dichte [kg/m ³] | Massenbelegung [kg/m ²] | Spez. Wärmekapazität [kJ/(kgK)] |
| Mineral. Oberputz | 0.003 | 1300 | 3.9 | 0.85 |
| Grundspachtelung | 0.007 | 1600 | 11.2 | 0.85 |
| Holzfaserdämmung | 0.14 | 140 | 19.6 | 2.1 |
| Brettsperrholz | 0.1 | 470 | 47 | 1.6 |
| Schwere Lehmbauplatte | 0.025 | 700 | 17.5 | 1.1 |
| Lehmoberputz | 0.003 | 1800 | 5.4 | 1.25 |
| Lehmdesignputz | 0.002 | 1790 | 3.58 | 1.25 |
| Gesamt | 0.28 | 386.36 | 108.18 | 1.48 |

Tabelle 14 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_01 inkl. der Bauteilschichten

| HRLB_01 | U-Wert [W/(m ² K)] | | Real. Wärmekapazität [kJ/(m ² K)] | |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| | 0.235 | | 159,67 | |
| Schichtname | Dicke [m] | Dichte [kg/m ³] | Massenbelegung [kg/m ²] | Spez. Wärmekapazität [kJ/(kgK)] |
| Mineral. Oberputz | 0.003 | 1300 | 3.9 | 0.85 |
| Grundspachtelung | 0.007 | 1600 | 11.2 | 0.85 |
| Holzfaser-Dämmplatte | 0.04 | 180 | 7.2 | 2.1 |
| Holzrahmen Dämmung Kombination | & 0.14 | 86.45 | 7.2 | 2.04 |
| OSB-Platte | 0.015 | 595 | 8.925 | 1.4 |
| Gipskartonplatte | 0.0152 | 1009 | 12.6125 | 0.85 |
| Gesamt | 0.22 | 295.73 | 55.94 | 1.36 |

Tabelle 15 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_03 inkl. der Bauteilschichten

| HRLB_03 | U-Wert [W/(m ² K)] | | Real. Wärmekapazität [kJ/(m ² K)] | |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| | 0.191 | | 102.96 | |
| Schichtname | Dicke [m] | Dichte [kg/m ³] | Massenbelegung [kg/m ²] | Spez. Wärmekapazität [kJ/(kgK)] |
| Mineral. Oberputz | 0.003 | 1300 | 3.9 | 0.85 |
| Grundspachtelung | 0.007 | 1600 | 11.2 | 0.85 |
| Holzfaser-Dämmplatte | 0.04 | 180 | 7.2 | 2.1 |
| Holzrahmen Dämmung Kombination | & 0.14 | 86.45 | 12.1 | 2.04 |
| OSB-Platte | 0.015 | 595 | 8.925 | 1.4 |
| druckfeste Holzfaserplatte | 0.02 | 259 | 5.18 | 2.1 |
| Lehmoberputz | 0.01 | 1800 | 18 | 1.25 |
| Lehmdesignputz | 0.002 | 1790 | 3.58 | 1.25 |
| Gesamt | 0.24 | 295.73 | 70.09 | 1.47 |

Tabelle 16 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_04 inkl. der Bauteilschichten

| HRLB_04 | U-Wert [W/(m ² K)] | | Real. Wärmekapazität [kJ/(m ² K)] | |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| | 0.191 | | 147.96 | |
| Schichtname | Dicke [m] | Dichte [kg/m ³] | Massenbelegung [kg/m ²] | Spez. Wärmekapazität [kJ/(kgK)] |
| Mineral. Oberputz | 0.003 | 1300 | 3.9 | 0.85 |
| Grundspachtelung | 0.007 | 1600 | 11.2 | 0.85 |
| Holzfaser-Dämmplatte | 0.04 | 180 | 7.2 | 2.1 |
| Holzrahmen Dämmung Kombination | & 0.14 | 86.45 | 12.1 | 2.04 |
| OSB-Platte | 0.015 | 595 | 8.925 | 1.4 |
| druckfeste Holzfaserplatte | 0.02 | 259 | 5.18 | 2.1 |
| Lehmoberputz | 0.03 | 1800 | 54 | 1.25 |
| Lehmdesignputz | 0.002 | 1790 | 3.58 | 1.25 |
| Gesamt | 0.26 | 412.79 | 106.09 | 1.39 |

Tabelle 17 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_05 inkl. der Bauteilschichten

| HRLB_05 | U-Wert [W/(m ² K)] | | Real. Wärmekapazität [kJ/(m ² K)] | |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| | 0.2 | | 131,94 | |
| Schichtname | Dicke [m] | Dichte [kg/m ³] | Massenbelegung [kg/m ²] | Spez. Wärmekapazität [kJ/(kgK)] |
| Mineral. Oberputz | 0.003 | 1300 | 3.9 | 0.85 |
| Grundspachtelung | 0.007 | 1600 | 11.2 | 0.85 |
| Holzfaser-Dämmplatte | 0.04 | 180 | 7.2 | 2.1 |
| Holzrahmen Dämmung Kombination | & 0.12 | 86.45 | 10.37 | 2.04 |
| druckfeste Holzfaserplatte | 0.02 | 259 | 5.18 | 2.1 |
| Lehmoberputz | 0.03 | 1800 | 54 | 1.25 |
| Lehmdesignputz | 0.002 | 1790 | 3.58 | 1.25 |
| Gesamt | 0.22 | 429.88 | 95.43 | 1.38 |

Methodischer Vergleich der Simulationsvarianten aus Brettsperrenholz und Holzrahmenleichtbau

Das Prinzip der Nutzung des hygrothermischen Potentials ist konzeptionell vergleichbar mit dem von Phase-Change Material (PCM). Die durch den Phasenwechsel einer Substanz im Bauteil – bei PCM meist fest-flüssig – freigesetzte latente Energie verzögert oder verhindert die unkomfortable Wärmeübertragung an den Innenraum durch eine langsamere/ träge Erhitzung des Bauteils. Der einzige Unterschied hierbei ist, dass im Falle des PCM die relevante Substanz im Bauteil gebunden ist. Im Fall der hygrothermischen Aktivierung durch die Verdunstung/ Kondensation von Wasserdampf, passiert findet statt aber in Folge von Konvektion auch ein Massenstrom (von Wasser) aus dem Bauteil hinaus/ in das Bauteil hinein. Deswegen reicht hier keine rein thermische Konditionierung des PCM, sondern muss Hand in Hand mit einer Be-/Entfeuchtung (hygrischen Konditionierung) des Bauteils gehen.

Im ersten Schritt der Simulation wird untersucht, wie sich relevante raumklimatische Parameter verändern, wenn das auswechselbare Bauteil hygrothermisch statt thermisch analysiert wird. Die Randbedingungen der Simulation hierfür wurden im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben. Im zweiten Schritt wird versucht, die hygrothermischen Potentiale des flüssig-gasförmigen Phasenübergangs von luftgebundenem Wasserdampf zu nutzen, um eine sommerliche Überhitzung zu verzögern oder gar zu verhindern. Die hierfür getroffenen Maßnahmen wurden im vorangehenden Kapitel erläutert.

Simulationsvarianten - Konditionierung ohne zusätzliche Befeuchtung

Um das maximal mögliche Potential eines Bauteils zu untersuchen, wird die relative Raumluftfeuchte (RH_{Luft}) nachts auf 95 % erhöht (begünstigt Kondensation an Bauteiloberfläche) und tagsüber auf 20 % reduziert. Dies begünstigt die Verdunstung an Bauteiloberfläche und führt folglich zu einer zusätzlichen Kühlung. Dies entspricht in der Realität nicht komfortablen Innenraum Bedingungen, dennoch liegt der Fokus jener Analysen auf den maximalen Potentialen der Bauteile.

Hierbei ist noch zu erwähnt, dass diese Art von latenter Bauteilaktivierung nur Sinn macht – Vorteile durch Lastmanagement außer Acht gelassen – wenn die Aktivierung durch passive Maßnahmen geschieht und der Wärmestrom im Bauteil sich in der betrachteten Periode somit auch umdreht. Sollte sich der Wärmestrom im Bauteil nicht umdrehen (z.B. Winter – Wärmestrom immer nach außen), wäre es ein Nullsummenspiel, da die der Raumluft entnommene Energie (Verdunstung) anschließend wieder zurückgegeben werden würde (Kondensation).

Aus diesem Grund eignet sich das Prinzip der hygrothermischen Aktivierung nur bei einem sommerlichen Klima, welches nächtliche Unterschreitungen der innerlichen Raumtemperatur und tagsüber gegensätzlich eine Überschreitung der Innenraumtemperatur aufweist. Um die simulierten Ergebnisse möglichst anschaulich darzustellen, werden die vier heißesten Tage des Wetterdatenfiles untersucht, um das maximale Potential zu ermitteln: 20. Juli bis 23. Juli 2020

Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse der ersten Variantenstudie sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Abgebildet ist für die rein thermische Simulation und die hygrothermische Simulation (HAMT) je die Außentemperatur, die Innenraumlufttemperatur, die Oberflächentemperatur des variablen Bauteils und die relative Luftfeuchte des Innenraums (RH). Bis auf relative Luftfeuchte sind alle Parameter auf der linken Achse angesiedelt. Die Farb- und Formgebung der Graphen wurde wie folgt angesetzt: Gleiche Parameter haben die gleiche Farbe. Die Werte der thermischen Simulation sind zur Verdeutlichung mit einer gepunkteten Linie dargestellt. Die hygrothermische Simulation (HAMT) ist in einer reinen Line graphisch dargestellt.

Abbildung 76 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BSP_01 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung)

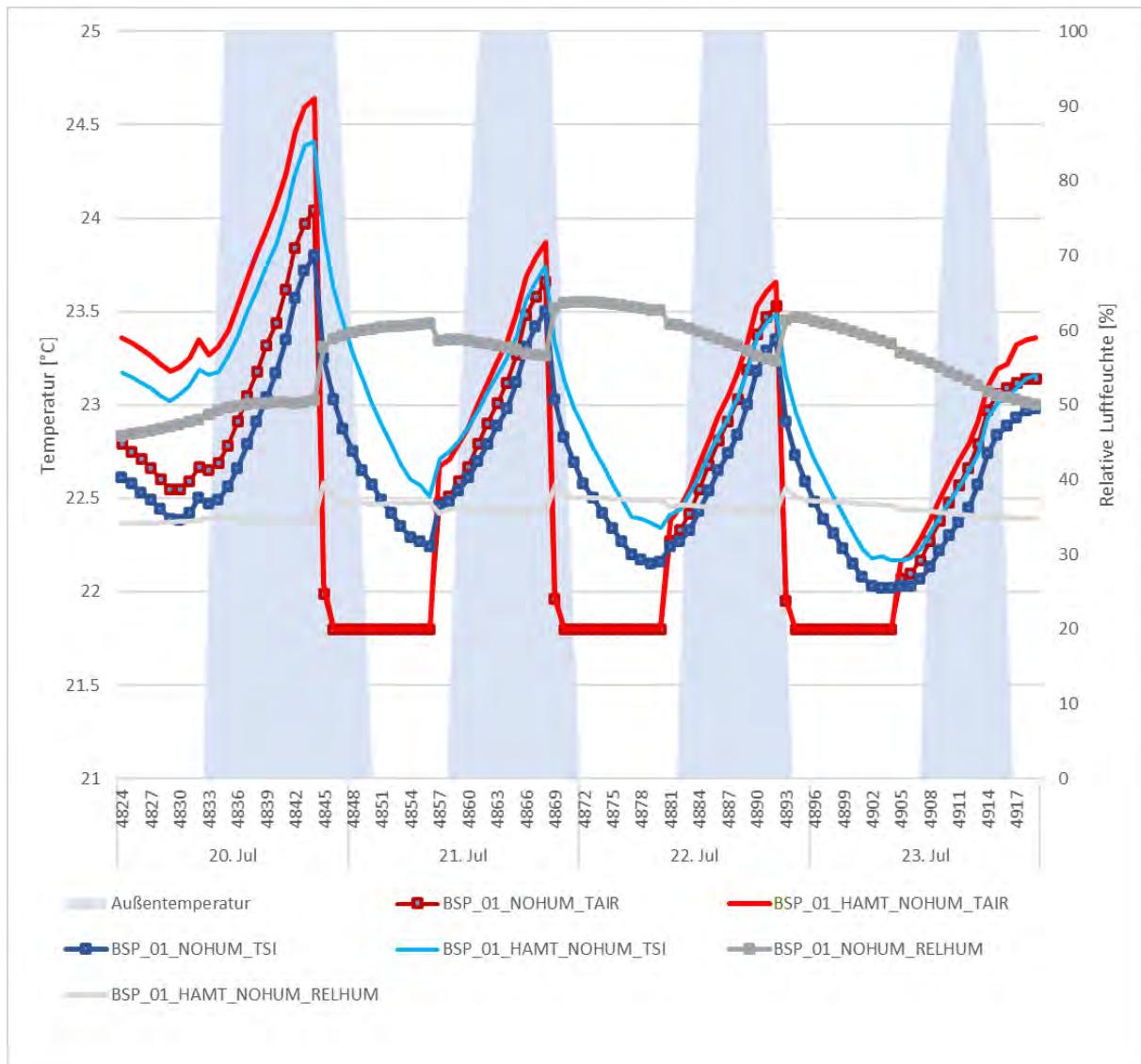


Abbildung 77 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BSP_03 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung)

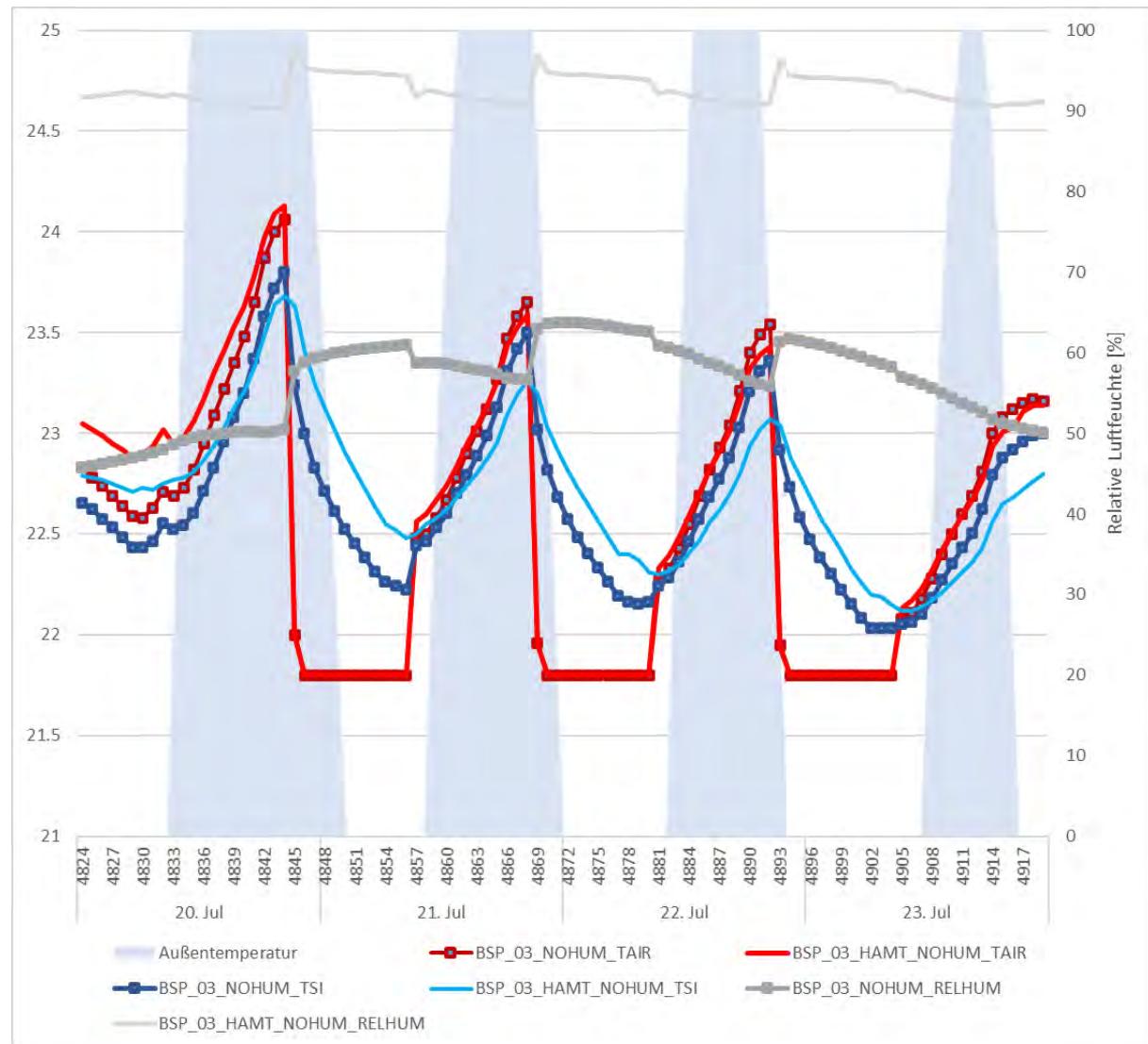


Abbildung 78 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_01 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23. Juli (eigene Darstellung)

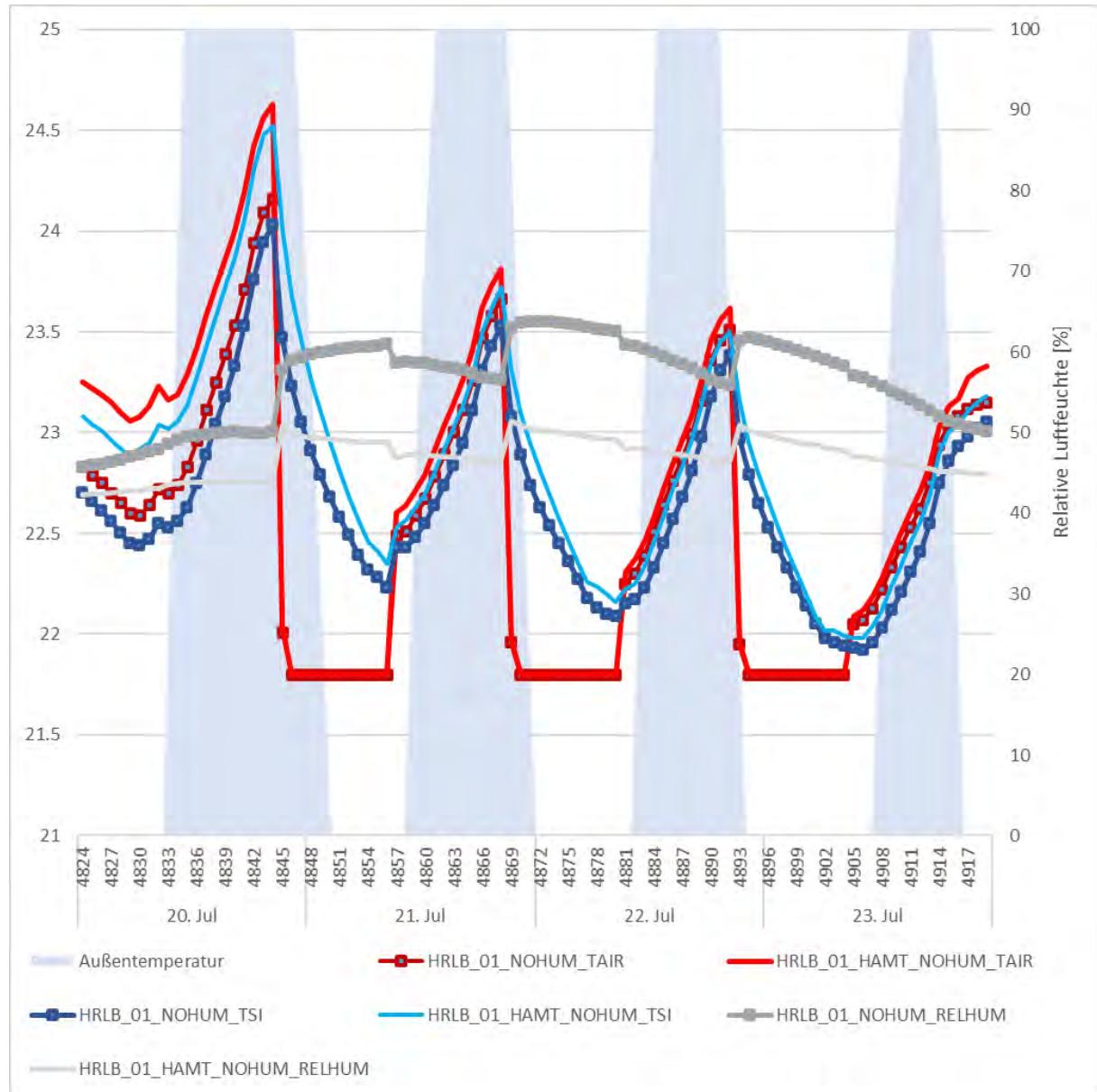


Abbildung 79 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_03 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23. Juli (eigene Darstellung)

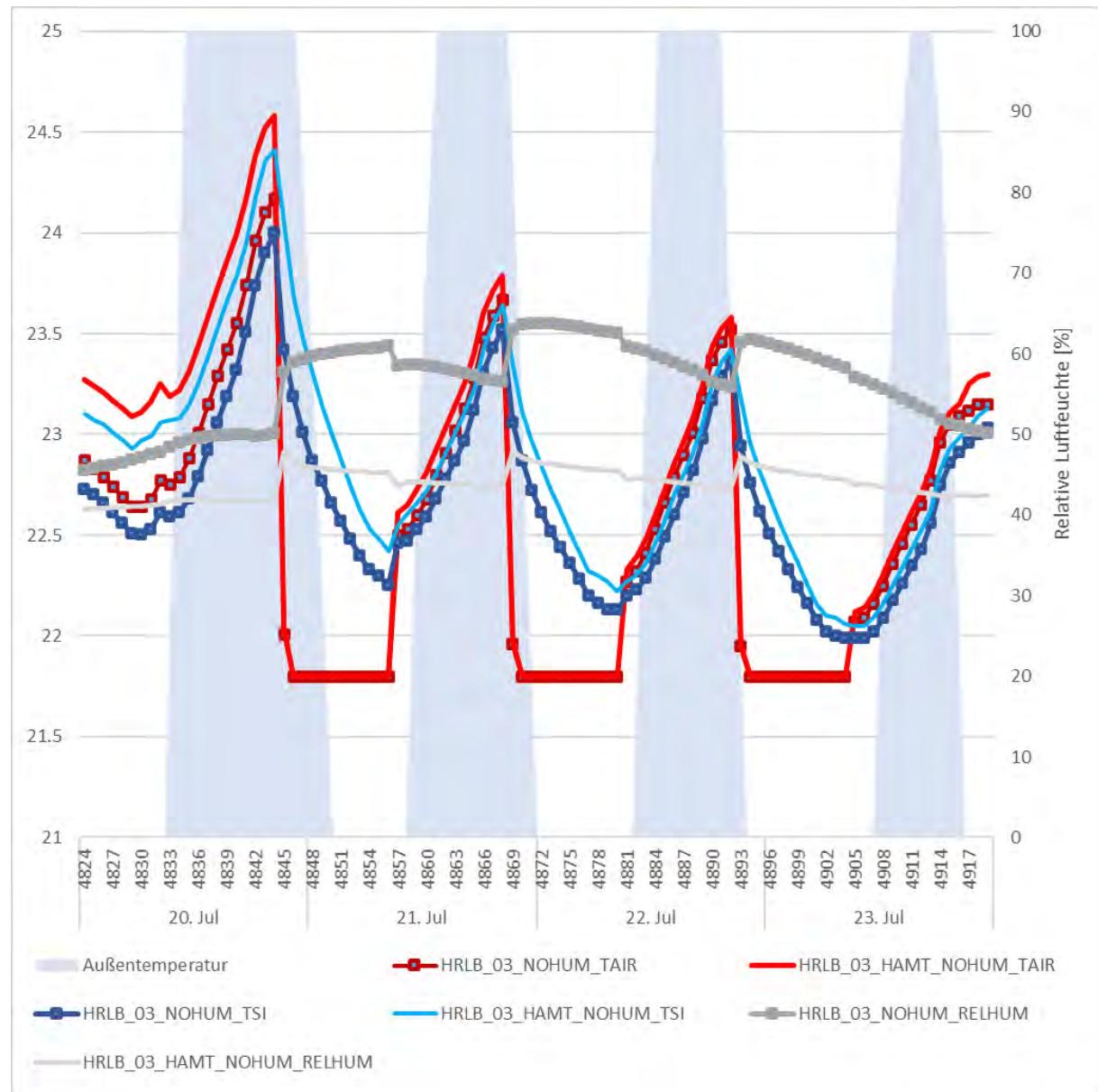


Abbildung 80 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_04 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung)

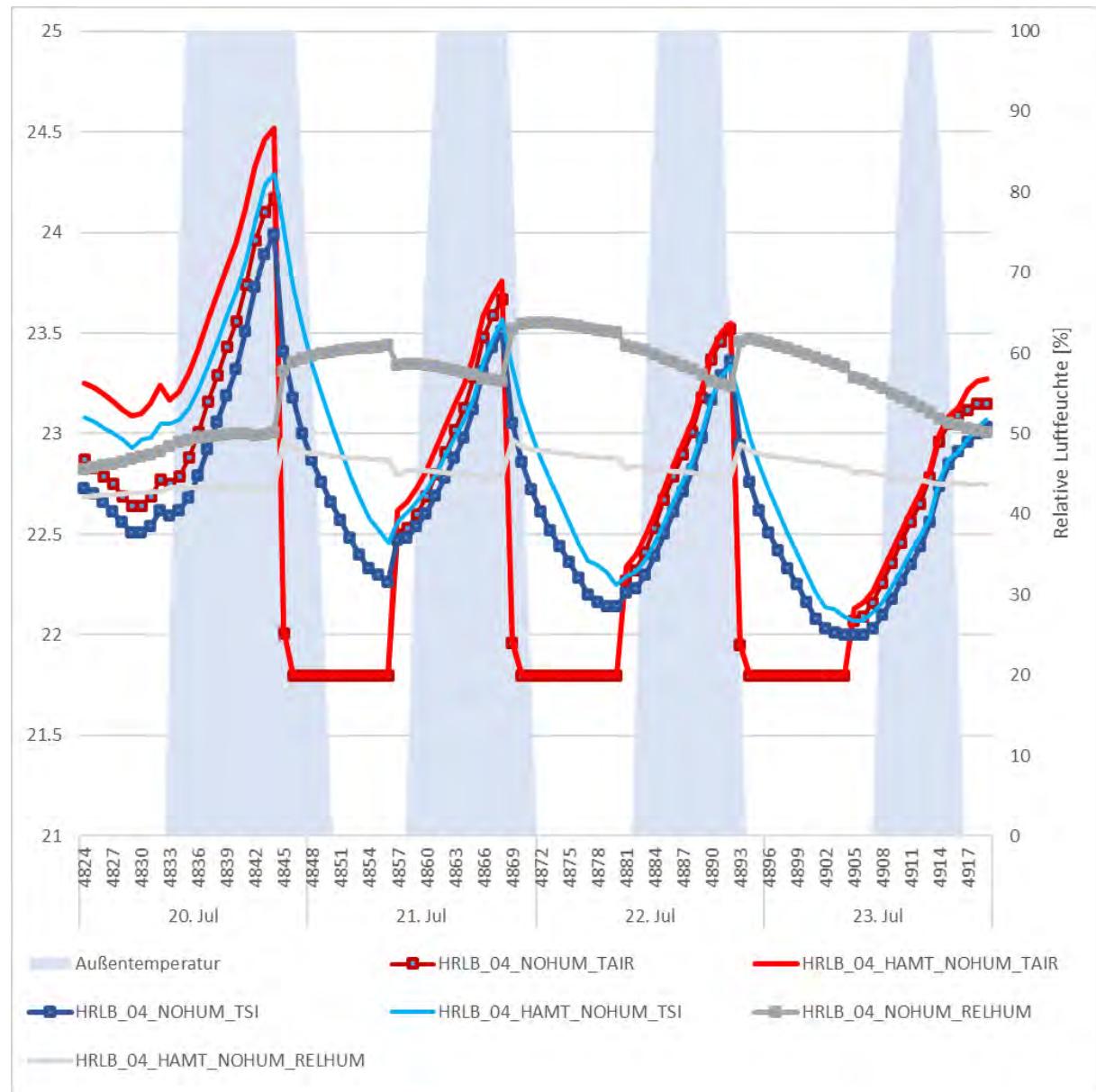
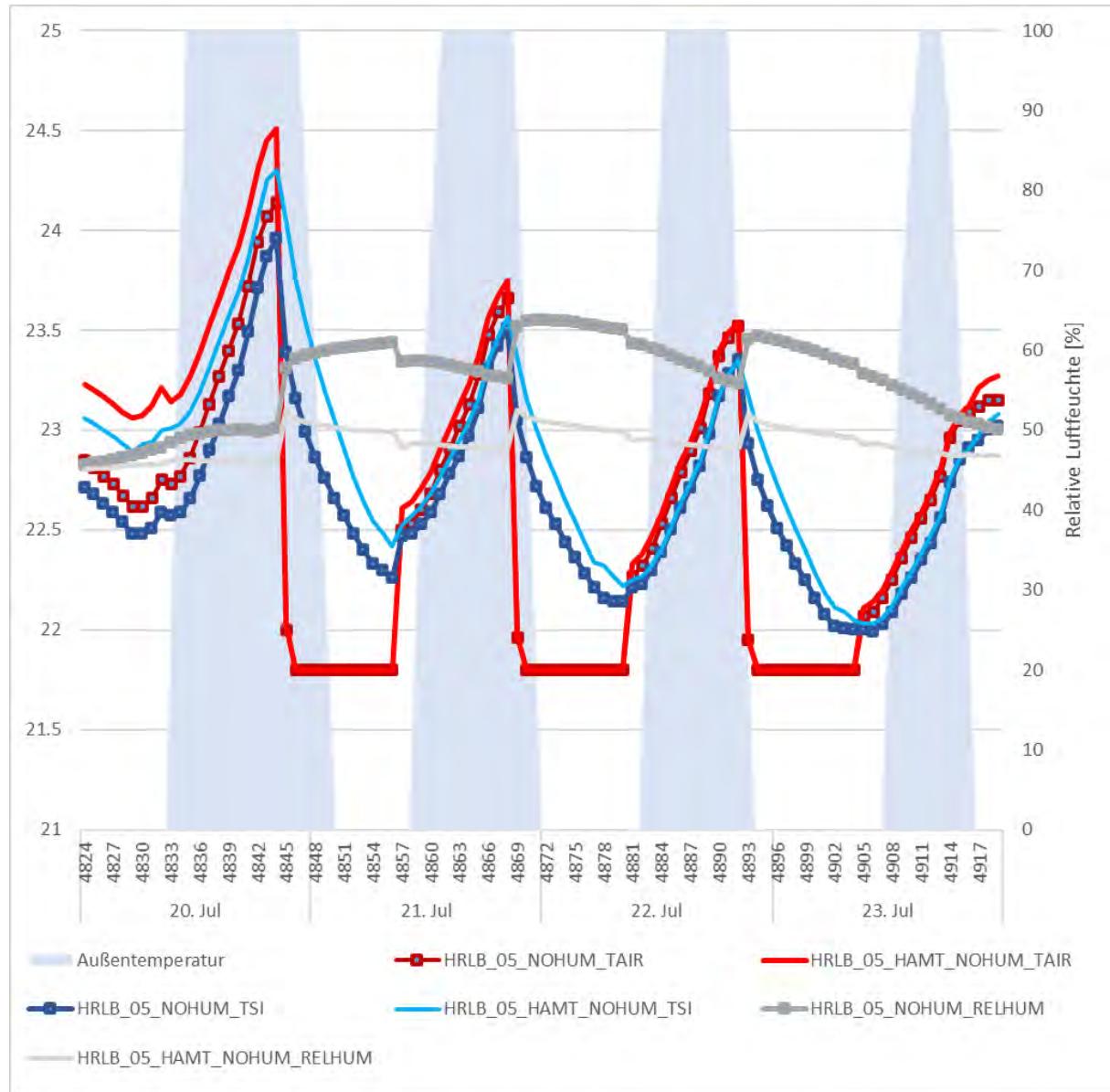


Abbildung 81 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_05 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung)



Analyse

Betrachtet man die Temperaturverläufe der unterschiedlichen Varianten, lässt sich tagsüber der typische Temperaturanstieg beobachten. Um die Temperaturen für den nächsten Tag auf ein vergleichbares Temperaturniveau zurückzusetzen, wird im Zeitraum von 21:00 – 9:00 Uhr gekühlt. Dies ist am nächtlichen Temperaturplateau bei ca. 21.7 °C zu verzeichnen.

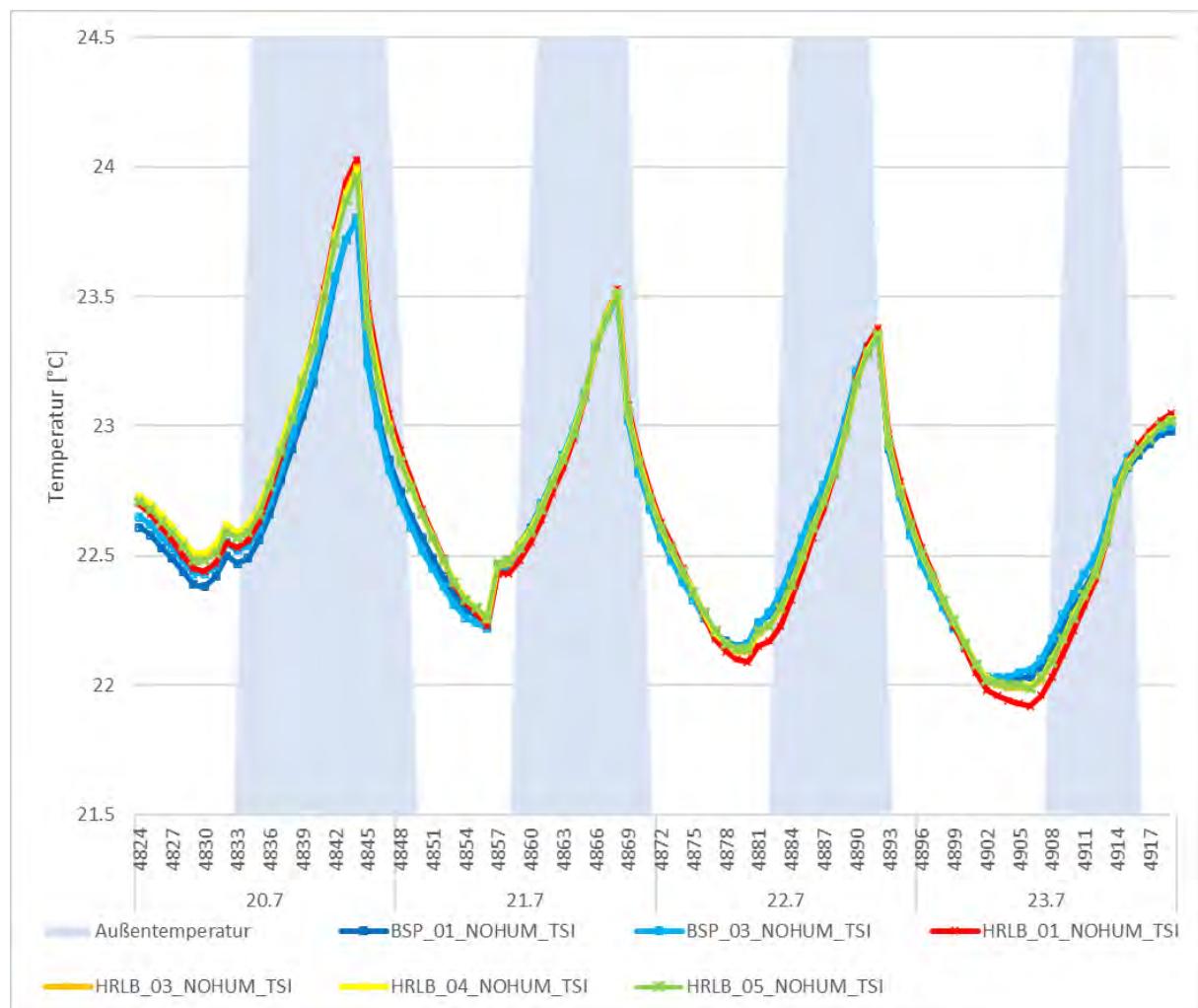
Generell lässt sich feststellen, dass die Temperatur – sowohl der Luft als auch der hygrothermisch simulierten Oberfläche (TSI_S1) – bei der hygrothermischen Simulation stets höher ist als bei der thermischen Simulation. Bei der relativen Luftfeuchte ist es gegenteilig. Da die absolute Feuchte aber in beiden Simulationsarten identisch ist (nicht aus den Grafiken ersichtlich), lässt sich diese Verschiebung durch die unterschiedliche Lufttemperatur erklären: Bei gleichbleibender absoluter Feuchte, resultiert eine Lufttemperaturerhöhung in einer Verringerung der relativen Luftfeuchte.

Auswertung

In dieser Simulationsreihe kam es zu nahezu keinem Feuchte austausch zwischen Raum und Bauteil. Unter der getroffenen Annahme, dass jeglicher Feuchte austausch in Form von Kondensation/ Evaporation stattfindet, muss es sich bei dem beschriebenen Temperaturunterschied (thermische vs. hygrothermische Simulationsvariante) der Oberfläche um einen rein sensiblen Effekt handeln. Eine Möglichkeit hierfür könnte sein, dass sich aufgrund der im Bauteil gespeicherten Feuchte eine höhere Oberflächentemperatur einstellt. Diese stellt sich durch die – verglichen mit einem trockenen Baumaterial - höhere Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Baumaterials ein, wodurch auch der Wärmestrom stärker wird. Bei höheren Außentemperaturen, verglichen mit dem Innenraum würde das in eine höhere Oberflächentemperatur resultieren.

Nachfolgend werden die Oberflächentemperaturen der oben dargestellten Simulationsvarianten getrennt nach thermischer und hygrothermischer Simulationsvariante dargestellt. Betrachtet man die Temperaturverläufe der thermischen Simulation, so sieht man, dass diese nicht signifikant voneinander abweichen.

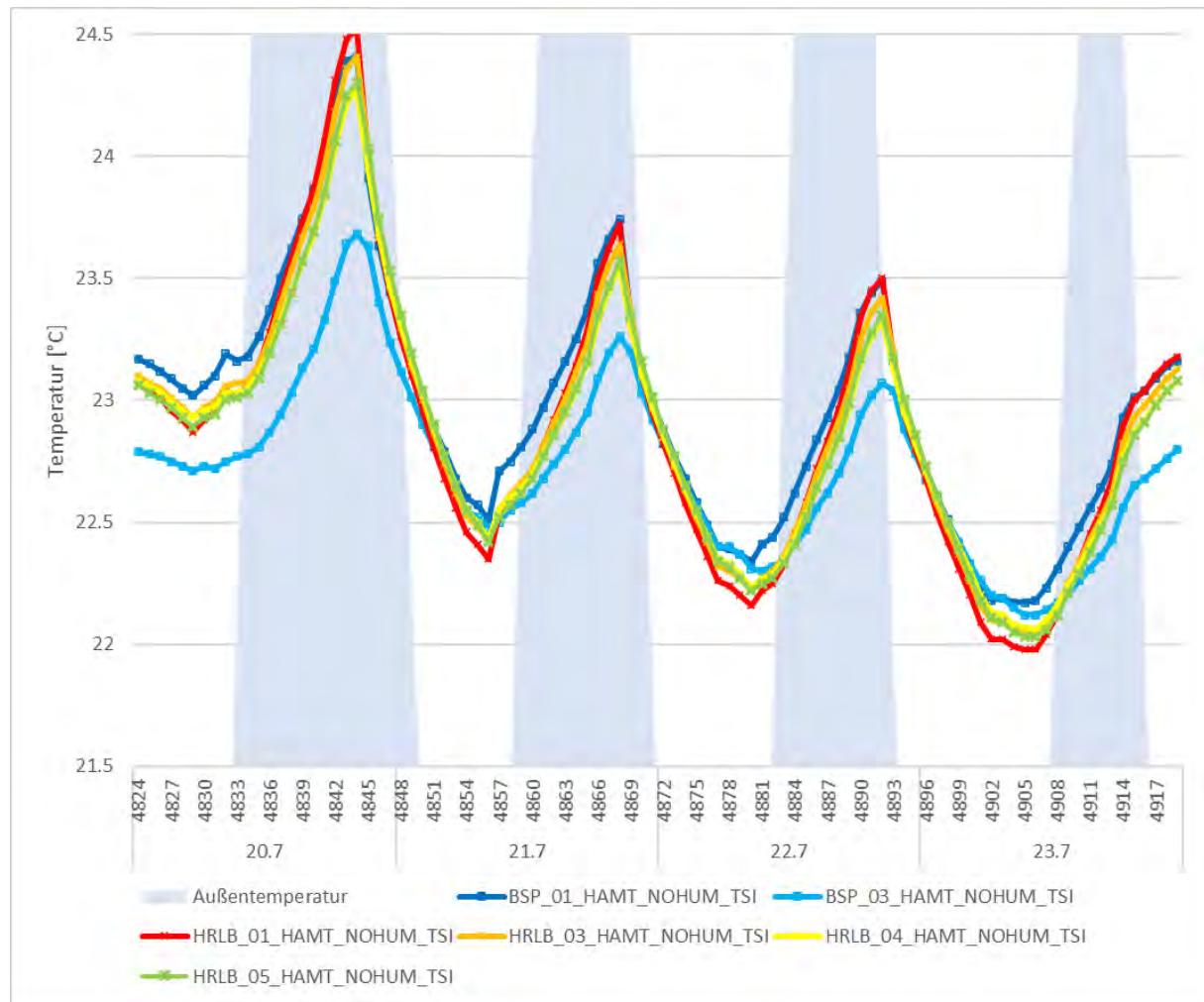
Abbildung 82 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der thermischen Simulation ohne hygrische Konditionierung (eigene Darstellung)



Bei der hygrothermischen Simulation stellt sich, mit Ausnahme der BSP_03 Variante ebenfalls keine signifikante Abweichung der Oberflächentemperaturen der anderen Varianten ein. Da die Abweichung der BSP_03 Variante nur bei der hygrothermischen Simulation zu beobachten ist, muss es sich hierbei um ein hygrisches Phänomen handeln. Da in dieser Simulation aber kein Feuchte austausch zwischen Raum und

Bauteiloberfläche stattfand, muss die Begründung mit einem sensiblen Transportvorgang zu erklären sein. Eine Möglichkeit könnte die aufgrund der Bauteilfeuchte veränderte Wärmeleitfähigkeit sein, welche folglich auch in einer veränderten Oberflächentemperatur resultieren würde. Dies bestätigt also die zunächst die erste der eingangs gestellten Forschungsfrage, dass durch eine hygrothermische Simulation auch die thermische Performance eines Bauteils/Raumes beeinflusst wird. Folglich wird nun analysiert ob dieser Einfluss auch durch gezielte Konditionierung des Raumes auf die thermische Behaglichkeit eines Raumes übertragen werden kann.

Abbildung 83 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation ohne hygrische Konditionierung (eigene Darstellung)



Simulationsvarianten - Konditionierung mit zusätzlicher Befeuchtung

Nun sollen die Potentiale des sommerlichen Wärmeschutzes durch hygrische Aktivierung untersucht werden. Die Idee ist, an der Bauteiloberfläche die Enthalpie des Flüssig-Gasförmig Phasenübergangs zu nutzen um die Erhitzung des Gesamtbauteils zu verzögern und so ein unbehaglich warmes Raumklima bzw. einen erhöhten Kühlbedarf zu verhindern. Der Phasenwechsel von gasförmig zu flüssig (Kondensation) setzt $2257 \frac{kJ}{kg}$ frei, wirkt also wärmend. Beim Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig (Verdunstung) ist es genau gegensätzlich, hier wird die gleiche Energie im Medium aufgenommen und wirkt durch den Wärmeentzug kühlend.

Aus diesem Grund macht es für den sommerlichen Wärmeschutz Sinn, den Verdunstungszeitraum tagsüber anzusetzen. Um diesen Effekt jeden Tag nutzen zu können, wird nachts eine Kondensation auf der Bauteiloberfläche eingestellt. Hier wird zwar ein großer Teil an Wärmeenergie freigesetzt und folglich auch an

den Innenraum abgegeben, da nachts die Innenraumtemperatur aber unterhalb der oberen Komfortgrenze ist, lässt sich diese Temperaturerhöhung ertragen.

Um die gewünschten Effekte zu erreichen, wird im Vergleich zu den vorherigen Simulationen zusätzlich eine hygrische Raumkonditionierung vorgenommen. Nachts wird die relative Raumluftfeuchte auf 95 % konditioniert, um eine Kondensation auf der Bauteiloberfläche zu erreichen. Tagsüber wird sie auf 20 % gehalten, um eine Verdunstung aus dem Bauteil hinaus zu ermöglichen. Bei diesen Maßnahmen wird die Möglichkeit einer energieeffizienten Umsetzung und mögliche organische Wechselwirkungen außer Acht gelassen. Der Fokus hier liegt nur auf der Erforschung der Nutzung der hygrothermischen Potentiale auf Bauteilebene.

Für die Berechnung der hygrothermischen Leistung des Bauteils wurden folgende Formeln verwendet:

| | | |
|---|--|----------|
| $W_{thermisch,i} = \Delta Tsi_{i,i-1} \times c_p \times \delta \times d \times \Delta t_{i,i-1} \times \frac{1}{3.6} [W/m^2]$ | | |
| Oberflächentemperaturdifferenz zwischen Zeitpunkt (i) & (i-1) | $\Delta Tsi_{i,i-1}$ | [°C] |
| Spezifische Wärmekapazität | c_p | [kJ/kgK] |
| Dichte | δ | [kg/m³] |
| Dicke | d | [m] |
| Zeitdifferenz zwischen Zeitpunkt (i) & (i-1) Zeitpunkt (i) & (i-1) | $\Delta t_{i,i-1}$ | [h] |
| Einheitenumrechnung | $\frac{1}{3.6} = 1000 \text{ J/kJ} * \frac{1}{3600} \text{ h/s } [(J*h)/(kJ*s)]$ | |
| $W_{hygrisch,i} = HUMGAIN_i \times \Delta h_v \times \Delta t_{i,i-1} \div A \times \frac{1}{3.6} [W/m^2]$ | | |
| Feuchteaufnahme der Oberfläche zum Zeitpunkt (i) | $HUMGAIN_i$ | [kg/h] |
| Verdampfungsenthalpie | Δh_v | [kJ/kg] |
| Zeitdifferenz zwischen Zeitpunkt (i) & (i-1) Zeitpunkt (i) & (i-1) | $\Delta t_{i,i-1}$ | [h] |
| Fläche | A | [m²] |
| Einheitenumrechnung | $\frac{1}{3.6} = 1000 \text{ J/kJ} * \frac{1}{3600} \text{ h/s } [(J*h)/(kJ*s)]$ | |

Es wurde folgende Annahme getroffen: Die Feuchteaufnahme des Bauteils $HUMGAIN \frac{kg}{h}$ wird zu 100 % in latente Wärme umgewandelt. Das bedeutet, dass keine Diffusion durch das Bauteil entsteht. Diese Vereinfachung muss nicht komplett korrekt sein, da die hieraus ermittelte hygrische Leistung nur für die qualitative Darstellung der Energietransportvorgänge an der Bauteiloberfläche genutzt wird.

Die nachfolgende Darstellung der Simulationsergebnisse ist, bis auf einen zusätzlichen Parameter identisch zu der vorherigen Simulationsreihe. Um die Temperaturverläufe der hygrothermischen Simulation besser zu verstehen, wird auf der rechten Achse die thermische und hygrische Leistung der hygrothermischen aktivierten Oberfläche als gestapelte Fläche dargestellt. Durch diese Darstellung sieht man anschaulich die übertragene Energie durch die farbige Fläche unter der Kurve sowie auch die Leistung repräsentiert durch den absoluten Wert des Graphen zu einem beliebigen Zeitpunkt.

Abbildung 84 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BSP_01 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23. Juli (eigene Darstellung)

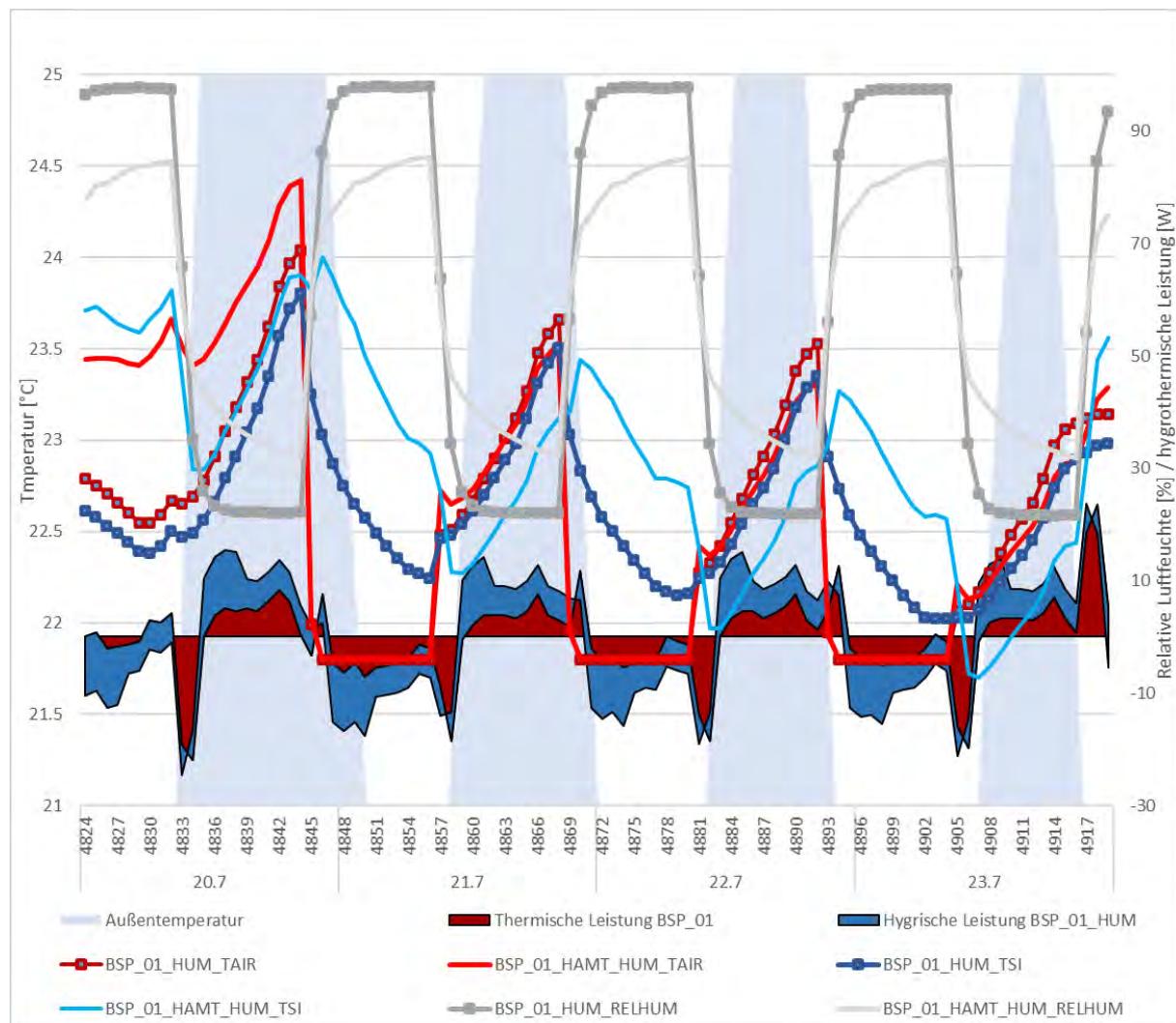


Abbildung 85 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BESP_03 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23. Juli (eigene Darstellung)

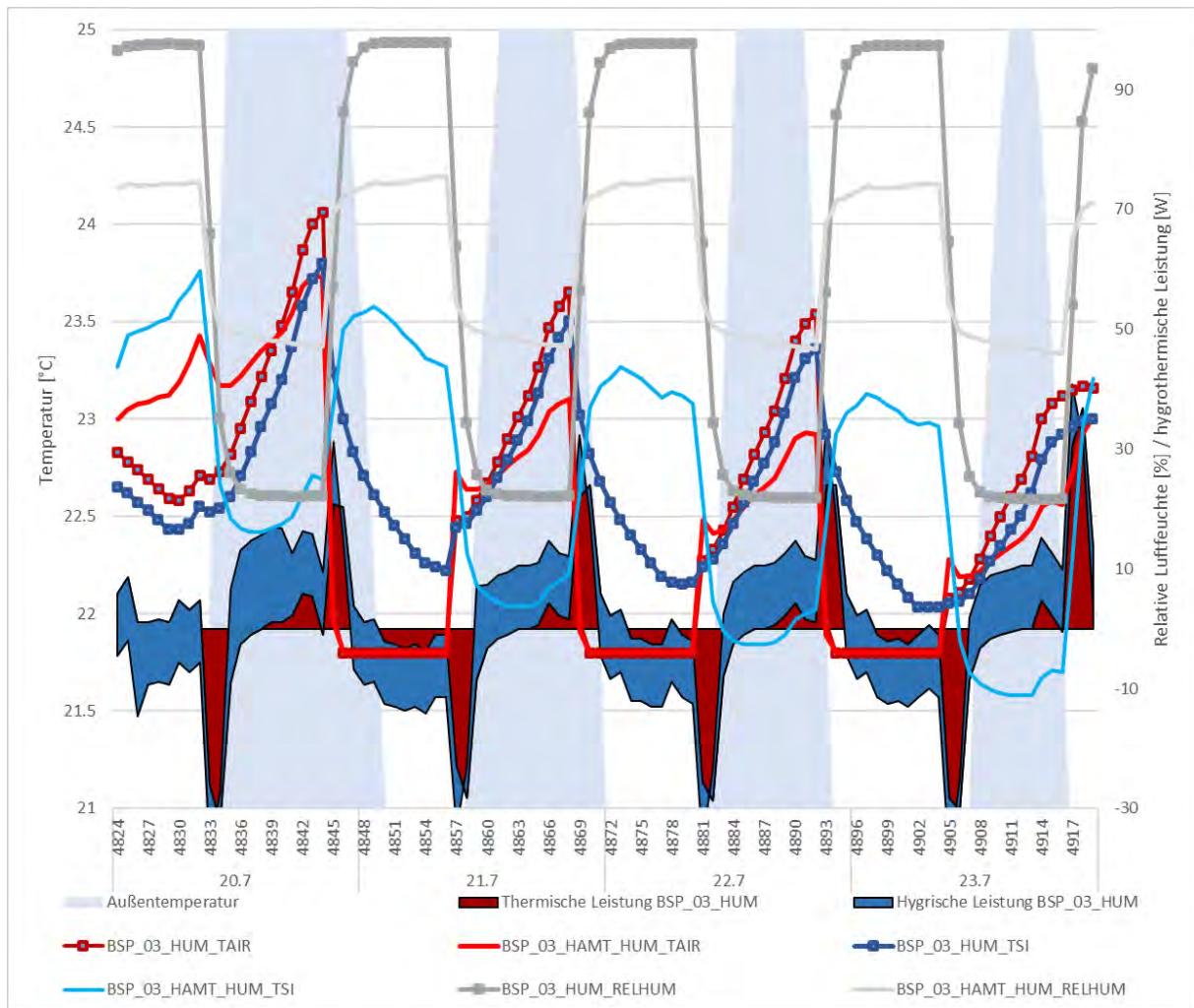


Abbildung 86 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_01 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23. Juli (eigene Darstellung)

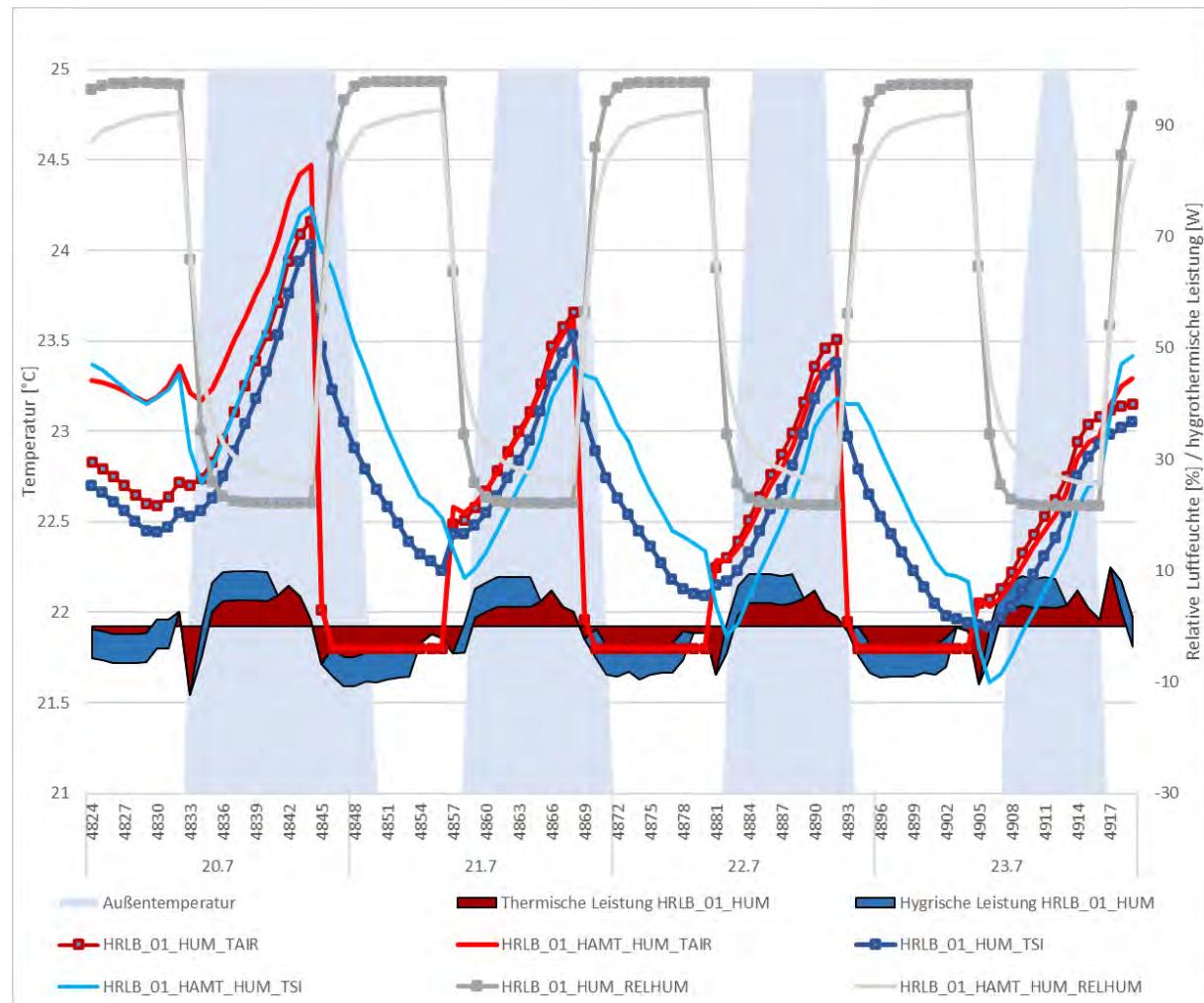


Abbildung 87 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_03 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung)

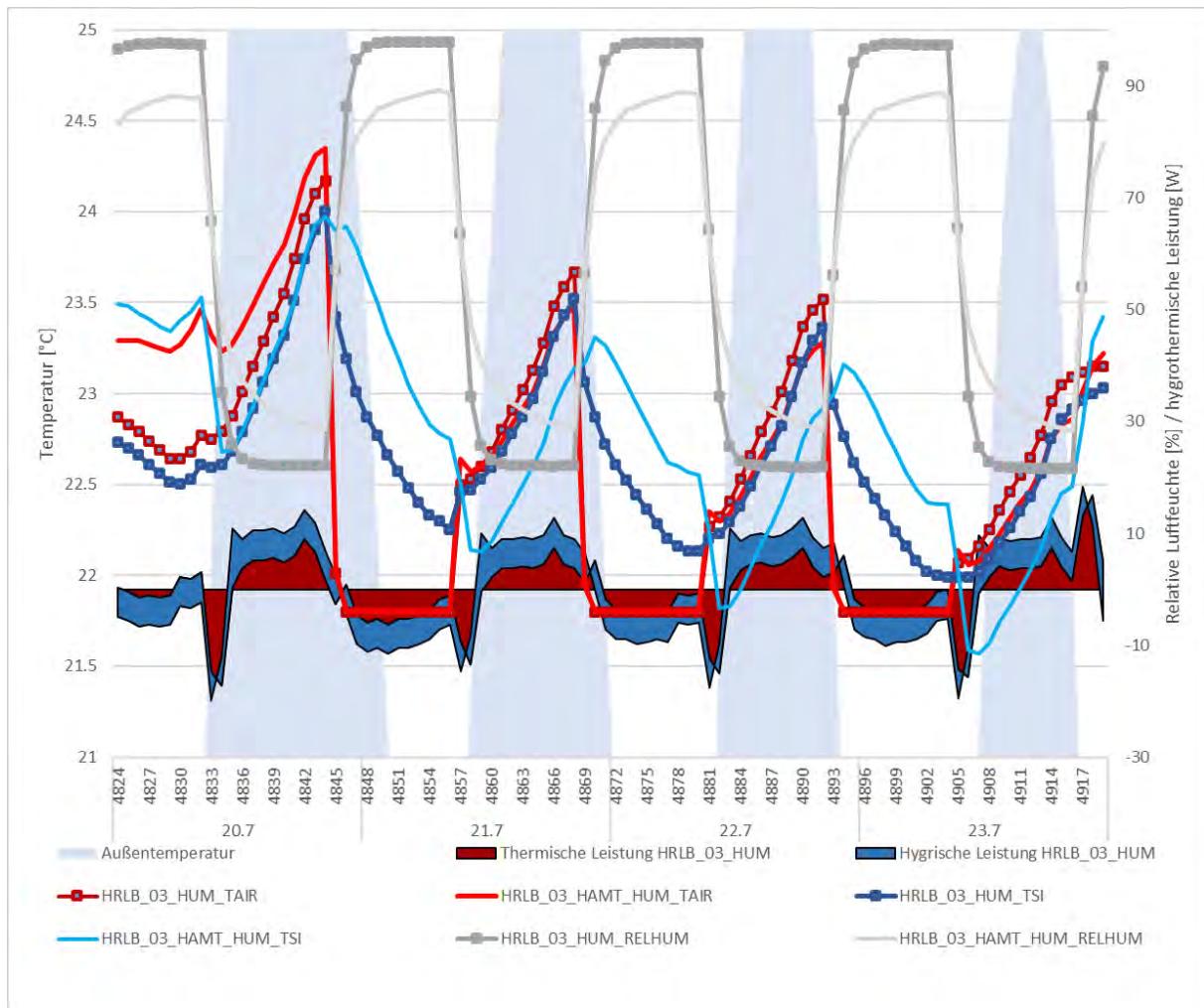


Abbildung 88 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_04 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung)

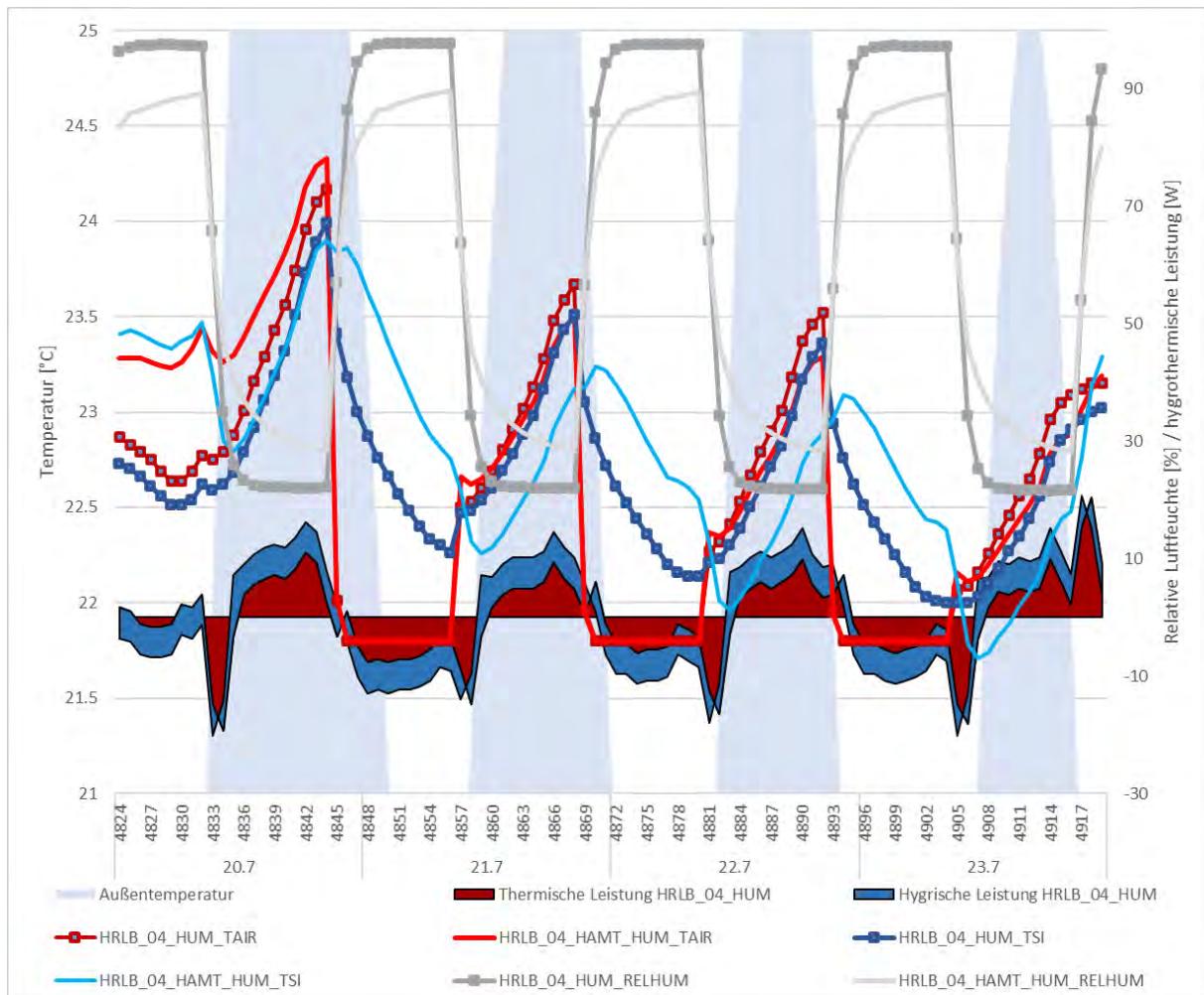
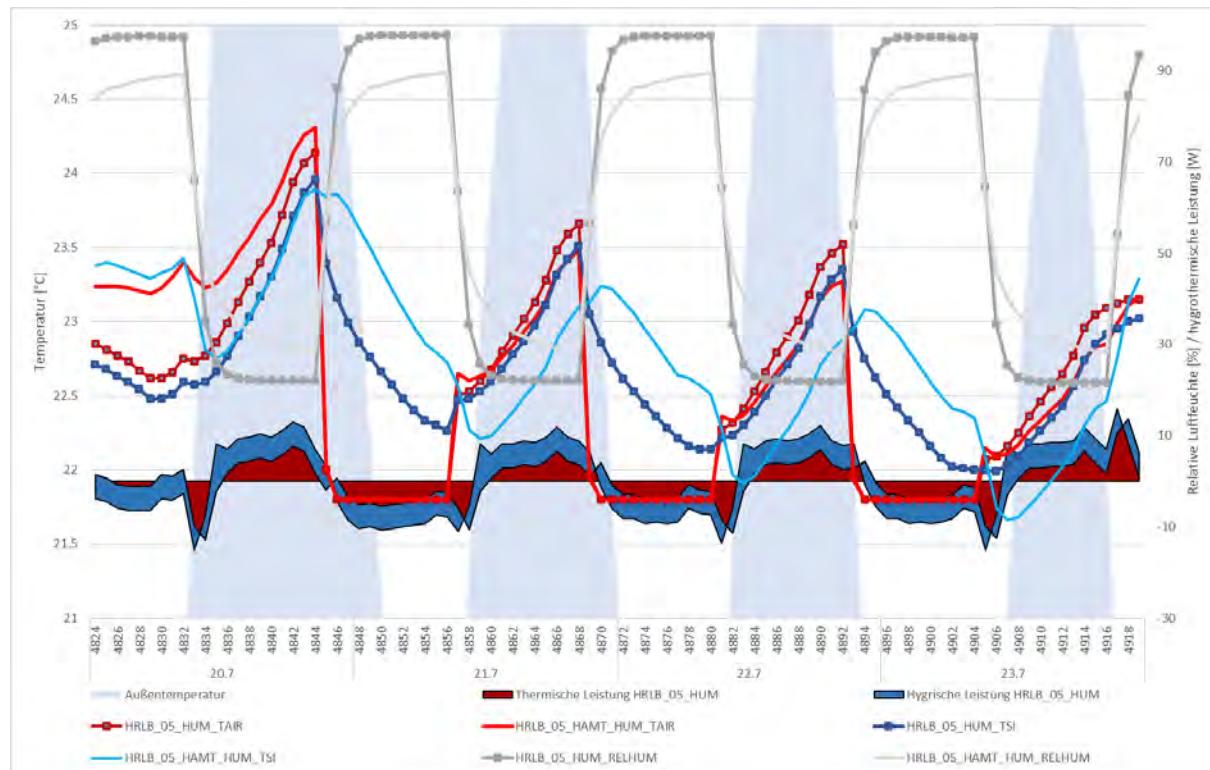


Abbildung 89 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_05 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung)



Analyse

Betrachtet man die unterschiedlichen Temperaturverläufe, so lassen sich auf den ersten Blick die typischen Tag-Nacht-Schwankungen verzeichnen. Im Gegensatz zu der Simulationsvarianten ohne Befeuchtung ist hier die Oberflächentemperatur der hygrothermischen Variante (HAMT) wechselnd höher (nachts) und geringer (tagsüber). Dies ist ein erstes Indiz dafür, dass der erwünschte Effekt eintritt. Nachts entsteht ein Wärmeeintrag ins Bauteil aufgrund der Kondensation und tagsüber resultiert daraus die erwünschte verzögerte Erwärmung aufgrund der Verdunstung.

Untersucht man nun den Verlauf der relativen Luftfeuchte, so lässt sich beobachten, dass im Wechselzeitraum zwischen den beiden angesetzten Werten der Verlauf identisch ist. Während sich die RH im Falle der rein thermischen Simulation nahezu vollständig an die angesetzten Werte annähert, werden diese bei der hygrothermischen Simulation nicht erreicht. Hier stellt sich in der 12-Stunden Periode nur ein Pendeln zwischen ca. 30 % und ca. 85 % Raumluftfeuchte ein, was von den beiden Grenzwerten jeweils 10 % entfernt ist.

Dies lässt sich durch die Wechselwirkung der Feuchte zwischen Raum und Bauteiloberfläche erklären. Ist die hygrische/ thermische Leistung positiv, so fließt der Energiestrom von außen nach innen, also von Bauteiloberfläche zum Raum. Bei einem negativen Wert verläuft der Energiestrom vom Raum zur Bauteiloberfläche. Zurückkommend auf den Verlauf der relativen Luftfeuchte ist zu sagen, dass wenn man den Verlauf analog zur hygrischen Leistung (welche direkt proportional zu HUMGAIN – dem Feuchteintrag ins Bauteil ist) vergleicht, so lässt sich die Abweichung der relativen Feuchte durch die Feuchtewechselwirkung (HUMGAIN) erklären.

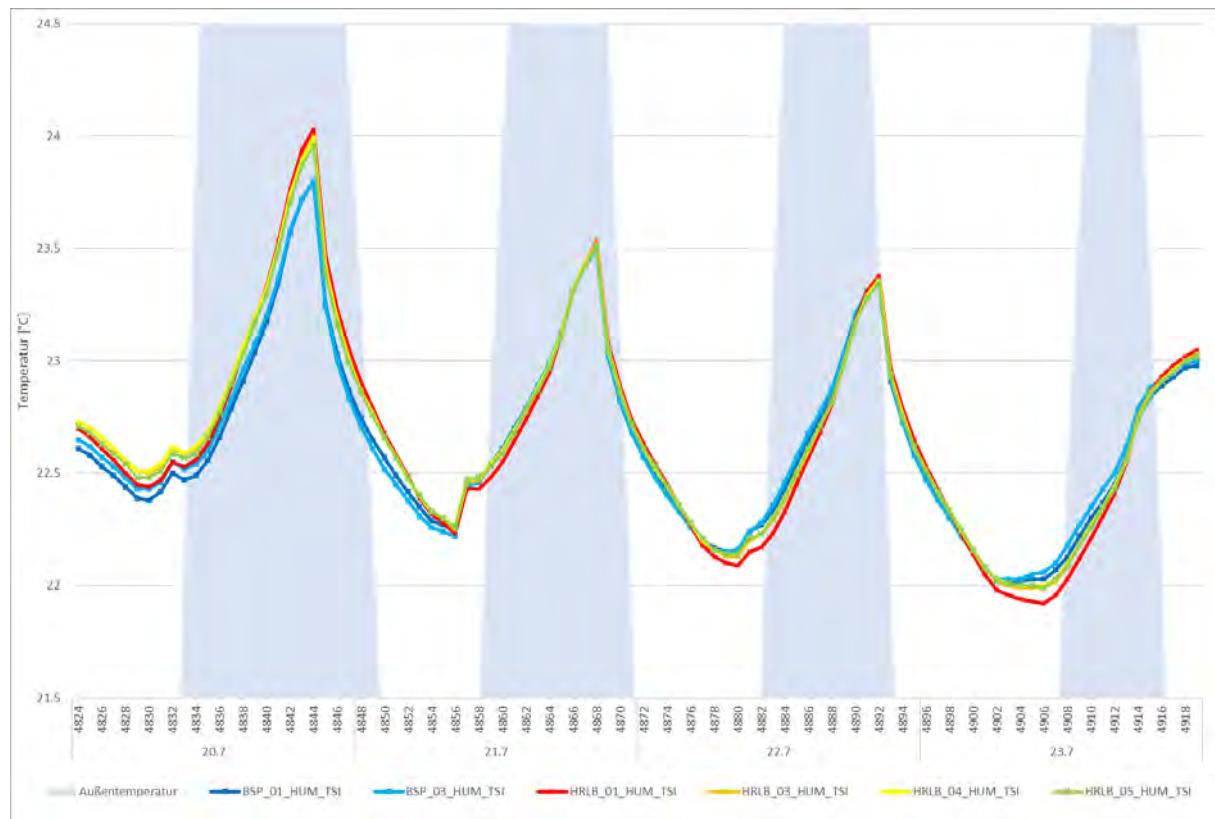
Die Darstellung der thermischen und hygrischen Leistung wurde bewusst so gewählt, um die Unterschiede in den Oberflächentemperaturen der thermischen und hygrothermischen Simulation anschaulich darzustellen. Durch die gestapelte Fläche beider Parameter lässt sich der Energieaustausch zwischen Bauteiloberfläche und Raum darstellen. Wichtig ist hier nochmals zu erwähnen, dass die hygrische (latente) Fläche in keiner

Temperaturänderung resultiert, im Gegensatz zur thermischen (sensiblen) Fläche. Durch den identischen Energietransfer durch das Bauteil bei gleichen Außen- und Innenbedingungen, lässt sich der entstandene Unterschied der Oberflächentemperatur erklären. Durch die Verdunstung (hygrisch = blau) tagsüber ist TSI in der hygrothermischen Simulation geringer als in der rein thermischen Simulation. Nachts verhält sich dies genau gegensätzlich. Hierbei hat nun die freigesetzte Kondensationswärme einen Effekt, welche in der hygrothermischen Simulation berücksichtigt wird.

Auswertung

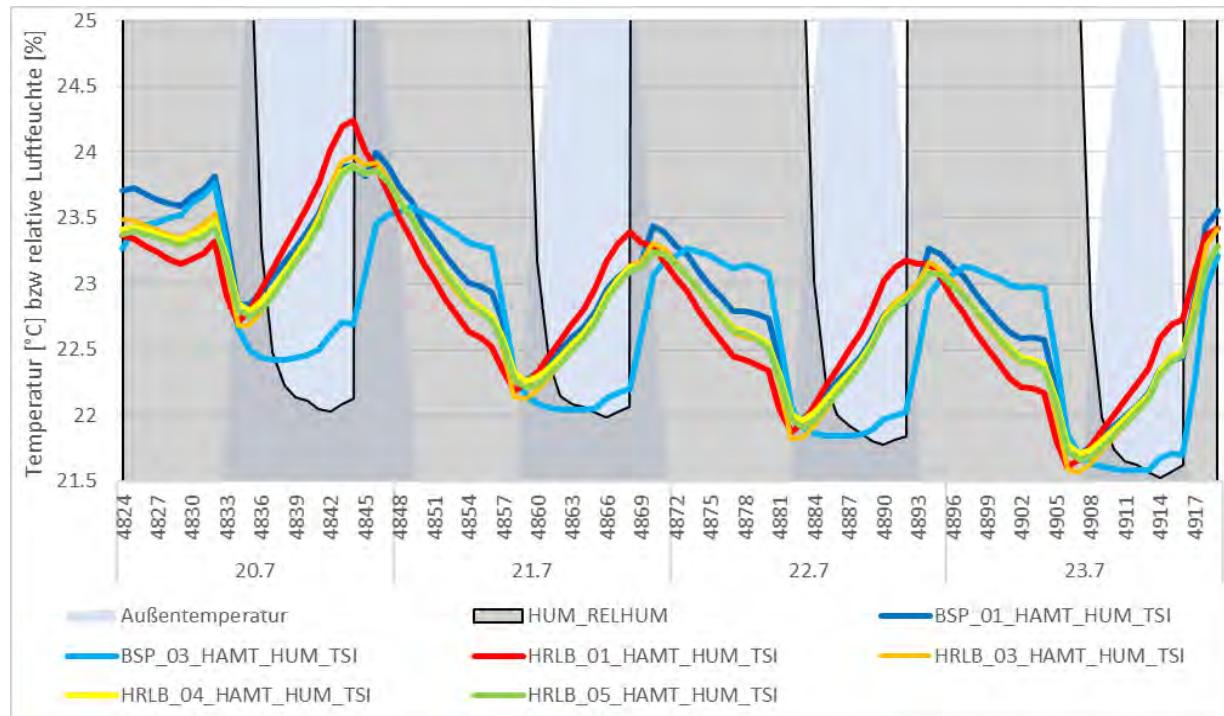
Nachfolgend wird also die eingangs gestellte Frage analysiert, inwieweit die thermische Behaglichkeit beeinflusst werden kann und welche der gewählten Bauteilaufbauten relativ zueinander am besten bzw. am schlechtesten abschneiden. Vergleicht man die beiden Simulationsreihen, werden in dieser Versuchsreihe die Effekte durch eine zusätzlichen Raumluftbe- und entfeuchtung untersucht. Dass sich diese Veränderung fast ausschließlich auf die hygrischen Energietransferprozesse auswirken, lässt sich aus der nachfolgenden Abbildung entnehmen. Der Verlauf der thermischen Simulationsvarianten ist nahezu identisch zu der vorherigen Simulationsreihe ohne zusätzliche Befeuchtung. Nachfolgend werden die Oberflächentemperaturen der gerade beschriebenen Simulationsvarianten getrennt nach thermischer und hygrothermischer Simulationsvariante dargestellt.

Abbildung 90 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der thermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung)



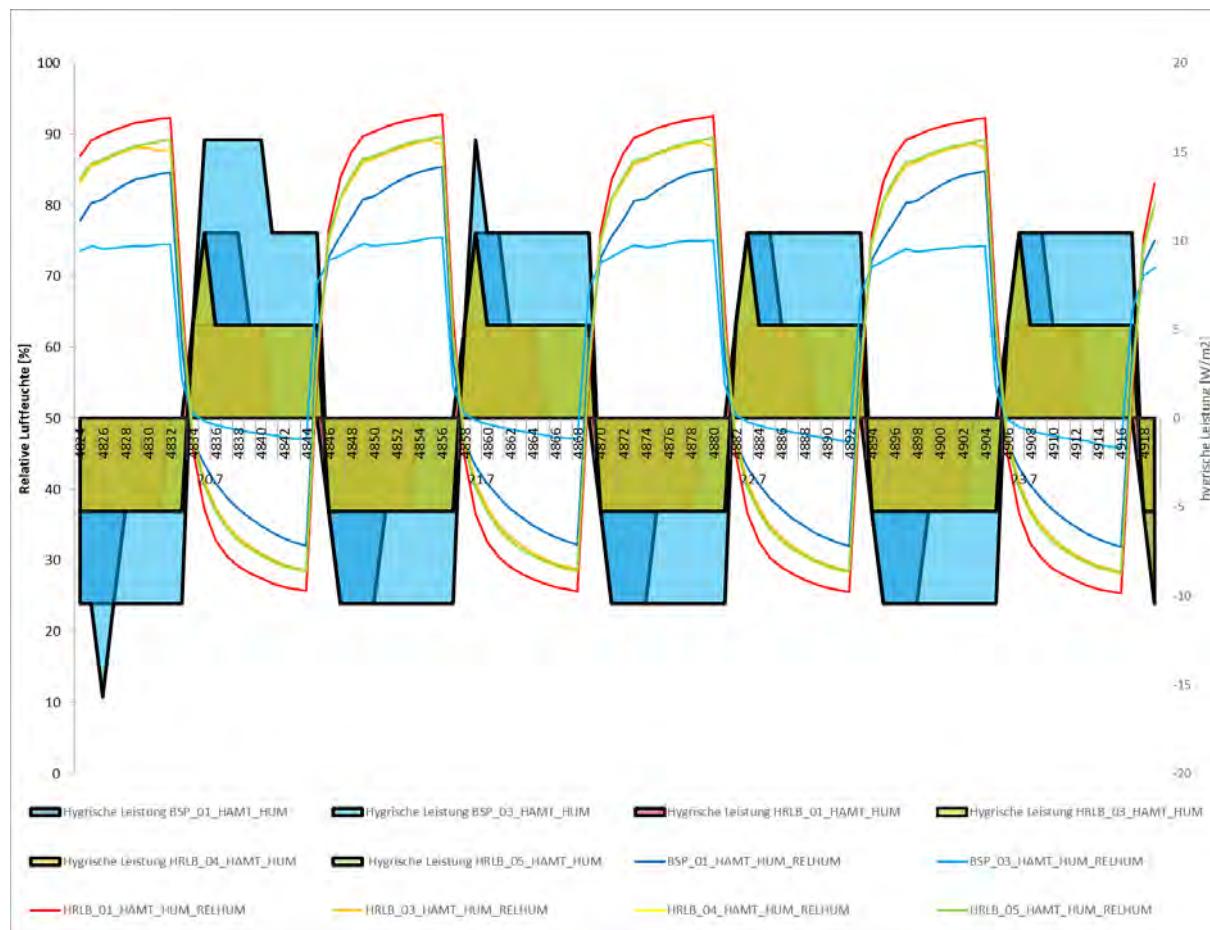
Vergleicht man nun die Ergebnisse der hygrothermischen Simulationsvarianten (siehe nachfolgende Abbildung), so stellen sich doch deutliche Temperaturunterschiede ein. Am schlechtesten schneidet, dass HRLB_01 Element ab, welches mit der geringsten absoluten Wärmekapazität und dem Innenoberflächenmaterial (Gipskarton) mit dem schlechtesten Sorptionsverhalten, in der schnellsten Erwärmungskurve resultiert. Am besten schneidet das BSP_03 Element mit der höchsten Wärmekapazität und einem sehr guten Oberflächensorptionsverhalten (Lehm) ab.

Abbildung 91 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung)



Ein Grund für die Abweichung der Oberflächentemperatur von BSP_03 könnte mit der relativen Luftfeuchte zusammenhängen. Durch Verdunstung (latent/hygrisch) kann die durch das Bauteil strömende Energie im Phasenwechsel umgewandelt werden statt in eine thermische Temperaturerhöhung zu resultieren. Um dieses Verhalten genauer zu untersuchen, sollen jetzt die hygrischen und thermischen Energiefüsse getrennt für die verschiedenen Varianten vergleichend untersucht werden. Die nachfolgende Abbildung stellt zunächst die hygrischen Energiefüsse dar. Anschließend werden die rein thermischen Energiefüsse abgebildet. Im rein hygrischen Fall ist für alle hygrothermischen Simulationsvarianten auf der linken y-Achse die relative Luftfeuchte und auf der rechten y-Achse die hygrische Leistung dargestellt. Auch hier kann die Fläche als die übertragene Energie und der absolute Wert des Graphen als aktuelle Leistung verstanden werden.

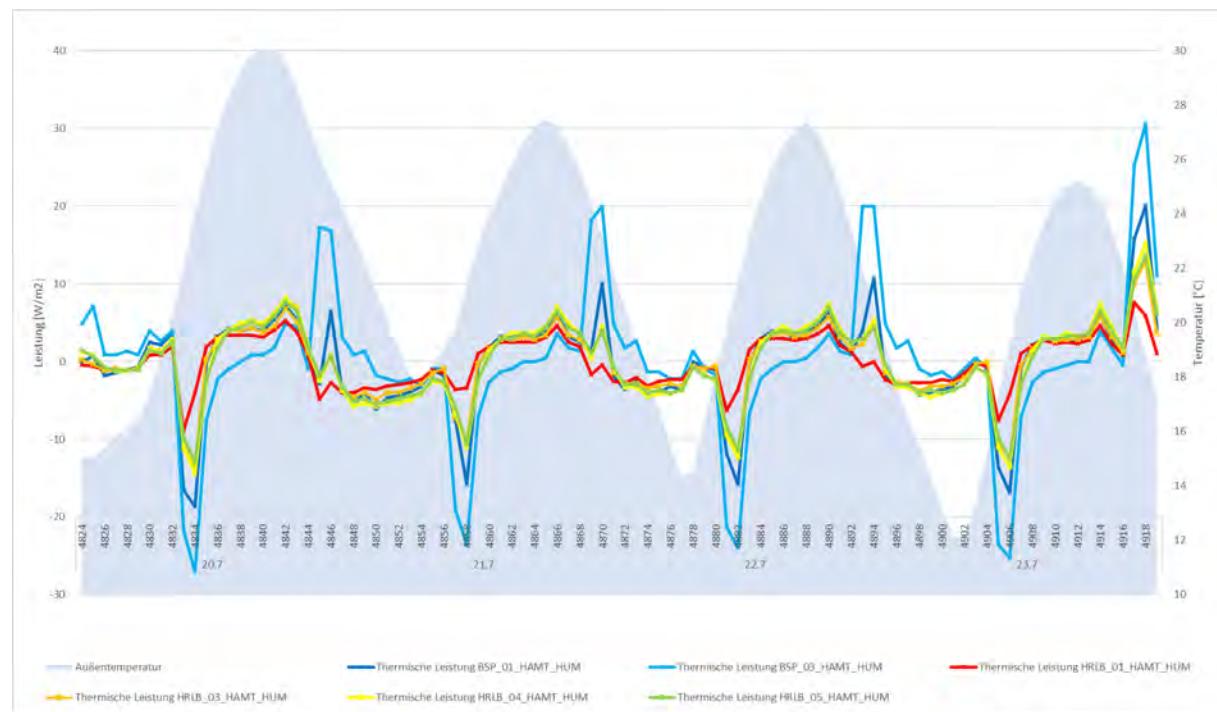
Abbildung 92 Vergleich der hygrischen Energiefüsse und Leistungen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung)



Hierbei lässt sich der Zusammenhang aus relativer Feuchte und hygrischem Energiefluss sehr gut erkennen. Bei geringer Luftfeuchte findet für alle Varianten aufgrund der Verdunstung ein latenter Energiefluss in den Raum hinein statt. Bei hoher Luftfeuchte ist es genau gegensätzlich. Was besonders heraussticht ist, dass die latent übertragene Energie der BSP_03 Variante stets am höchsten ist. Daraus lässt sich auch die Erklärung ableiten, wieso tagsüber TSI im Vergleich zu den anderen Varianten deutlich geringer und nachts deutlich höher ist: Tagsüber erwärmt sich das Bauteil aufgrund der Verdunstung langsamer und kühlte nachts durch die Kondensation langsamer ab.

Anschließend werden nun noch die rein thermischen Energiefüsse und die entsprechende thermische Leistung aller hygrothermischen Simulationsvarianten mit hygrischer Konditionierung auf der linken y-Achse dargestellt. Auf der rechten y-Achse ist die Außentemperatur als Referenz abgebildet.

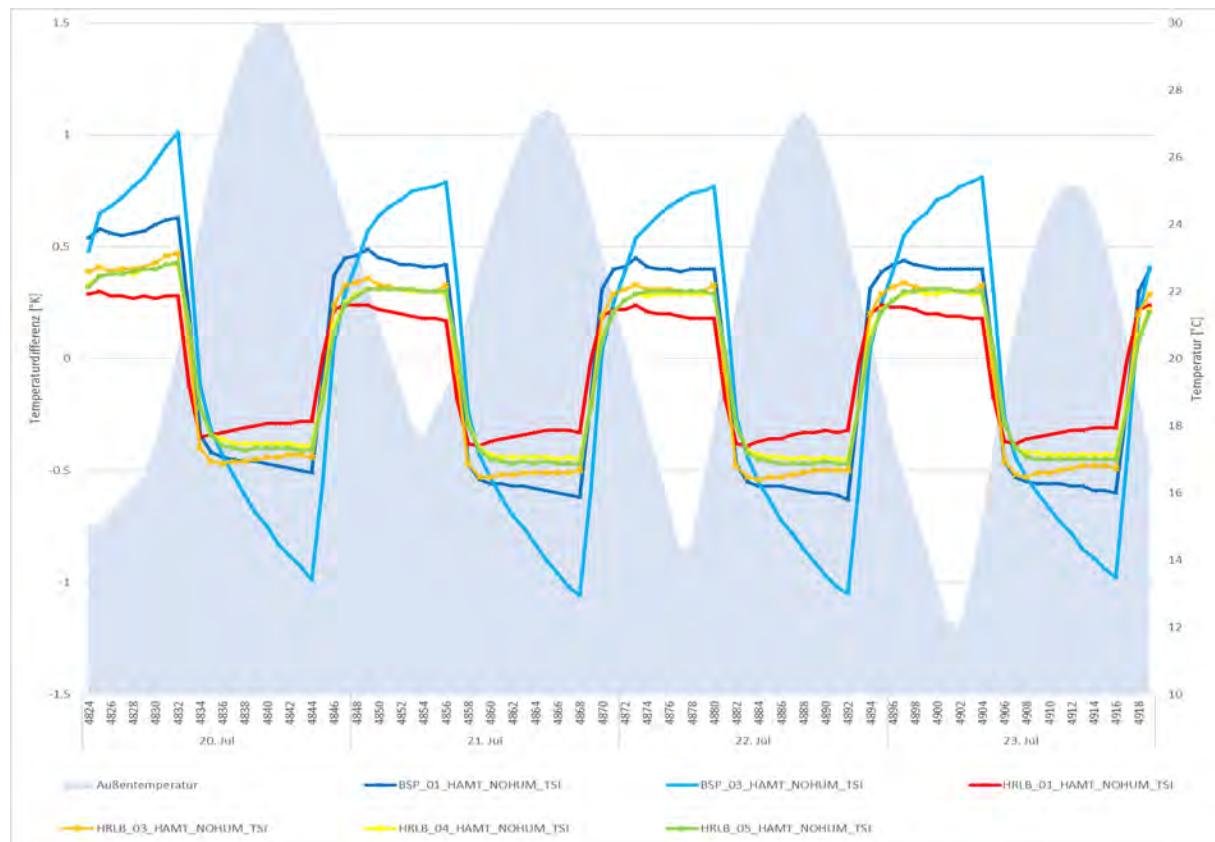
Abbildung 93 Vergleich der thermischen Energieflüsse und Leistungen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung)



4.2.3 Vergleich beider Variantensimulationen

Um nun eine Schlussfolgerung über die Effektivität der hygrischen Konditionierung abzuleiten, wurde für die einzelnen Varianten die Differenz zwischen den hygrothermischen Simulationsergebnissen der Variante mit Befeuchtung und ohne Befeuchtung gebildet. Diese sind in folgender Abbildung dargestellt. Auf der linken y-Achse ist die Temperaturdifferenz der jeweiligen Varianten und auf der rechten y-Achse die Außentemperatur als Referenz dargestellt.

Abbildung 94 Temperaturdifferenz der Oberflächentemperaturen der hygrothermischen Simulationsvarianten zwischen den Varianten mit und ohne hygrische Konditionierung (eigene Darstellung)



Hierbei lässt sich beobachten, dass die BSP_03 Variante den größten Effekt erzielt mit einer finalen Temperaturdifferenz von 1 K. Vergleicht man die Form der Kurven, so sieht man, dass alle Varianten abgesehen von BSP_03 bereits ein Plateau erreichen. Das ist ein Indiz dafür, dass der „Feuchtepuffer“ der BSP_03 Oberfläche noch nicht verbraucht ist und somit noch Potential für mehr Trägheit verfügbar ist. Deutlich am schlechtesten schneidet die HRLB_01 Variante mit einer maximalen Temperaturdifferenz von ca. 0.35 K ab.

Kapitel IV – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche

Vorbereitung der Solarstation, Anpassung und Einrichtung der Klimatestkuben, Planung und Umsetzung des Umbaus, Planung und Fertigung der zu testenden Wandelemente, Anpassung und Einrichtung des bestehenden Brettsperrholz-Testkubus, Konzeption der neuen Infrastruktur, Erstellung eines adaptiven Messkonzepts, Entwicklung des Sensorikkonzepts, Installation und Konfiguration der Versorgungs- und Messtechnik, Programmierung der Messtechnik, Testbetrieb und Optimierung der Messtechnik

Planung von Langzeitfeldversuchen in verschiedenen Testkuben

Nina Flexeder

Herausforderungen und Konzept der Langzeitmessungen

Die Langzeitmessungen in frei bewitterten Klimatestkuben verschiedener Größe sollen einen Nachweis über die Potenziale der hygrothermischen Speichermasse verschiedener Baukonstruktionen ermöglichen. Hierfür ist ein Konzept nötig, welches die Messung kleiner Temperaturunterschiede an Bauteiloberflächen infolge von Wasserdampfsorption ermöglicht. Die Herausforderung dieses Teilprojekts besteht demnach darin, Klimateststände mit vergleichsweise geringem Budget so umzubauen / nachzurüsten, dass vollautomatisierte Messungen über längere Zeit ohne Anwesenheit von Personen möglich sind.

Es soll die Hypothese untersucht werden, inwieweit Sorptionseffekte – ausgelöst durch Klimaschwankungen im Innenraum – eine effizientere Klimatisierung ermöglichen könnten.

Zur Entwicklung der Teststände für die Langzeitfeldversuche im Projekt PhyTAB wurden folgende Leitlinien verfolgt:

- ✓ Nachhaltigkeit in der Forschung durch Variabilität: Es soll sichergestellt werden, dass die Messstände stets erweitert oder umgebaut werden können. Deshalb wurde sämtliche Messtechnik nach dem Baukastenprinzip sowie Open source konzipiert. Auch die Materialwahl und Konstruktion der Baukonstruktion ermöglicht die Untersuchung einer Vielzahl an Forschungshypothesen.
- ✓ So pragmatisch wie möglich, so stabil und sicher wie nötig: Insbesondere bei der Baukonstruktion wurde an manchen Stellen auf unkonventionelle und schnelle Lösungen zurückgegriffen. Wo eine erhöhte Beanspruchung zu erwarten ist, wurden beispielsweise reversible Verbindungsarten verwendet. Zur Sicherstellung der Arbeitssicherheit wurde im Vorfeld eine Gefährdungsbeurteilung im Rahmen des Projektmanagements durchgeführt.
- ✓ Diversität im Team mit breiter Fachkenntnis und agilen Ansätzen im Projektmanagement: Die kurzfristige Projektbeteiligung weiterer Firmen sowie die engagierte eigenverantwortliche Mitarbeit studentischer Hilfskräfte mit handwerklicher Berufsausbildung ermöglicht ein Projektteam mit weitreichender Spezialisierung.

Stand der Wissenschaft zu experimentellen bauphysikalischen Langzeitmessungen in Testkuben

Die Erforschung von Langzeiteffekten in oder an Wandelementen mit unterschiedlichen Klimata innen und außen wird in der bauphysikalischen Forschung mit Klimatestboxen mit unterschiedlichem Detailgrad realisiert. Um die geeignete Methodik für die Forschungsfragen im Projekt PhyTAB zu identifizieren, werden im Folgenden die relevanten Prinzipien fremder Forschungsprojekte skizziert und dann, in Bezug auf die Verwendbarkeit einzelner Aspekte, Ideen für PhyTAB abgeleitet.

Die Abbildung semi-realistic Temperatur- und Feuchtezyklen mithilfe von Klimakammern bietet eine gute Möglichkeit, einzelne physikalische Effekte isoliert unter Laborbedingungen zu messen. In (M. van Belleghem et al., 2011) findet sich eine ausführliche Übersicht zum Design einer raumgroßen Testanlage für Experimente mit relativer Luftfeuchte. Der Fokus liegt hierbei allerdings primär auf der Ausgestaltung der komplexen Regelungstechnik und weniger auf der Untersuchung einzelner hygrokopischer Materialien oder Baukonstruktionen.

In (Collet & Pretot, 2014) wird das hygrothermische Verhalten einer Fachwerk-Hanfbetonwand mithilfe zweier benachbarter Klimakammern, getrennt durch das als Wand ausgebildete Testelement, untersucht. In beiden Kammern können die Umgebungsbedingungen jeweils so gewählt werden, dass sich Temperatur- und/oder Dampfdruckgradienten zwischen den beiden Seiten der Wand einstellen. Die verwendete Messtechnik beschränkt sich in diesem Projekt auf die Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit innerhalb der Wand. Es zeigt sich, dass die beobachteten hygrischen Phänomene direkte Einflüsse auf die Wärmebilanz (Korrelation mit der latenten Wärme der Phasenänderung) haben. Es sei daher notwendig, hygrokopisches Materialverhalten in der gesamten Energiebilanz zu berücksichtigen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass es deshalb notwendig sei, neue Versuchsstände zur Untersuchung speziell dieser Phänomene zu entwickeln.

Ein ähnlicher experimenteller Aufbau mit zwei verbundenen Klimakammern wird in (Grynnning et al., 2013) zur Untersuchung von Fenstern mit PCM-Anteil verwendet. Die Methoden zur Testung transparenter Elemente sind insbesondere in Bezug auf solare Bestrahlung relativ komplex und finden im Projekt PhyTAB soweit keine Anwendung. Jedoch lässt sich aus den Beobachtungen der Autoren ableiten, dass ein ausreichender (realistischer) Zeitabstand zwischen periodischen Belastungszyklen gewährleistet sein sollte, um repräsentative Aussagen zu Speicherungsphänomenen treffen zu können. In diesem Fall hätte beispielsweise ein Zeitraum von 10–12 Stunden zwischen Lastspitzen noch nicht ausgereicht, um sicherzustellen, dass der stationäre Zustand im Material erreicht ist.

Sollen realistische Feuchte- und Temperaturzyklen im Fokus der Untersuchung stehen, so eignen sich in-situ Monitoringprojekte, bei denen tatsächlich benutzte Wohn- oder Arbeitsräume mit Sensorik versehen werden.

Bei der Messkampagne von (Hameury & Lundström, 2004) werden vier Apartments in Bezug auf Temperatur, relative Luftfeuchte im Innenraum und Holzfeuchtegehalt der Massivholzwände gemonitort. Es sollte untersucht werden, inwiefern die Nutzung großer freiliegender Massivholzflächen Potentiale für ein angenehmes Raumklima bieten. Die Ergebnisse zeigen Hinweise darauf, dass freiliegendes Massivholz dazu beitragen könnte, die Temperaturschwankungen im Innenraum abzufedern. Allerdings kann anhand der Messdaten darüber hinaus soweit nicht bewiesen werden, dass eine große Fläche von freiliegendem Massivholz die täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit dämpfen kann. Für die Messkonzeption im Projekt PhyTAB bedeutet dies, dass insbesondere für die Messung der Bauteilerwärmung infolge von Enthalpieeffekten (vgl. Abschnitt „Fehlerabschätzung der Validierungsmethodik“) die verwendeten Messsysteme vergleichsweise geringe Differenzen messen müssen. Die von (Hameury & Lundström, 2004) verwendeten Thermocouple-Elemente (Typ T) wären mit der genannten Genauigkeit von $\pm 0.5^\circ\text{C}$ für die primären Messziele im Projekt PhyTAB nicht ausreichend präzise. Auch wird die Verwendung der sonst üblichen elektrischen Widerstandsmessung zur Holzfeuchtebestimmung als kritisch bewertet und die hydrometrische Methode wie beispielsweise in (Collet & Pretot, 2014) aufgrund der zu erwartenden Temperaturgradienten bevorzugt.

Ähnliche Hypothesen werden in (Künzel et al., 2004) untersucht, wobei es sich hier um zwei identische, aber unbewohnte Testräume handelt, welche über ein Fenster und eine Lüftungsregelung in direktem Kontakt zum Außenklima stehen. Diese Methode erlaubt einen präziseren Vergleich verschiedener Innenraumbekleidungen bei sonst in identischen Bedingungen in den zwei Testräumen. Typische Feuchtezyklen werden durch Befeuchter (Ultrasonic Vaporizer) nachgestellt und die Sorptionsfähigkeit der Innenwandbekleidung durch die Messung der relativen Luftfeuchte in Raummitte und an den Lüftern qualitativ bestimmt.

Diese Mischung von realen Außeneinflüssen mit ansonsten sehr reduzierten weiteren Lasten und vor allem der gleichzeitige Betrieb von zwei baugleichen Testapparaturen unter Ausschluss von Nutzereinflüssen ermöglichen Messergebnisse, die einen Vergleich von Messdaten verschiedener Materialien mit ansonsten identischen Rahmenbedingungen ermöglichen. Dieses Prinzip der doppelten Versuchsanlage mit kontrolliertem Innenklima wird im Projekt PhyTAB adaptiert.

Auch (Mets et al., 2017) nutzen eine Versuchsanlage mit kontrolliertem Innenklima, um die hygrothermische Überwachung von Mauerwerkswänden mit unterschiedlichen Innendämmstoffen zu ermöglichen. Es zeigt sich, dass die Schlagregenbelastung einen wesentlichen Einfluss auf das Ausmaß dieser hygrothermischen Veränderungen hat, wie sich bei einer Änderung der Himmelsausrichtung zeigt. Bei den dampfdiffusionsoffenen Systemen zeigte sich, dass auch das Innenraumklima das hygrothermische Verhalten beeinflusst, die Auswirkungen seien jedoch geringer. Um die Auswirkungen von Schlagregenbelastungen auf sämtliche Fassadenteile vergleichbar zu halten, wird im Projekt PhyTAB deshalb für alle Konstruktionsarten das identische Putzsystem verwendet (vgl. Bauteilaufbau in Abschnitt „Systematisierung und Schichtenaufbau der Fassadenteile“). So soll sichergestellt werden, dass die gemessenen Unterschiede zwischen einzelnen Fassadenteilen aus der Interaktion des innenseitigen Materials mit dem Innenraumklima stammen und somit ein Vergleich ermöglicht wird.

Es wird erwartet, dass nicht nur die Änderung von relativer Luftfeuchte und Temperatur das hygrothermische Verhalten beeinflussen, sondern auch die Luftgeschwindigkeit, mit welcher die neu konditionierte Luft an der Bauteilinnenseite vorbeiströmt, vgl. hierzu auch Kapitel II. In (Marnix van Belleghem et al.) wird hierfür eine aufwändige raumgroße Testkammer entwickelt, welche die Messung der Luftgeschwindigkeiten an verschiedenen Punkten im dreidimensionalen Raum ermöglicht. Diese Untersuchungstiefe erscheint für das Projekt PhyTAB nicht verhältnismäßig und muss aus Kostengründen alternativ gelöst werden. Zur Belüftung der Testkuben werden zwei Varianten ermöglicht: a) Freie Fensterlüftung und b) mechanische Beziehungsweise Entlüftung mit Messung des Luftvolumenstroms sowie der Temperatur und relativen Luftfeuchte bei Eintritt.

Verfügbare Infrastruktur im Projekt und nötige Anpassungen

Für die Langzeitmessungen werden im Projekt PhyTAB insgesamt drei Testkuben verwendet. Es handelt sich dabei um einen größeren Brettsperrholzkubus (Standort: Firma Binderholz, Kösching) sowie zwei kleinere Testkuben (Standort: Technische Universität München). Alle drei Kuben existierten bereits vor Projektstart, mussten allerdings für die Zwecke von PhyTAB wesentlich instandgesetzt und umgerüstet werden.

Der Kubus in Kösching (freistehend auf einem Parkplatz) wurde aus dem Vorgängerprojekt (Kornadt et al., 2018) übernommen und die Dateninfrastruktur instandgesetzt, vgl. Abbildung 95, Abbildung 96 und Abbildung 97. Zur Weiterverwendung für die primären Forschungsfragen im Projekt PhyTAB war die Messtechnik soweit noch nicht ausreichend. Es wurden zahlreiche Sensoren zur Oberflächentemperaturmessung nachgerüstet, vgl. Abbildung 98. Eine detaillierte Beschreibung des Messkonzepts findet sich in Abschnitt „Primäre Oberflächentemperaturmessung: Konzept, Entwicklung und Bau“, S. 163 sowie Kapitel V, Abschnitt „Hypothese zur Anwendung der Methoden aus dem Zwillingsversuch im Dreidimensionalen“, S. 179. Des Weiteren wurden Kombisensoren zur Messung der relativen Luftfeuchte und -temperatur sowie zur hygrometrischen Holzfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen der nach Nordost ausgerichteten

Brettsperrholzaußenwand verbaut. Details hierzu werden im Abschnitt „Sekundäre Feuchtemessung im Bauteilquerschnitt: Konzept, Entwicklung und Bau“, S. 165 erläutert.

**Abbildung 95
Kubus Kösching**



**Abbildung 96
Umbauten für PhyTAB**



**Abbildung 97 Erweiterung des
bestehenden Messsystems**



**Abbildung 98 Nachgerüstete
Temperatursensoren**



Abbildung 95: aus der Dokumentation von (Mindrup, 2018)
Abbildung 96, Abbildung 97 und Abbildung 98: eigene Darstellungen (Schumacher, Kamml, Flexeder)

Die sogenannte Solarstation steht auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU München, Arcisstrasse 21, auf einem Stahlgerüst in circa 28 m Höhe (vgl. Abbildung 99).

Die Station besteht aus insgesamt drei Raumkörpern, die auf einem Stahlgerüst der Nordterrasse des Gebäudes stehen. Die Plattform des Stahlgerüsts, auf dem die drei Kuben stehen, liegt ca. auf 3,7 m über dem Terrassenbelag, vgl. Abbildung 99. Die zwei kleineren Kuben sind in zwei Achsen drehbar, um diverse Sonnenstände und Auswirkungen der Sonneneinstrahlung zu simulieren. Ihre lichten Innenabmessungen betragen circa 1,30 m x 1,30 m x 1,10 m (l x b x h). Jene zwei kleineren Körper werden im Folgenden als *Kubus Ost* und *Kubus West* bezeichnet. Sie wurden für hygrothermische Messungen im Rahmen des Forschungsprojektes PhyTAB modifiziert.

Abbildung 99 Solarstation auf dem Dach des TUM Hauptgebäudes - vor, während und nach dem Umbau



eigene Darstellungen (Paulik, Beck)

Bei Beginn der Arbeiten existierte weder eine durchgängige Stromversorgung noch eine Infrastruktur zur Datenübertragung. Die Baukonstruktion der Kuben war sehr marode und für die geplanten Messungen nicht zweckmäßig. Die Umbauten des Kubus Ost und Kubus West waren dementsprechend umfangreich und könnten nachfolgenden Forschungsprojekten als Präzedenzfall für die Einrichtung von frei bewitterten Testständen zur Untersuchung kleinteiliger klimatischer Effekte im Innenraum dienen. Sie werden deshalb in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben.

Baukonstruktive Planung und Umsetzung der Umbauten in Kubus Ost und West

Nina Flexeder; Johannes Paulik, Michael Kamml

Bauliche Instandsetzung und Vorbereitung der Testkuben

Für das Monitoring werden zwei bereits vorhandene kleinere Testkuben statisch instandgesetzt, innenseitig mit Vakuumisolationspaneelen gedämmt, mit jeweils einem Fenster mit Dreifachverglasung und Low-e Beschichtung sowie mit neuer Mess- und Versorgungstechnik ausgestattet. Die Kuben stehen jeweils auf einem schwenkbaren Drehteller und können damit manuell in beliebiger Himmelsausrichtung arretiert werden.

Die ursprüngliche Holzunterkonstruktion der Kuben war an vielen Stellen zu marode und für die neuen erwarteten Lasten unterdimensioniert. Die Kuben wurden deshalb demontiert, das tragende Holzgerippe größtenteils erneuert und Schwachstellen der äußeren Hülle ausgebessert. Elemente aus früheren Projekten wurden ausgebaut und der fachgerechten Weiterverwertung zugeführt. Anschließend wurden umfangreiche konstruktive Umbaumaßnahmen gestartet.

Abbildung 100 Baukonstruktive Ertüchtigung des ursprünglichen Kubus durch einen kompletten Ab- und Wiederaufbau der Tragkonstruktion



Abbildung 101 Einbau und Abdichtung der neuen Isolierverglasung



Abbildung 102 Einbau der Innendämmung und der Aluminiumprofile



Abbildung 100 - Abbildung 102: eigene Darstellungen (Paulik, Flexeder)

Ein maßgeblicher Aspekt des Umbaus der beiden kleineren Kuben auf der Solarstation war die innenseitige thermische Ertüchtigung. Hier stellten sich bei der Umplanung zahlreiche Konflikte in den Detailanschlüssen dar, da die Vakuumdämmebene somit bei sämtlichen Anschläßen verspringt und auch nicht perforiert werden darf. Eine weitere Herausforderung stellte die außenseitige Verblechung dar, die gleichzeitig als Fixierung sowie als Abdichtung für Fassadentestelemente mit verschiedenen Maßen dienen sollte und den zahlreichen geplanten Elementwechseln standhalten muss. Zur Lösung dieser Problematik wurden Mock-ups in 1:1 erstellt, um so die klassischen Zeichnungen im 3D-CAD-Modell durch eine effiziente und pragmatische Entwurfsmethode zu ergänzen (vgl. Abbildung 103, Abbildung 104, Abbildung 105).

Jeweils eine Wandseite des Kubus ist als Einschuböffnung für Fassadentestelemente mit unterschiedlicher Wanddicke ausgebildet. Die Maße der Fassadentestelemente sind dabei so gewählt, dass jeweils zwei nebeneinander mit ca. 20 mm Untermaß montiert werden können. Durch diese Teilung bietet sich die Möglichkeit, ähnliche Wandaufbauten parallel, beispielsweise auf den Einfluss der Oberflächenbeschichtung hin zu testen. Zudem ermöglicht das geringere Gewicht eine einfache Montage. Die Lastabtragung in vertikaler Richtung erfolgt über eine 140 mm breite druckfeste Schwelle, die Belastung der Vakuumisolationspaneele wird somit vermieden. Der Winddruck in horizontaler Richtung wird über den eingestellten Aluprofilrahmen an die tragende Holzkonstruktion abgeleitet. Bei einem Elementwechsel werden die Bauteile zunächst hineingeschoben, dann durch justierbare Montagekeile verklemmt, die verbleibenden Lücken mit Mineralwolle verfüllt und sämtliche Fugen von innen mit PE-Butylklebeband

dampfbremsend abgedichtet. Verschraubungen, die entweder eine Wärmebrücke darstellen oder aber das Vakuum der Dämmpannele verletzen könnten, werden somit konstruktiv umgangen.

Abbildung 103
Detailanschluss Testelement an den Rahmen, unten außen



Abbildung 104
Detailanschluss zweier Testelemente, unten mittig

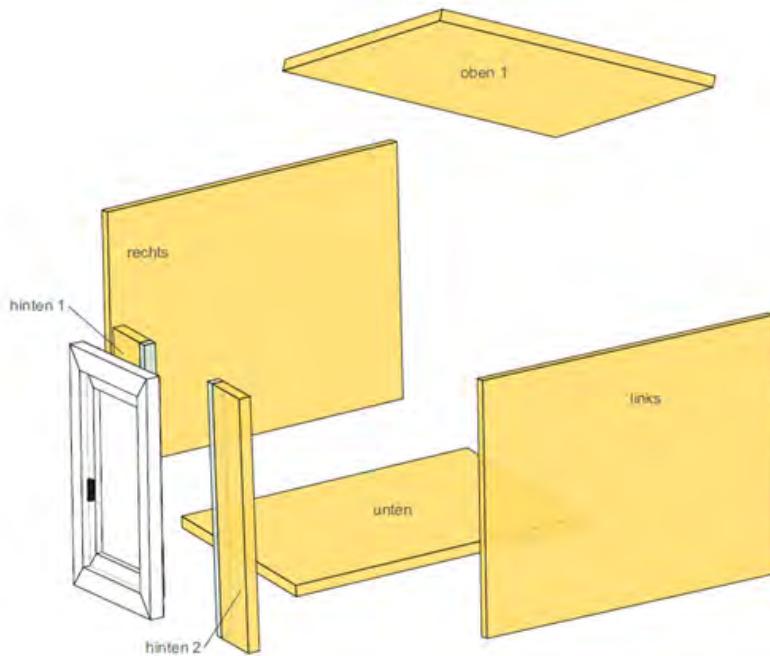


Abbildung 105
Detailanschluss Testelement an den Rahmen, oben außen



Abbildung 103 bis Abbildung 105: eigene Darstellungen (Kamml, Paulik, Flexeder)

Abbildung 106 Thermische Ertüchtigung mit maßgefertigten Vakuumisolationspaneelen und Isolierverglasung



eigene Darstellung (Flexeder)

Die den Testelementen gegenüberliegende Seite ist jeweils mit einem Fenster versehen, welches zum einen den Zugang zur Mess- und Versorgungstechnik im Inneren des Kubus gewährt und zum anderen solare Einträge ermöglicht. Die restlichen vier Seiten (seitlich, oben, unten) sollen die Messungen möglichst wenig beeinflussen und sind deshalb hochwärmegedämmt und möglichst wasserdampfdicht ausgeführt. Dazu wurden maßgefertigte Vakuumisolationspaneele mit einer Innenlage aus glasfaserverstärktem Kunststoff verwendet, sämtliche Fugen wurden mit PE-Butylklebeband verklebt. Zur innenseitigen Stabilisierung der eingeklebten Vakuumisolationspaneelle sowie als Lastabtragung gegen Winddruck auf die Fassadentestelemente wurde ein Aluminiumgestell nachträglich eingepasst. Dieses kann je nach Dicke der einzusetzenden Fassadentestelemente individuell eingestellt werden und dient zusätzlich als Gerüst zur Leitungsführung sowie zur Montage einzelner Sensoren im Raum, vgl. Abbildung 107, Abbildung 108.

Abbildung 107 Axonometrie eines Kubus ohne Darstellung der zwei einzusetzenden Fassadentestelemente

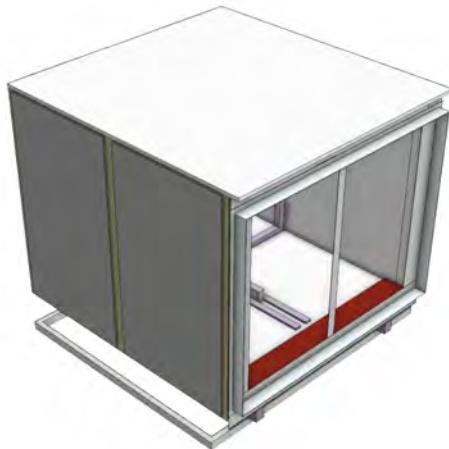


Abbildung 108 Axonometrie der innenliegenden Vakuumisolation mit eingestelltem Aluminiumrahmen mit Teleskoparm in horizontaler Richtung

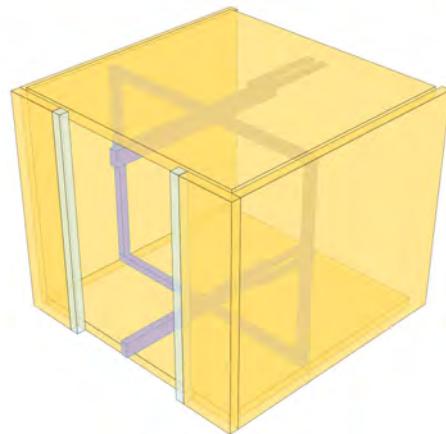


Abbildung 107 und Abbildung 108: eigene Darstellungen (Flexeder)

Planung und passgenauer Bau der Fassadentestelemente

Im ersten Abschnitt des Forschungsprojektes sollen verschiedene Holzbauweisen in Bezug auf ihr instationäres hygrothermisches Verhalten miteinander verglichen werden. Dazu wurden jeweils mehrere Varianten als Beispiele für die massive Brettsperrholzbauweise sowie die Holzrahmenleichtbauweise gebaut. Alle Fassadentestelemente weisen dabei einen ähnlichen rechnerischen U-Wert von rund $0,24 - 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ sowie dieselben Abmessungen in x- und y-Richtung auf. Ferner werden sie alle vom selben Rahmenmaterial (Furnierschichtholz, 27 mm stark) eingefasst und sind außenseitig identisch verputzt.

Gemäß der unterschiedlichen Materialwahl weisen die Wände bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedene dicke Wandstärken auf. Diese ausgewählten Außenwandkonstruktionen sollen in Langzeitmessungen unter wechselnden Einflüssen des Wetters sowie des Innenklimas auf ihr instationäres hygrothermisches Verhalten hin untersucht werden (siehe Kapitel V). Dazu werden Testkuben verwendet, die eine Öffnung für den Austausch von Wandelementen aufweisen.

Abbildung 109 Fotos vom Bau der Fassadentestelemente (v. l. n.r.: einzelner Massivholzständer und Zwischendämmung bei den HRLB-Elementen; seitliche Abklebung des Brettsperrholz für die BSP-Elemente; Befestigung der putzbaren Aussendämmung mit Stabdübeln; Unterputz mit Randleisten aussen)



eigene Darstellungen (Paulik)

Abbildung 110 Axonometrie des Testkubus mit zwei Fassadentestelementen

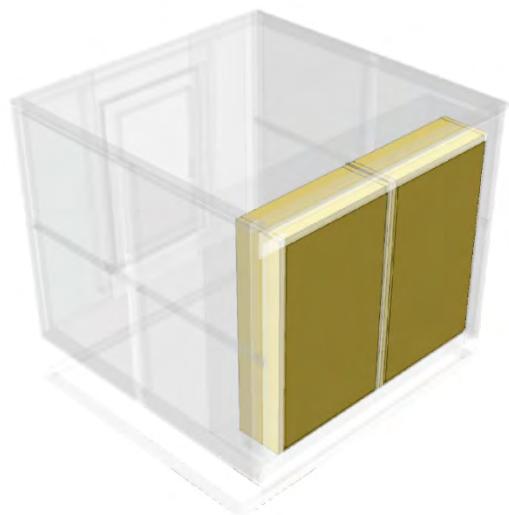


Abbildung 111 Vertikalschnitt durch ein BSP-Element im eingebauten Zustand

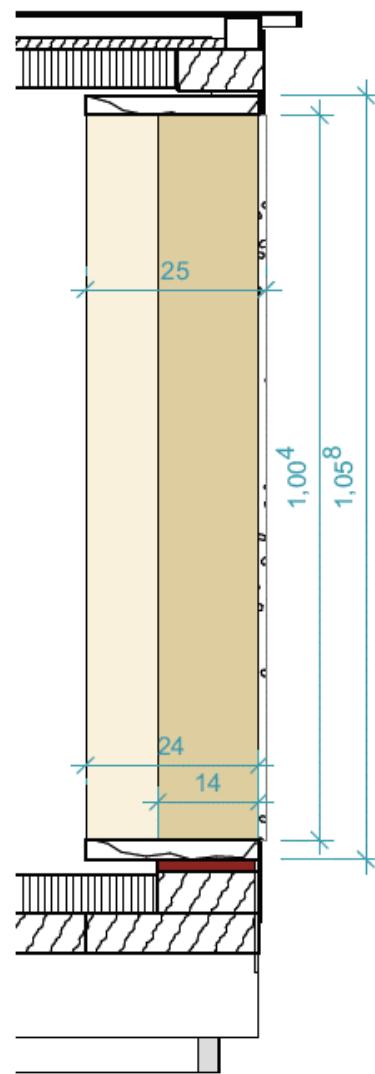


Abbildung 110 und Abbildung 111: eigene Darstellungen (Flexeder)

Ausführungsdetails des baukonstruktiven Umbaus der Testkuben auf der Solarstation

Demontage der bestehenden Kuben Ost und West

Bei der bestehenden Konstruktion handelte es sich um eine Rahmenkonstruktion, die mittels Metallwinkel, metrischen Schrauben und Muttern verbunden war. Zur Eckaussteifung wurden zusätzlich Querstreben aus Multiplex eingeleimt. Bei den Fassadenelementen handelt es sich um Eternitpaneelle, welche eingehängt und mit Hilfe von Edelstahlprofilen und Dichtgummistreifen an den im Holzrahmen sitzenden Rampamuffen fixiert wurden. Für diese Fixierung kamen Edelstahlschrauben zum Einsatz.

Abbildung 112

Teile der alten
Eternitbeplankung



Abbildung 113 Zustand der

alten Konstruktion - Rahmen



Abbildung 114 Montage der neuen

Bodenplatte



Abbildung 115

Montage neuer
OSB-Beplankung



Abbildung 112 bis Abbildung 115: eigene Darstellungen (Paulik)

Der Zustand der Rahmenhölzer wichen je nach Expositionsgrad stark voneinander ab. Zunächst wurden die Hüllelemente demontiert: Blechdach, Eternitfassadenelemente, pneumatisch gelagertes Türelement, Glasfront, Boden. Die dabei freigelegte Rahmenkonstruktion wurde erhalten, die eckaussteifenden Querstreben jedoch entfernt (Rahmen geschwächt). Die Dach- und Fassadenelemente wurden auf Schäden überprüft und bis zur Remontage eingelagert. Nach dem Lösen der Haltewinkel konnte der Rahmen von zwei Personen per Hand von der Stahlkonstruktion gehoben.

Montage der neuen Unterkonstruktion, Boden und innere OSB – Beplankung (18mm)

Es wurde eine neue Unterkonstruktion aus Konstruktionsvollholz (Kvh) direkt auf die Stahlkonstruktion montiert, wofür man die ursprünglichen Haltewinkel aus Aluminium wiederverwendete. Anschließend wurde der Holzrahmen wieder auf die Stahlkonstruktion gehoben und provisorisch mit der Bodenkonstruktion aus LVL (Laminated Veneer Lumber) durch den Rahmen verschraubt. Als innere Beplankung dienen OSB-Paneele, welche mittels zusätzlicher Halteleisten (Kanthölzer Fichte) montiert wurden, um eine mit dem Rahmen bündige Fläche für den Einbau der VIP-Elemente (Vakuumdämmung) zu erzeugen. Die OSB-Paneele wurden jeweils mit Eckausklinkungen versehen, die als Revisionsöffnungen der Rahmeneckverbindungen sollen, sodass die Blechverkleidung des Daches erneut entfernt werden könnte. Der Rahmen war teilweise verzogen, wodurch die Montage und Passgenauigkeit erschwert wurden, weshalb die OSB-Paneele untermaßig geschnitten werden mussten. Durch die Witterung unbrauchbar gewordene Rahmenteile – vor allem an den Ecken – wurden ausgebessert oder ersetzt.

Montage Rahmendoppel, Ständer für Fenster, Zusatzschwelle, Riegel, weitere Innenverkleidung und Außenfassade

Auf der Seite der Fassadenteile wurde ein Rahmendoppel aus LVL montiert, um die notwendige lichte Breite der Öffnung zu erreichen. Des Weiteren wurden eine Zusatzschwelle aus LVL und einer Siebdruckplatte sowie ein Riegel aufgedoppelt. Auf Seite des Fensters wurden zwei zusätzliche Ständer aus LVL eingesetzt, deren Zwischenraum – ebenso wie das Dach- von innen beplankt wurde. Daraufhin wurden die Eternitplatten an den Außenseiten, bis auf die Seite der Testelemente und der des Fensters, wiedereingesetzt. Abschließend wurde der Rahmen endgültig auf der Bodenkonstruktion befestigt und das Dachblech mittels der alten Verbinder remontiert. (Stahlwinkel, Gewindestange und Muttern).

Bau und probeweise Montage der Rahmen der Fassadentestelemente

Die Rahmenteile wurden formatiert, mit Dübelbohrern gebohrt, mit Dübeln versehen und anschließend verleimt und verschraubt. So soll die nötige Stabilität der Eckverbindung gewährleisten werden. Zwei Rahmen aus LVL wurden in die Öffnung gestellt und testweise verkeilt, um die Funktionalität der Befestigung zu überprüfen. Nach diesem Test wurden die zuvor im Baustofflabor gefertigten Rahmen mit den einzelnen Wandaufbauten versehen. Die Einzelteile der Füllungen wurden formatiert und eingebracht, wobei dies bei Teilen aus Holz maschinell mit Hilfe der Kreis- und Bandsäge, bei Dämmstoffen teilweise per Hand mit der Dämmstoffsäge vonstatten ging. Die Bestandteile werden nach dem Einbringen jeweils materialgerecht fixiert.

Abbildung 116
fertig beplankter
Innenraum



Abbildung 117 Testweises
Verklotzen zweier Rahmen



Abbildung 118 Detail der
provisorischen
Verklotzung



Abbildung 119 Finale
Verklotzung mittels
Schraubkeilen (KnieglTec)



Abbildung 116 bis Abbildung 119: eigene Darstellungen (Paulik)

Im Anschluss wurden die Übergänge zwischen Wandaufbau und Elementrahmen dampfdicht verklebt, die Randputzleisten aufgebracht und Auftrag der Putzschichten von Hand mit Hilfe einer Putzkelle durchgeführt. Am Ende erfolgte der Auftrag der jeweiligen Oberflächenbeschichtungen.

Installation der Vakuumisolationspanelee, Einbau Aluminiumskelet und Abkleben innen

In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma Variotech wurden die VIP-Elemente in die Kuben eingebracht. Die Revisionsöffnungen zu Montage des Dachbleches wurden dafür vorher abgeklebt. Die seitlichen Elemente wurden zuerst mit Fugendichtband umgeben und mittels eines PU-Klebers fixiert und das Deckenelement durch einen Putzmörtel an die oberen OSB-Platten geklebt. Der Putzmörtel erwies sich jedoch als ungeeignet und die Deckenpaneele werden ebenfalls mit PU-Kleber befestigt. Während der Trockendauer wurden alle Elemente verspreizt. Um die Dämmung zu gewährleisten wurden alle Stöße und Zwischenräume die sich aus der Montage ergaben mit Steinwolle ausgefüllt. Für das Innengerüst der Kuben wurden Standard ITEM-Profile verwendet (vorwiegend 40 mm x 40 mm). Das Gerüst stabilisiert die Vakuumdämmpaneele, stützt die eingebauten Fassadentestelemente und bietet zusätzlich Befestigungsmöglichkeiten für Sensoren. Direkt an den beiden Testelementen liegen die zwei kleinen 20 mm x 40 mm-Profile an. Die zwei 80 mm x 40 mm-Profile oben und unten leiten Druckkräfte der Fassadentestelemente dann in den Rahmen des Kubus.

Montage der Fenster

Die Fenster wurden zunächst mit dem Kran auf die Plattform gehoben. Daraufhin wurden die Fenster auf in der Dämmebene befindlichen Tragklötze positioniert und mit Hilfe von Montageankern in den Ständern aus LVL verschraubt. Nun wurden die Fensterflügel eingehängt und die Olive montiert, wobei dies um 90° gedreht erfolgte, sodass der Fenstergriff bei geöffneter Stellung senkrecht steht. Die das Fenster umgebenden Zonen wurden mit Mineralwolle gedämmt und außen mit Bitumenband versiegelt. Die Seiten wurden aufgedoppelt, um als Auflage für die Eternitplatten zu dienen. Zuletzt wurden die vorderen Eternitplatten wieder angebracht und ein Fensterverschluss, Spannhaken und Schlossern hinzugefügt.

Einbau der Testelemente

Die Versiegelung des Kubusrahmen erfolgte, indem die exponierte Seite vollflächig mit Bitumenband beklebt wurde. Das Bitumenband wurde dabei um die Ecke geführt, um von den Eternitplatten überlappt zu werden. Im Anschluss wurden die Rampamuffen, welche zur Befestigung der Halbleche erforderlich sind, eingebohrt. In diese wurden Gewindestangen eingebracht, auf welche die Halbleche gesteckt und mit Flügelmuttern reversibel befestigt werden können. Nachdem alle vorbereitenden Arbeiten abgeschlossen waren, erfolgte der feste Einbau der ersten Testelemente. Hierfür wurden diese zunächst mit dem Kran auf die Teststation gehoben, von Hand in die Öffnung gestellt und verkeilt. Die Regen- und Halbleche wurden in Verbindung mit Fugendichtband aufgebracht und durch Muttern und Spenglerschrauben gesichert. Innenseitig wurden die für die Montage nötigen Luftpalte abschließend mit Mineralwolle ausgedämmt und dampfbremzend verklebt.

Abbildung 120 Verklotzen des neuen Fensters in der Konstruktion



Abbildung 121 Abkleben des Fensterrahmens



Abbildung 122 Einsetzen des Fensterflügels



Abbildung 123 Fenster fertig abgedichtet



Abbildung 124 Bitumenabdichtung der Kubusflanken



Abbildung 125 Verblechung zum Witterungsschutz



Abbildung 126 Verschraubung der Bleche



Abbildung 127 Abgeschlossene Montage der Fassadenteilelemente, Außenansicht

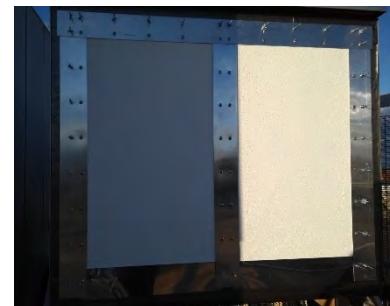


Abbildung 120 bis Abbildung 127: eigene Darstellungen (Paulik)

Durchführungen

Um die Kabel und Schläuche in den Kubus einzuführen, wurde pro Kubus je eine Platte vorgesehen, an welcher Verschraubungen angebracht wurden. Die Verschraubungen gewährleisten einerseits einen dichten Verschluss und sorgen auch für die Zugentlastung der Kabel. Für die Durchführung der Daten Kabel wurde ein mehrfach Dichteinsatz verwendet, welcher für insgesamt drei Kabel ausgelegt ist.

Abbildung 128 Aluminiumplatte mit Durchführung für 2x Luft-; 1x Strom-; 1x Datenleitung; 1x Reserveblindstopfen



Abbildung 129 Durchführungsplatte im eingebauten Zustand (Außenansicht)



Abbildung 128 und Abbildung 129: eigene Darstellungen (Kamml)

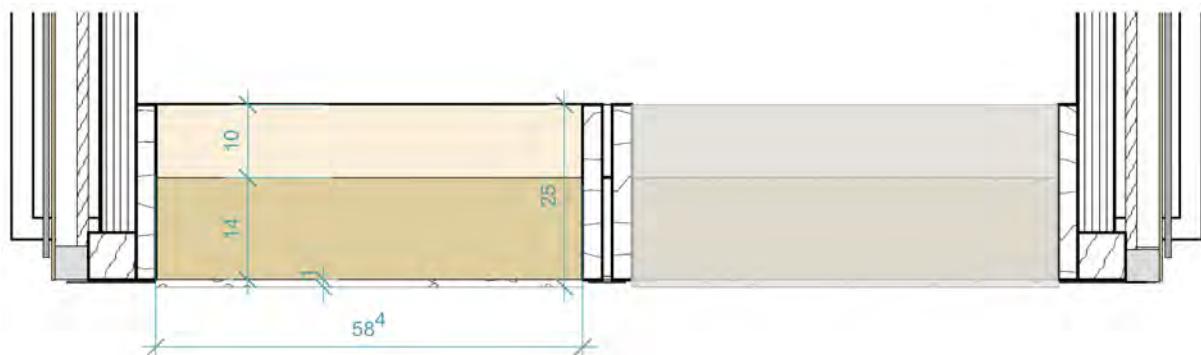
Systematisierung und Schichtenaufbau der Fassadentestelemente für die Messungen in Kubus Ost und West

Nina Flexeder

Bauteilaufbauten in Brettsperrholzkonstruktion

Die im Folgenden dargestellte Testelemente wurden für den Einbau in den Kuben Ost und West der Solarstation konstruiert. Sie sind so bemessen, dass jeweils zwei nebeneinander in die dafür vorgesehene Öffnung eingespreizt werden können, vgl. beispielhafter Horizontalschnitt in Abbildung 130. Den für die Langzeitmessungen gebauten Fassadentestelemente in Brettsperrholzkonstruktion, BSP_01 – 03, dient jeweils eine 100 mm starke Brettsperrholzplatte als tragende Schicht. Der Bauteilquerschnitt von BSP_01 entspricht dem Aufbau von Variante 1 der Simulationsstudie in Kapitel III, Abschnitt „Variantenstudie zur TAM-Beplankung via hygrothermischer Bauteilsimulation“. Darüber hinaus gleicht er dem Wandaufbau der vier Seitenwände des großen Testkubus in Kösching. Im Verlauf des Forschungsprojektes PhyTAB wurde das Testelement BSP_01 zunächst gleichzeitig mit BSP_02 (teilweise mit Modifikationen), sowie dann nach einem Umbau mit BSP_03 (teilweise ebenfalls mit Modifikationen) für Langzeitmessungen in Kubus Ost eingebaut, vgl. Kapitel V.

Abbildung 130 Horizontalschnitt durch die Einschuböffnung an einem Kubus



eigene Darstellung (Flexeder)

Brettsperrholzkonstruktion natur

| BSP_01 | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|---------------|---------------|---|---|
| natur | 100 mm | Brettsperrholz, 5-lagig, kreuzweise verleimt, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Papierträger sowie ergänzend im Kantenbereich mit Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | Binderholz BBS STEICO multi tape p STEICO multi tape f |
| | 140 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect M dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, Armierungsgewebe, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

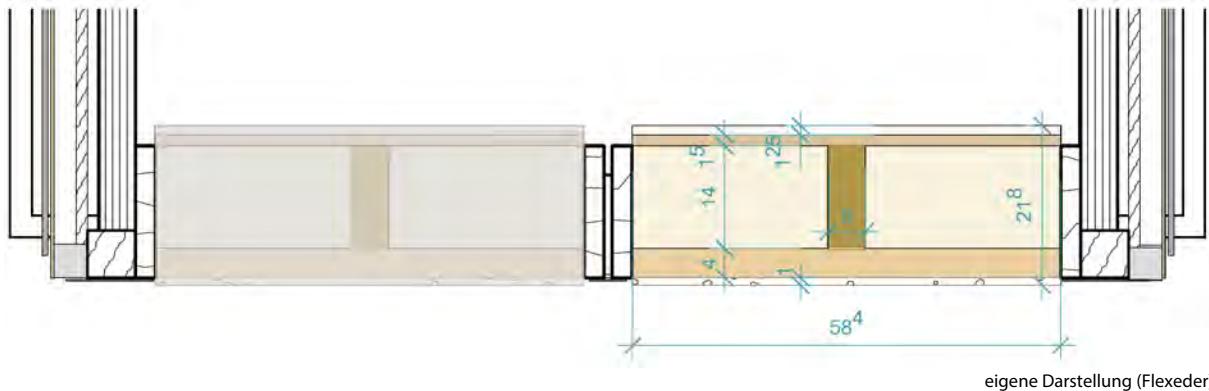
Brettsperrholzkonstruktion lasiert

| <i>BSP_02</i> | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|--------------------|---------------|---|--|
| <i>Lasur</i> | | 2-maliger Anstrich mit wasserbasierter, dünnsschichtiger und atmungsaktiver Holzlasur für den Innenbereich auf Basis einer Acrylatdispersion | Lignovit Interior UV100 |
| <i>Vgl. BSP_01</i> | 100 mm | Brettsperrholz, 5-lagig, kreuzweise verleimt, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Papierträger sowie ergänzend im Kantenbereich mit Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | Binderholz BBS STEICO multi tape p STEICO multi tape f |
| | 140 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect M dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, Armierungsgewebe, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

Brettsperholzkonstruktion mit Lehmbauplatte

| <i>BSP_03</i> | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|----------------------|---------------|--|--|
| <i>Lehmputz</i> | 1 mm | Lehm-Designputz als Farbputz ohne zusätzliche Pigmente oder Farbstoffe; mit Japankelle aufgezogen | CLAYTEC YOSIMA Designputz |
| | 2 mm | Einlagiger Lehm-Oberputz als Mörtel für Dünnlagenputz; mit Kelle aufgezogen; mit Schwammreibebrett abgerieben | CLAYTEC fein 06 |
| <i>Lehmbauplatte</i> | 22 mm | Schwere Trockenbauplatte aus Lehm | CLAYTEC LEMIX D22 |
| <i>Vgl. BSP_01</i> | 100 mm | Brettsperholz, 5-lagig, kreuzweise verleimt, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Papierträger sowie ergänzend im Kantenbereich mit Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | Binderholz BBS STEICO multi tape p STEICO multi tape f |
| | 140 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect M dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, Armierungsgewebe, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

Bauteilaufbauten in Holzrahmenleichtbaukonstruktion



Holzrahmenleichtbau mit Gipskarton, Kalkfarbanstrich

| HRLB_01 | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|---------------------|---------------|---|--|
| <i>Kalkfarbe</i> | | 2-lagiger Anstrich unverdünnt mit Innenwandfarbe (weiß) auf Kalkhydratbasis; 1-lagige Spezialgrundierung auf Kunstharz-Dispersion | GIMA Kalk-o-lith KLIM-PRO GIMA GK-Grund Basic |
| <i>Vgl. HRLB_02</i> | 12,5 mm | Gipskartonplatte, getackert, gespachtelt, grundiert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | Knauf Bauplatte GKB STEICO multi tape f Modulan 301 |
| | 15 mm | OSB/3, getackert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | SWISS KRONO Kompaktholz OSB3 STEICO multi tape f |
| | 140 mm | Gefachdämmung aus Holzfaser, flexibel mit Konstruktionsvollholz (Fichte) 50/140, Schwelle und Rähm aus Furnierschichtholz (LVL) 27/140, fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL-Rahmen | STEICO flex 038 STEICO LVL |
| | 40 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect H dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe Armierungsgewebe, Armierungsgewebe, und Siliconharz-Fassadenfarbe | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

Holzrahmenleichtbau mit Gipskarton, Dispersionsfarbanstrich

| HRLB_02 | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|-------------------------|---------------|---|--|
| <i>Dispersionsfarbe</i> | | 2-lagiger Anstrich unverdünnt mit Dispersionsfarbe (weiß) 1-lagige Hydrosol-Grundierung | HORNBACH Meister Polar Weiß HORNBACH Sicherheits-Tiefgrund |
| <i>Vgl. HRLB_01</i> | 12,5 mm | Gipskartonplatte, getackert, gespachtelt, grundiert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | Knauf Bauplatte GKB STEICO multi tape f Modulan 301 |
| | 15 mm | OSB/3, getackert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | SWISS KRONO Kompaktholz OSB3 STEICO multi tape f |
| | 140 mm | Gefachdämmung aus Holzfaser, flexibel mit Konstruktionsvollholz (Fichte) 50/140, Schwelle und Rähm aus Furnierschichtholz (LVL) 27/140, fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL-Rahmen | STEICO flex 038 STEICO LVL |
| | 40 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect H dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

Holzrahmenleichtbau mit Lehmputz I

| HRLB_03 | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|---------------------|---------------|---|--|
| <i>Lehmputz</i> | 2 mm | Lehm-Designputz als Farbputz ohne zusätzliche Pigmente oder Farbstoffe; mit Glätkelle aufgezogen und mit Japankelle geglättet | CLAYTEC YOSIMA Designputz |
| | 4 mm | Einlagiger Lehm-Oberputz als Mörtel für Dünnlagenputz; mit Traufe aufgezogen; Glasseydengewebe eingearbeitet | CLAYTEC fein 06 |
| | 10 mm | Einlagiger Lehm-Unterputz mit Stroh; mit h-Profil Kartätsche abgezogen | CLAYTEC Lehm-Unterputz mit Stroh |
| | 4 mm | Kammspachtel mit Lehmklebemörtel aus Lehm und Zelluloseanteilen als Armierungslage | CLAYTEC Lehmkleber |
| <i>Vgl. HRLB_04</i> | 20 mm | Putzfähige druckfeste Holzfaserplatte, getackert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | STEICO base STEICO multi tape f |
| | 15 mm | OSB/3, getackert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | SWISS KRONO Kompaktholz OSB3 STEICO multi tape f |
| | 140 mm | Gefachdämmung aus Holzfaser, flexibel mit Konstruktionsvollholz (Fichte) 50/140, Schwelle und Rähm aus Furnierschichtholz (LVL) 27/140, fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL-Rahmen | STEICO flex 038 STEICO LVL |
| | 40 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect H dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe Armierungsgewebe, | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

Holzrahmenleichtbau mit Lehmputz II

| HRLB_04 | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|---------------------|---------------|---|--|
| <i>Lehmputz</i> | 2 mm | Lehm-Designputz als Farbputz ohne zusätzliche Pigmente oder Farbstoffe; mit Glätkelle aufgezogen und mit Japankelle geglättet | CLAYTEC YOSIMA Designputz |
| | 4 mm | Einlagiger Lehm-Oberputz als Mörtel für Dünnlagenputz; mit Traufe aufgezogen; Glasseydengewebe eingearbeitet | CLAYTEC fein 06 |
| | 30 mm | Lehm-Unterputz mit Stroh (zwei Lagen); mit h-Profil Kartätsche abgezogen | CLAYTEC Lehm-Unterputz mit Stroh |
| | 4 mm | Kammspachtel mit Lehmklebemörtel aus Lehm und Zelluloseanteilen als Armierungslage | CLAYTEC Lehmkleber |
| <i>Vlg. HRLB_03</i> | 20 mm | Putzfähige druckfeste Holzfaserplatte, getackert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | STEICO base STEICO multi tape f |
| | 15 mm | OSB/3, getackert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | SWISS KRONO Kompaktholz OSB3 STEICO multi tape f |
| | 140 mm | Gefachdämmung aus Holzfaser, flexibel mit Konstruktionsvollholz (Fichte) 50/140, Schwelle und Rähm aus Furnierschichtholz (LVL) 27/140, fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL-Rahmen | STEICO flex 038 STEICO LVL |
| | 40 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect H dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe Armierungsgewebe, | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

Holzrahmenleichtbau mit Lehmputz III (ohne OSB)

| HRLB_05 | Schichtstärke | Aufbau (von innen nach außen) | Produkte |
|-----------------------------|-----------------------|--|--|
| <i>Lehmputz</i> | 2 mm | Lehm-Designputz als Farbputz ohne zusätzliche Pigmente oder Farbstoffe; mit Glätkelle aufgezogen und mit Japankelle geglättet | CLAYTEC YOSIMA Designputz |
| | 4 mm | Einlagiger Lehm-Oberputz als Mörtel für Dünnlagenputz; mit Traufe aufgezogen; Glasseydengewebe eingearbeitet | CLAYTEC fein 06 |
| | 30 mm | Einlagiger Lehm-Unterputz mit Stroh; mit Kelle angeworfen; abgerieben | CLAYTEC Lehm-Unterputz mit Stroh |
| | 4 mm | Kammspachtel mit Lehmklebemörtel aus Lehm und Zelluloseanteilen als Armierungslage | CLAYTEC Lehmkleber |
| <i>Putzträgerplatte</i> | 20 mm | Putzfähige druckfeste Holzfaserplatte, getackert, seitlich abgedichtet mit dampfbremsendem Klebeband auf Folienträger (sd-Wert laut Hersteller je: 4,5 m) | STEICO base STEICO multi tape f |
| <i>Gefach</i> | 120 mm (3 x 40 mm) | Gefachdämmung aus Holzfaser, flexibel mit Konstruktionsvollholz (Fichte) 50/140, Schwelle und Rähm aus Furnierschichtholz (LVL) 27/140, fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL-Rahmen | STEICO flex 038 STEICO LVL |
| | 20 mm | Putzfähige druckfeste Holzfaserplatte | STEICO base |
| <i>Vgl. HRLB_01 bis _04</i> | 40 mm | Putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte, fixiert mit je acht Schrauben und Tellerdübeln | STEICO protect H dry |
| | 10 mm | Grundspachtelung, Armierungsgewebe, mineralischer Oberputz und Siliconharz-Fassadenfarbe | STEICOsecure BASE STEICOsecure Mesh F STEICOsecure Render MR STEICOsecure Silco |

Entwicklung des übergeordneten Messkonzepts und Konfiguration der Messtechnik

Nina Flexeder; Michael Kamml

Anforderungen an das Messkonzept

Ziel der Langzeitmessungen ist es, die instationären Änderungen der innenseitigen Oberflächentemperatur verschiedener Wandkonstruktionen in Bezug auf Enthalpieeffekte:

- bereinigt von anderen überlagernden Effekten mit der erforderlichen Genauigkeit zu messen
- mit ausreichender Wiederholpräzision durch Simulation vorhersagen zu können
- daraus Schlüsse für eine intelligente Raumkonditionierung ableiten zu können.

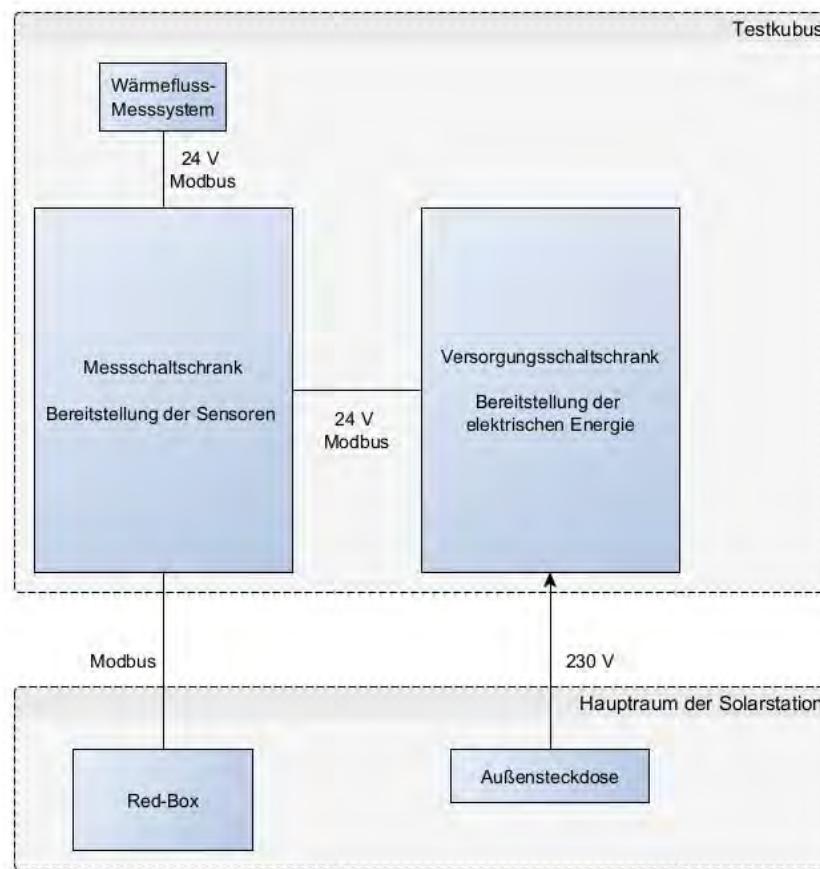
Voruntersuchungen im Labormaßstab (vgl. Abschnitt „Experimenteller Nachweis der Bauteilerwärmung durch Sorptionsenthalpie“) mit schlagartig herbeigeführten Feuchtesprüngen, also einem Erreichen des neuen Klimas innerhalb weniger Sekunden mit einem deutlich ausgeprägten Delta der Luftfeuchte von circa 20 – 40 %, haben gezeigt, dass sich die zu erwartenden Temperaturänderungen durch Sorptionsenthalpie in einem Bereich von maximal 1 - 2 Kelvin bewegen. Für die Änderungen der relativen Luftfeuchte unter realen klimatischen Bedingungen wird erwartet, dass diese unter anderem durch folgende Faktoren induziert werden:

- sukzessive Temperaturschwankungen im Tag-Nacht-Rhythmus mit einer Amplitude von circa 10 – 30 K
- schlagartige Erwärmung durch direkte Solarstrahlung auf lokale Stellen der Fassadentestelemente bzw. Verschattung durch Wolken / Geometrie des Testkubus
- schlagartige oder sukzessive Befeuchtung durch ein Luftbefeuchtungsgerät
- schlagartiger Luftwechsel durch Öffnen des Fensters und /oder mechanische Lüftung
- sukzessiver Luftwechsel durch mechanische Lüftung und ggf. Leckagen in der Konstruktion
- schlagartige oder sukzessive Temperaturerhöhung durch ein Heizgerät

Mess- und Versorgungskonzept für die Langzeitmessungen in den Testkuben

Sämtliche Mess- und Versorgungstechnik musste neu hergestellt und verlegt werden. Dazu wurde ein zweiteiliges Konzept erarbeitet, vgl. Abbildung 131. Die Elektrotechnik für Kubus Ost und Kubus West wurde je auf zwei Schaltschränke mit unterschiedlichen Funktionen aufgeteilt.

Abbildung 131 Zweiteiliges Mess- und Versorgungskonzept, schematisch dargestellt.



Eigene Darstellung (Kamml, Flexeder)

Um die Geräte im Kubusinneren zu versorgen, ist es notwendig, Stromkabel und Datenleitungen in den Kubus zu führen. Einflüsse von außen können jedoch die Messergebnisse verfälschen, deshalb wurden für die Einführung der Leitungen Verschraubungen genutzt, welche neben der Zugentlastung auch die Abdichtung des Kubus garantieren. Diese befinden sich unterhalb des Fensters. Von dort aus wird der Strom zum Versorgungsschalschrank geleitet. Dieser Schalschrank besteht aus Stahlblech und beinhaltet alle Teile mit 230 V Spannung, vgl. Abbildung 132. Dieser ist durch eine Elektrofachkraft überprüft, abgenommen und darf nur von Elektrofachkräften geöffnet oder verändert werden. Neben der Technik zur Messung der elektrischen Energie sind hier auch einzelne Schaltelemente untergebracht, über diese können das Heizgerät sowie der Luftbefeuchter gesteuert werden. Zudem versorgt der Versorgungsschalschrank auch die Messgeräte und das Belüftungsventil mit Energie.

Der sogenannte Redbrick stellt die zentrale Datenverarbeitungseinheit dar und ist im Hauptkubus in einer eigenen Box untergebracht. Aufgrund der hohen Rechenleistung des Bricks wird hier aktiv mit zwei Lüftern gekühlt. Die Datenanbindung des Messschalschrankes an diese „Red-Box“ erfolgt ebenfalls über das Bussystem (vgl. Abbildung 131). Durch die zentrale Unterbringung ist auch ein einfacher und robuster Remotezugriff auf das System möglich. Die gesamte Messtechnik wurde konsequent mittels Montageplatten und Tragschienensockel auf Standard 35 mm Tragschienen (Hutschienen) aufgebaut, vgl. Abbildung 133. Dieses

einheitliche System ermöglicht eine schnelle Reparatur bei Ausfällen und vereinfacht die Übersicht und Montage.

Die Verbindung zwischen Versorgungsschalschrank und Messschalschrank wird über ein Kabel mit Steckverbindung hergestellt. Über dieses werden sowohl Daten (RS485-Standard/Modbus RTU-Protokoll) als auch die Versorgungsspannung übertragen. Das Messsystem selbst basiert auf Sicherheitskleinspannung (SELF-System). Von dem Versorgungsschalschrank werden 24 V Gleichspannung (DC) bereitgestellt. Dieses Konzept erhöht die Sicherheit aller beteiligten Personen und erleichtert zukünftige Anpassungen auch durch nicht-elekrotechnisch geschultes Personal.

Der Messschalschrank enthält die Messtechnik und stellt Anschlüsse für die Sensoren bereit, vgl. Abbildung 134. Dieser Polyester-Schalschrank ist explizit für eine mögliche Systemerweiterung im Projektverlauf ausgelegt. Ergänzungen wie zusätzliche Öffnungen können mit einem gewöhnlichen Bohrer umgesetzt werden. Bei jeder Kabeldurchführung ist auf eine angemessene Zugentlastung und die Erhaltung der Schutzart IP56 zu achten, da das Schalschrankinnere unbedingt vor den hohen Luftfeuchten im Kubus zu schützen ist.

Abbildung 132 Versorgungsschalschrank mit Elementen zur gezielten Ansteuerung einzelner Geräte über die Außensteckdosen sowie jeweils getrenntem Verbrauchsmonitoring



**Abbildung 133
Brick-Stapel mit Montageplatte und Tragschiene**



Abbildung 134 Messschalschrank während des Aufbaus mit ausreichend Platz für zukünftige Erweiterungen.

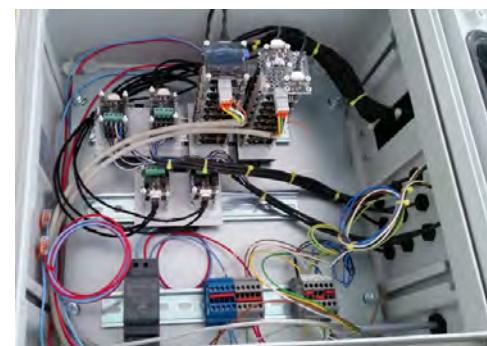


Abbildung 132 bis Abbildung 134: eigene Darstellungen (Kamml)

Im Messkubus werden zahlreiche Sensoren verbaut, deren Funktion sich inhaltlich in drei Gruppen untergliedern lässt: primär – sekundär – tertiär.

Die primäre Messgröße beantwortet die intrinsische Forschungsfrage des Forschungsteilprojektes. Sekundäre Messgrößen zeigen physikalische Zusammenhänge auf, welche die Änderung der primären unmittelbar bedingen. Tertiäre Messgrößen sind als reine Kontrollgrößen zu betrachten, sie dienen vor allem dem Ausschluss unbemerter Störungen des Systems. Für die Messung der Oberflächentemperatur (primär) sowie der Feuchtebestimmung im Material (sekundär) waren so weit keine technischen Lösungen vorhanden, welche den Anforderungen an Genauigkeit und Budget genügt hätten. Sie erforderten individuelle Lösungsansätze im Projekt und werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Weitere sekundäre Messziele sind die Messung des Wärmestroms innenseitig sowie die Luftfeuchtemessung in der Grenzschicht an der Bauteiloberfläche. Die Messung passiver thermischer Einflüsse, sowie die qualitative Untersuchung der Temperaturverteilung mittels Thermokamera wird zu den tertiären Messgrößen gezählt. Außerdem wird die Steuerung der aktiven Belüftung, Befeuchtung und Heizung im weiteren Sinne zu den tertiären MSR-Größen gezählt.

Primäre Oberflächentemperaturmessung: Konzept, Entwicklung und Bau

Als primäres Ziel der Messungen in Kapitel III und Kapitel V wird die Erwärmung bzw. Abkühlung der raumseitigen Bauteiloberfläche infolge von Wasserdampfsorption im instationären Verhalten dokumentiert. Je ausgeprägter die Luftfeuchteänderung ausfällt, desto deutlicher fällt die Temperaturänderung an der Oberfläche bei sonst gleichbleibenden Bedingungen aus. Die Enthalpiefreisetzung / -bindung infolge von sukzessiven Änderungen der relativen Luftfeuchte kann demnach nur durch sehr kleine Temperaturänderungen über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Zudem ergibt sich bei der Messung von Oberflächentemperaturänderungen durch Luftfeuchtesorption ein logischer Widerspruch per se: An eben jener Stelle, die ein Sensor selbst bedeckt, wird die Oberfläche keinen Wasserdampf sorbieren können. Dies bedeutet, dass sämtliche gemessene Oberflächenerwärmung grundsätzlich immer nur aus den umliegenden Bereichen stammen kann.

Für das Monitoring der Oberflächenerwärmung infolge von Wasserdampfsorption beziehungsweise analog der Abkühlung infolge von Desorption werden deshalb folgende Anforderungen an die zu verwendenden Sensoren gestellt:

- Messung der relativen Temperaturänderung mit mindestens einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ K
- Reduktion elektrotechnisch induzierter Messfehler soweit möglich
- Vermeidung von Sensorerwärmung durch anderweitige Wärmeübertragung, beispielsweise solare Einstrahlung oder Konvektion beim Heizbetrieb
- Möglichst kleine Auflagefläche, um den Fehler durch den logischen Widerspruch der Sorptionsflächenabdeckung möglichst gering zu halten
- Umsetzung innerhalb eines Kostenrahmens, der eine Vielzahl an Sensoren zur Kompensation der Varianz von Naturbaustoffen erlaubt.

Damit die geforderte Genauigkeit erreicht wird, wurden weiterhin auch die folgenden Aspekte bei der Entwicklung berücksichtigt:

- Sensor typ (PT1000)
- Leitungslängen (Kabelkompensation durch Vierleiteranschluss)
- Analog - Digitalwandler (Umrechnung und Kennlinie)
- Langzeit Messverhalten (Alterung des Sensorelements)
- Wärmeeintrag durch Leitungen (Kabelquerschnitt)
- Selbsterwärmung durch Messstrom (Fehlerbestimmung)

Zur Geometriefindung der Befestigung wurde die Methode des Rapid Prototyping genutzt, vgl. Abbildung 135 - Abbildung 138. Diese Methode erlaubt, das optimale Verhältnis von Krümmung und Einführwinkel zu ermitteln, um stabile Lötstellen bei gleichzeitigem Schutz vor Kondensation und möglichen Kurzschlüssen zu gewährleisten.

Abbildung 135 Draufsicht auf 3d-Modell mit Oberseite und Kabelauslässen

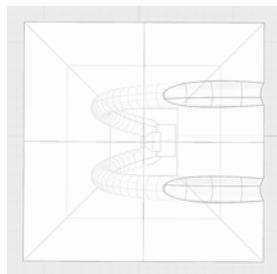


Abbildung 136 Ansicht Seite (halbtransparente Darstellung zeigt die knickfreie Kanalführung)

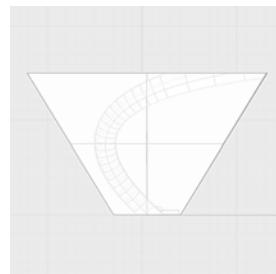


Abbildung 137 Ansicht Vorn, Darstellung des achsensymmetrischen Aufbaus

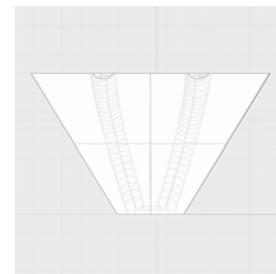
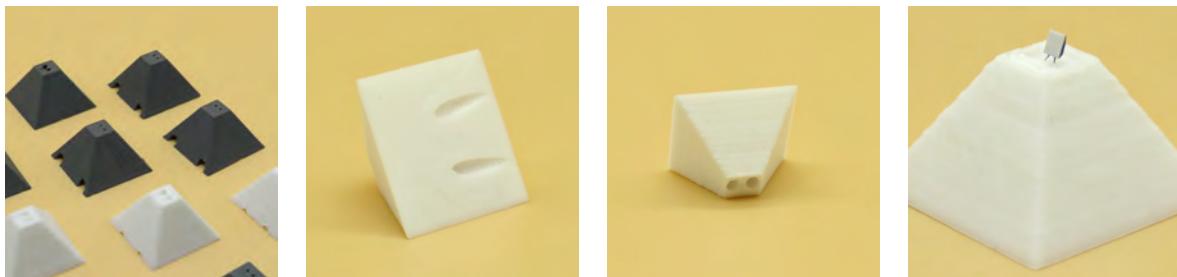


Abbildung 138 Perspektive mit unterseitiger Aussparung für Platinthermometer

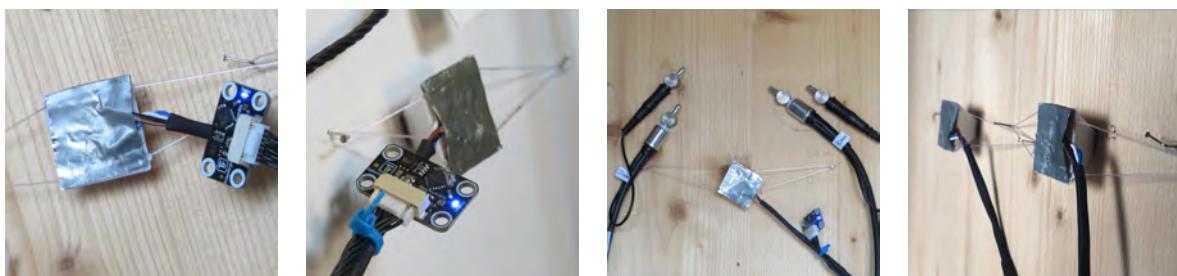


Abbildung 135 bis Abbildung 138: eigene Darstellungen (Flexeder)

Abbildung 139 Formfindung via Rapid Prototyping zur verbesserten Befestigung des PT-1000-Sensors (Spitze)


eigene Darstellungen: Entwicklung (Flexeder), Fotografie (Beck)

Zur Lösung der Problematik wird eine Geometrie in Form einer umgedrehten Pyramide mit innenliegender Kanalführung entworfen, vgl. Abbildung 139. Der Auflagebereich besteht dabei lediglich aus einem PT1000-Sensor mit den Maßen 2,3 mm x 2,1 mm x 0,9 mm. Um den Anschluss an ein 4-Leiter-Kabel zu verbinden, werden die je zwei Litzen durch einen Kanal gezogen, dann mit den Endstücken des Platinthermometers verlötet und nach Erkalten wieder auf Anschlag zurückgezogen. Ein nachträglich mit der Feindosierspitze eingebrachter Tropfen Kunstharzkleber (UHU Plast Special) verschließt die Kanäle. Anschließend wird das Areal unterhalb des PT1000-Sensors mit einem kleinen Abschnitt (circa 7 mm x 7 mm) Alubutylklebeband abgedichtet. Dasselbe Klebeband kann später bei der Montage verwendet werden, um die große, raumseitige Fläche (circa 25 mm x 25 mm) ebenfalls abzudichten, vgl. Abbildung 140. Die Fixierung am horizontalen Testelement erfolgt durch zwei aufgespannte Nylonfäden, die mithilfe von Nadeln auf der Oberfläche befestigt werden. Durch die Alukaschierung werden diese mit der Polycarbonatpyramide verklebt. Zudem wird durch eine Reflexion einfallender Strahlung bewirkt.

Abbildung 140 Einbausituationen der fertigen Hülle mit Sensor zur Messung der Oberflächentemperatur


eigene Darstellungen: Entwicklung (Flexeder), Fotografie (Flexeder, Beck)

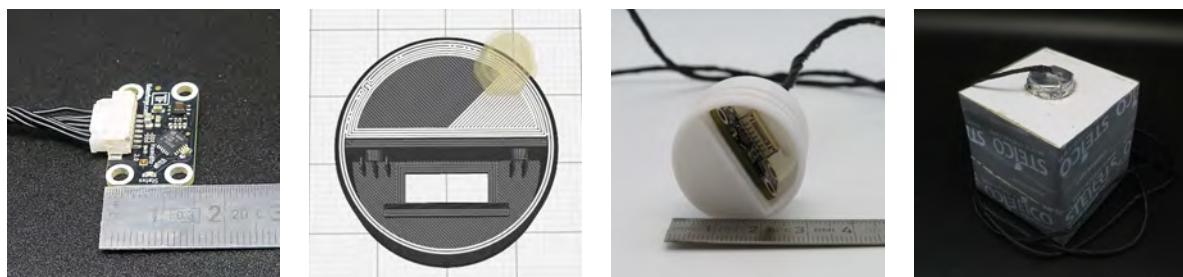
Die finale Geometrie kann aus Polycarbonat mit circa 3 g Filament im 3D-Drucker hergestellt werden. Nach sorgfältiger Abwägung wurde sich gegen eine Patentierung der Geometrie entschieden. Die zur Replikation nötigen Dateien werden unter dem Leitgedanken von open-source und einem aktiven Forschungsdatenmanagement allen Interessenten über den Publikationsserver der Technischen Universität München zur Verfügung gestellt (Flexeder, 2022b), DOI: 10.14459/2022mp1651103.

Sekundäre Feuchtemessung im Bauteilquerschnitt: Konzept, Entwicklung und Bau

Während die Messung der Temperaturänderungen an der innenseitigen Bauteiloberfläche ein primäres Ziel der Kapitel III und V darstellt, ist die simultane Messung der entsprechenden Feuchtegehalte ein sekundäres Messziel. Sie dient vor allem dazu, rückwirkend die Plausibilität der Simulationsergebnisse zu Feuchtetransport und –speicherung im Bauteilquerschnitt überprüfen zu können.

Da die zu untersuchenden Wandaufbauten eine Vielzahl von Baumaterialien enthalten, deren elektrischer Materialwiderstand nicht als einheitlich angenommen werden kann, wird auf die Feuchtebestimmung via sorptiver Messung zurückgegriffen (auch „hygrometrische Messmethode“ genannt). Dies bedeutet, dass in einer definierten Schichttiefe eine kleine, abgeschlossene Luftkammer in das Material gebohrt wird und anstelle des Wassergehalts des Baustoffs, der Wassergehalt der darin eingeschlossenen Luft gemessen und dann auf die dementsprechende Ausgleichsfeuchte des Materials rückgeschlossen wird. Als Sensoren werden Kombifühler (T, RH) mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$ und $\pm 2\%$ relativer Luftfeuchte verwendet. Für die Einbringung werden eigene Hüllen aus Kunststoff entworfen und im 3-D-Druckverfahren gefertigt, vgl. Abbildung 141. Zur Entwicklung der optimalen Geometrie, Materialwahl und der dampfdichten Abklebetechnik werden im Vorfeld zahlreiche Versuche mit schlagartigen isothermen Luftfeuchtesprüngen gefahren.

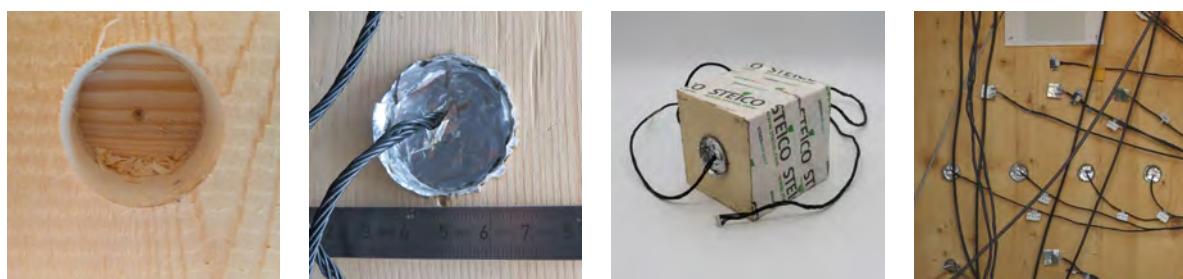
Abbildung 141 Entwicklung einer Hülle für den Kombisensor zur hygrometrischen Materialfeuchtebestimmung



eigene Darstellungen: Entwicklung (Flexeder), Fotografie (Flexeder, Beck)

Das Ergebnis ist ein zylinderförmiger Körper aus Polycarbonat ($d = 30 \text{ mm}$), in welchen das vorgefertigte Bricklet (Humidity Bricklet 2.0, Tinkerforge) eingerastet wird. Der eigentliche Sensor befindet sich am mittig am Rand der Öffnung. Zur dampfdichten Abklebung sowohl innenseitig im Bohrloch, sowie der raumseitigen Hüllenoberfläche, wird Aluminiumbutylklebeband verwendet, vgl. Abbildung 142. Tests mit Abklebungen auf dampfdichte Glasoberflächen zeigen, dass die Abdichtung am 7-Pol-Stecker des Sensorkabels die Schwachstelle für Undichtigkeiten und damit Messfehler darstellt. Wird hier das Klebeband mit hohem Anpressdruck und Präzision angebracht, so zeigen die Tests, dass sich die Messgenauigkeit, welche durch ungewollte Wasserdampfdiffusion entsteht, auf ein Minimum beschränken lässt.

Abbildung 142 Erprobung und Einbau der Sensoren zur hygrometrischen Holzfeuchtebestimmung in verschiedenen Tiefen des Bauteilquerschnitts



eigene Darstellungen: Entwicklung (Flexeder), Fotografie (Flexeder, Beck)

Zur Formfindung kamen auch hier die Methoden des Rapid Prototyping zum Einsatz. Die so entwickelte Sensorenhülle kann aus Polycarbonat mit circa 7 g Filament im 3D-Drucker hergestellt werden. Die zur Replikation nötigen Dateien werden unter dem Leitgedanken von open-source und einem aktiven Forschungsdatenmanagement allen Interessenten über den Publikationsserver der Technischen Universität München zur Verfügung gestellt (Flexeder, 2022a), DOI: 10.14459/2022mp1651104.

Zur Entfernung der eingeklebten Sensorhülle wird empfohlen, zunächst vorsichtig sämtliches Alubutylklebeband zu entfernen und anschließend das Kabel abzuziehen. Durch Eindrehen einer längeren Schraube in den opaken Halbkreis der Hülle kann jene dann einfach mit einer Zange und leichter Drehbewegung wieder herausgezogen werden. Dieses Vorgehen ermöglicht die Wiederverwendung des Sensors für weitere Testelemente.

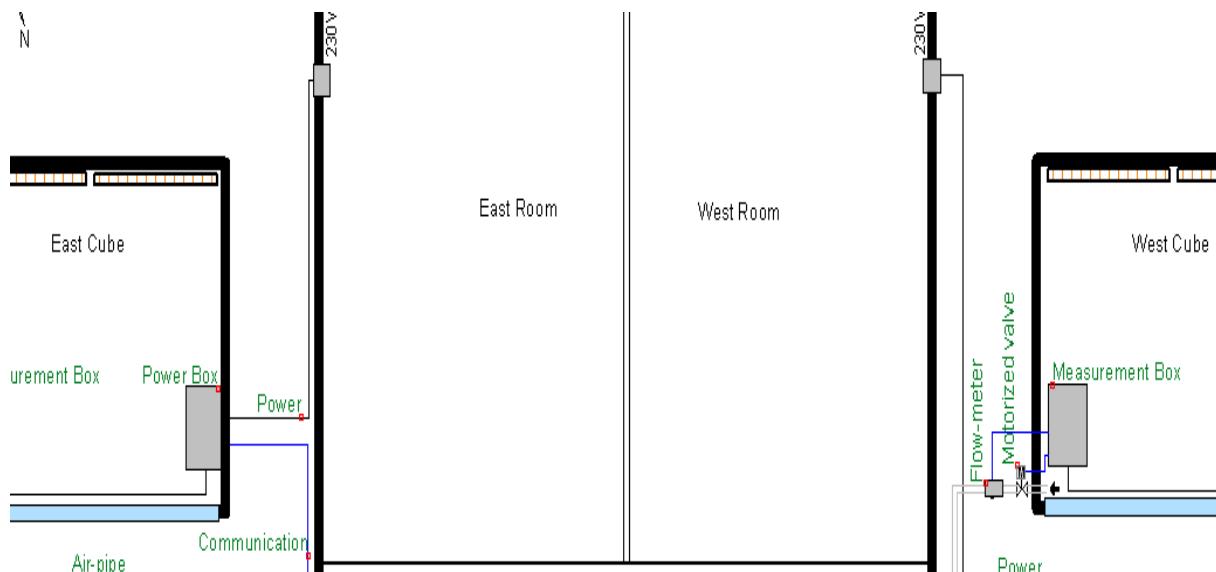
Messkonzept: Übersicht über die Stromversorgung, die Installation, Konfiguration und die Programmierung der Messgeräte in Kubus Ost und West

Ahmad Nouman; Christian Hepf

Übersicht der verwendeten Messgeräte

Um Testkuben zu bauen, die in der Lage sind sehr kleine Abweichungen im hygroskopischen Verhalten eines Materials zu messen, wurden, anstatt komplett neue Teststände zu errichten, zwei bestehende Testkammern auf dem Dach der Technischen Universität München modifiziert. Die Solarstation umfasst einen großen Hauptaum mit zwei 1-1 Messräumen sowie zwei zusätzliche kleinere Testkuben. Die beiden identischen Testkuben auf der Ost- und Westseite der Solarstation sind sehr gut geeignet, um das Verhalten von hygroskopischen Materialien unter realen Umgebungsbedingungen zu analysieren. Die Testumgebung in den Kuben wird durch die Kombinationen von Heizung, Befeuchtung, Belüftung, internen Wärmequellen und der äußeren Randbedingungen durch das lokale Wetter beeinflusst. In einigen Experimenten werden die Wetterbedingungen des freien Außenraums genutzt, um die gewünschten Umwelteffekte im Inneren der Testkubus zu verstärken und zu analysieren (z. B. solare Gewinne, Fensterlüftung etc.).

Abbildung 143 Schematische Darstellung der Testanlage (Solarstation, Technische Universität München) (eigene Darstellung)

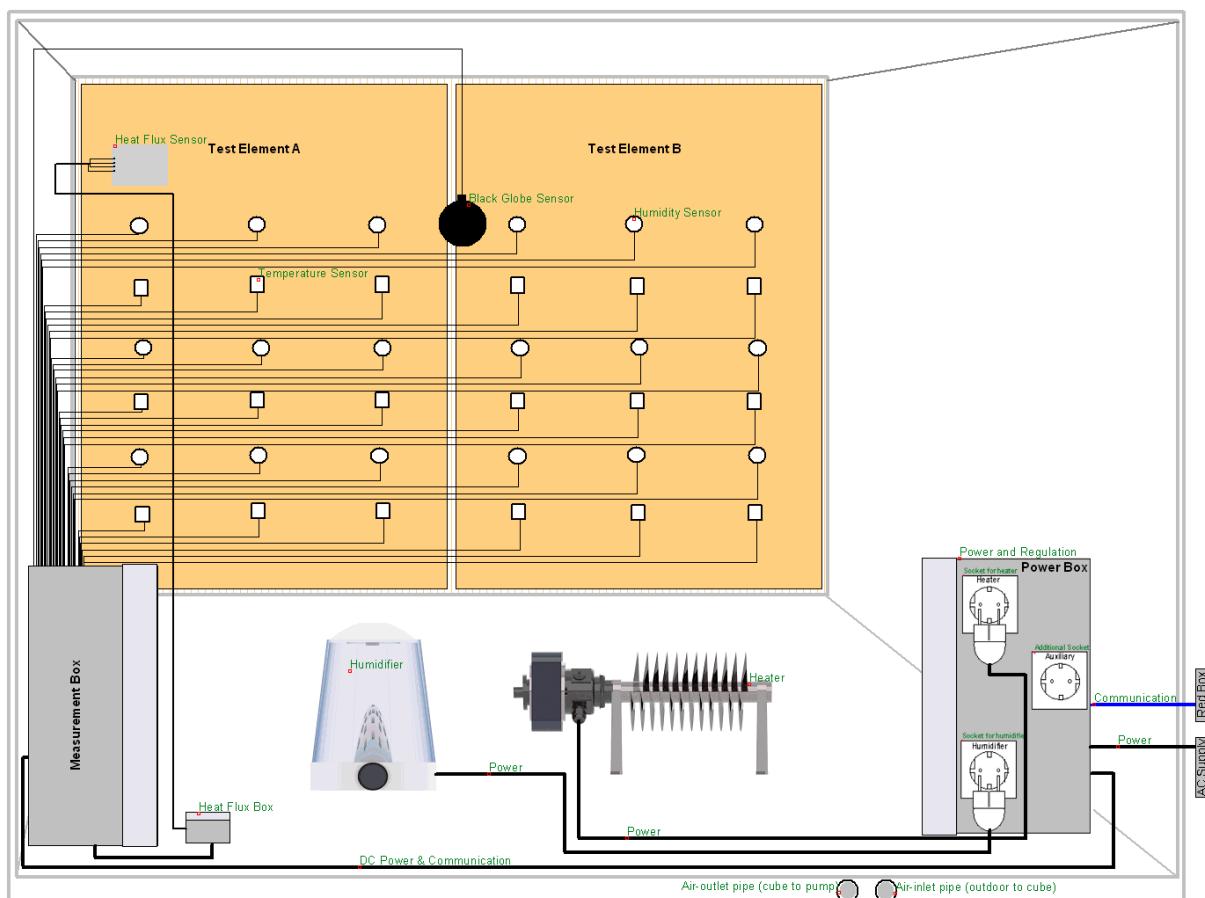


Im aktuellen Aufbau kann jeder Testkubus das Verhalten von mindestens zwei Testelementen gleichzeitig aufzeichnen und analysieren. Die Orientierung (entlang der horizontalen und vertikalen Achse) jedes Kubus kann entsprechend den Anforderungen der Experimente eingerichtet werden. Individuell enthält jeder Kubus folgende Messgeräte und Sensoren:

- 3 x funktional getrennte Boxen
- Messsensorkasten
- Stromversorgungskasten
- Wärmestromkasten
- 15 x Oberflächentemperatursensoren
- 23 x Feuchte- und Temperatursensoren
- 1 x Schwarzlicht-Temperatursensor
- 3 x Barometer

- 2 x Umgebungslichtsensoren
- 1 x Wärmeflussplatte inkl. Temperatursensor
- 1 x Wärmebildkamera
- 1 x Lastsensor
- 3 x Stromverbrauchszähler inkl. Stromwandlerzangen (Current Transformer clamp (CT))
- 1 x Echtzeituhr (Real-Time Clock (RTC))
- 1 x LED-Display
- 1 x AC/DC-Wandler
- 1 x Konvektions-/Strahlungsheizgerät
- 1 x Luftbefeuchter

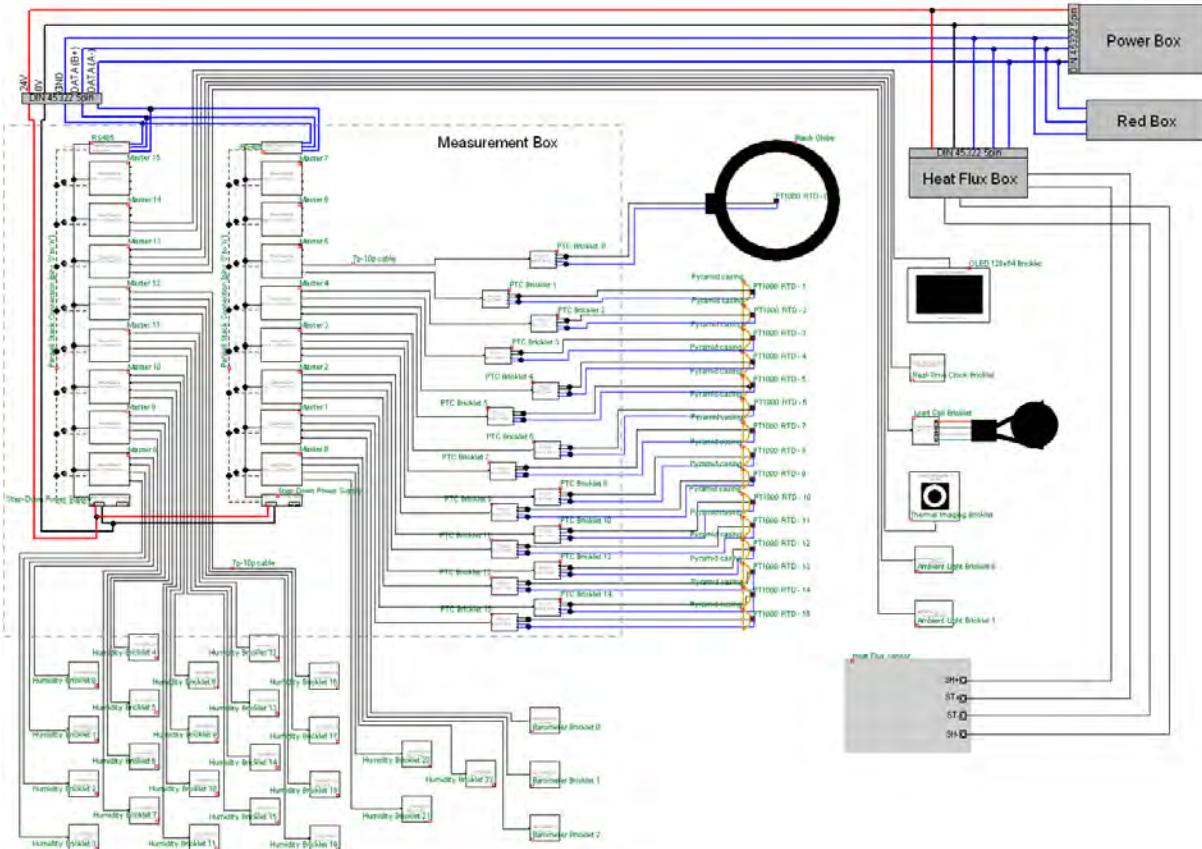
Abbildung 144 Frontansicht eines Testkubus mit den Funktionsboxen, Übersicht über die Anordnung der Sensoren und der aktiven Systeme (eigene Darstellung)



Jeder Testwürfel enthält einen Messsensorkasten, in dem die Mikrocontroller und die an die Sensoren angeschlossenen Signalwandler untergebracht sind. Die gesamte Elektronik in und an den Messboxen wird mit Gleichstrom versorgt. Die Mikrocontroller in diesem System haben vier Steckplätze zum Anschluss des Sensors, des Signalwandlers und der Aktoren. Um die Daten von den Sensoren oder zu den Aktoren zu übertragen, kann der Anwender den USB-Anschluss des Mikrocontrollers nutzen. Diese Mikrocontroller sind mit speziellen Stacking-Pins ausgestattet, die es ermöglichen, Control-Cluster von bis zu neun Mikrocontrollern in Reihe zu schalten. Für die serielle Kommunikation zwischen den Control-Clustern, die sich

im Mess-, im Stromversorgungs- und im Wärmeflusskasten befinden, wird das RS-485-Protokoll verwendet. Jeder Mikrocontroller bzw. jedes Mikrocontroller-Cluster kann entweder über den USB-Anschluss oder über ein Modul, welches sich am unteren Teil des Control-Clusters befindet, mit Strom versorgt werden.

Abbildung 145 Schematische Abbildung des Messkastens in Verbindung mit den individuellen Sensoren (eigene Darstellung)



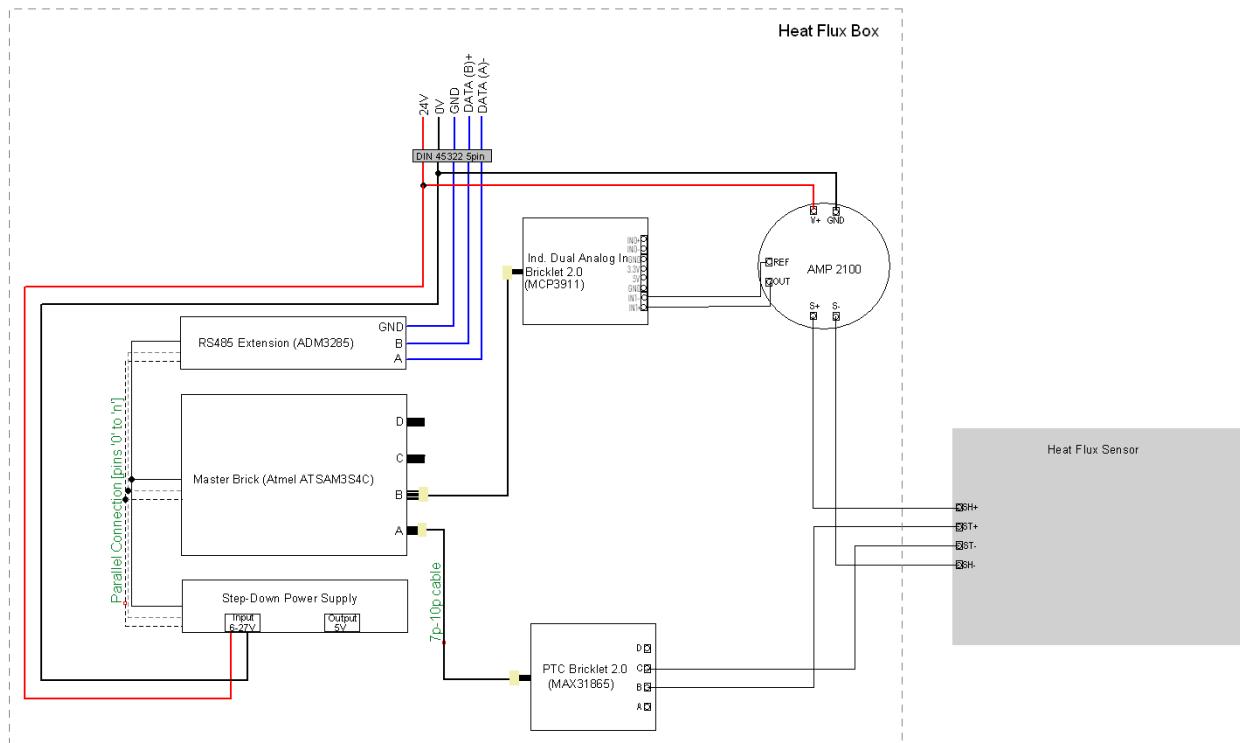
Um die Feuchtigkeitsschwankungen in den Bauteilen zu bestimmen, werden relative Feuchtesensoren (HDC1080) mit einer typischen Genauigkeit von $\pm 2\%$ in 3D-gedruckte, zylindrischen Schalen gekapselt, die in unterschiedlich Schichttiefen der Testelemente platziert werden können, für Details siehe Abschnitt „Sekundäre Feuchtemessung im Bauteilquerschnitt“. Die Temperaturunterschiede in diesen Schichten können durch den eingebauten Temperatursensor (typische Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$) auf jedem Feuchtechip untersucht werden (Texas Instruments Inc., 2015). Um die Oberflächentemperaturen an mehreren Stellen der Testelemente auszuwerten, werden 4-Leiter-Kabel an Platin-Widerstandsthermometer (M 222, Typ: pt1000, Genauigkeit: $\approx \pm 0,1^\circ\text{C}$, Klasse: 1/3 B, DIN EN 60751:2009-05) gelötet (Heraeus Nexenos GmbH, 2019). Diese sehr kleinen Temperaturchips ($2,3 \text{ mm} \times 2,1 \text{ mm} \times 0,9 \text{ mm}$) werden auf speziell entwickelten 3D-gedruckten Pyramiden befestigt, um sie auf den Oberflächen der Testelemente zu montieren, für Details siehe Abschnitt „Primäre Oberflächentemperaturmessung: Konzept, Entwicklung und Bau“. Die Umwandlung des Widerstands in ein digitales Signal erfolgt durch den RTD-Digital-Wandler (MAX31865), um ein kompatibles Signal an die Mikroprozessoren zu übertragen (Maxim Integrated Products Inc., 2012).

Um die operative Temperatur messen zu können, werden in jedem Kubus ein pt1000 RTD in eine mattschwarze Kupferkugel (50 mm Durchmesser) eingeschlossen und in der Mitte des Raumes aufgehängt. Um die von jedem Kubus eintreffende Strahlung zu vergleichen, werden (LTR-329ALS-01) digitale Umgebungslichtsensoren mit einem Dynamikbereich von 0,01 Lux bis 64000 Lux im Kubus platziert (Lite-On Technology Corp. / Optoelectronics). Außerdem wird der Kubus mit einem digitalen Ausgangsbarometer (LPS22HB) und einem Druckbereich von 260 bis 1260 hPa ausgestattet (STMicroelectronics, 2016). Neben dem

Luftdruck liefern diese Barometer auch Temperatur- und Höhendaten. Um die Datenlogs bei Stromausfall auf dem aktuellen Stand zu halten, ist jeder Testkubus mit einer CMOS-RTC (PCF85263A) ausgestattet, welcher über eine I2C-Schnittstelle kommuniziert und über ein 7p-10p-Kabel mit dem Mikrocomputer verbunden ist (NXP Semiconductors N.V., 2021). In beiden Messkästen befindet sich ebenfalls ein OLED-Display (ELO-OLED013-1) zur dynamischen Beobachtung der Werte der aktiven Systeme (EastRising Technology Co., 2012). Ein Lastsensor (HX711) wird verwendet, um die Gewichtsdifferenz bestimmter Testblöcke von trockenen zu feuchten Bedingungen in den Testkuben zu ermitteln (AVIA Semiconductor). Zudem wurden in den Testkuben eine FLIR Wärmebildkamera hinzugefügt, um die Temperaturunterschiede an den Prüfmaterialien visuell verzeichnen zu können (FLIR Systems, 2016).

Eine starre Wärmestromplatte (Phymeas 7T, Größe: 120 mm x 120 mm, aktive Fläche: 90 mm x 90 mm) wurde mehrfach auf der Oberfläche der getesteten Elemente angebracht, um deren thermisches Verhalten weiter analysieren zu können (Phymeas GbR). Durch einen Plug-and-Play-Mechanismus für den Wärmestromsensor sind die Temperatursignaldrähte unabhängig voneinander an einen RTD-Digitalwandler (MAX31865) angeschlossen. Um die Wärmestromwerte zu interpretieren, wird das analoge Signal mit einem Verstärker (AMP2100) unterstützt und leitet das Signal an einen Zweikanal-AFE (MCP3911) weiter (greenTEG AG, 2018; Microchip Technology Inc., 2012). Beide Signale werden an einen speziellen Mikroprozessor weitergeleitet, der über den seriellen Kommunikationsstandard (RS-485) mit dem Hauptsystem kommuniziert. Dieses modulare System kann im Messkasten jedes Kubus eingesteckt werden, um Strom zu erhalten und die gemessenen Temperatur- und Wärmestromdaten zu protokollieren.

Abbildung 146 Schematische Abbildung des Wärmestromkastens inkl. der angebrachten Sensors (eigene Darstellung)



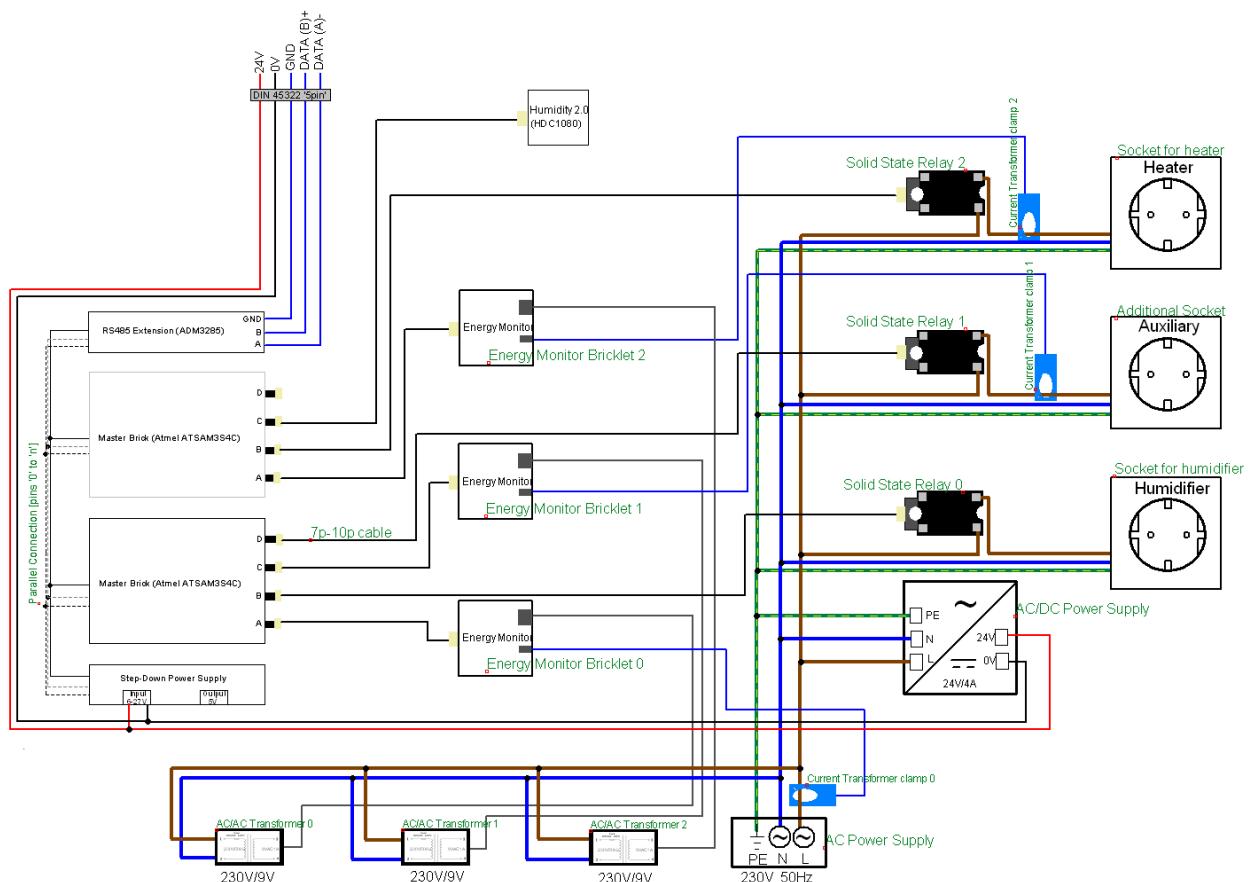
Zusätzlich wurde in jedem Testkubus ein Stromversorgungskasten eingebaut, welcher die folgenden Aufgaben erfüllt:

- Wechselstrom-Stromversorgung für die aktiven Systeme
- Umwandlung von Wechselstrom-Strom in Gleichstrom-Strom
- Versorgung des Messkastens und der integrierten Schaltkreise mit Gleichstrom-Strom

Aufzeichnung des Energieverbrauchs des gesamten Systems

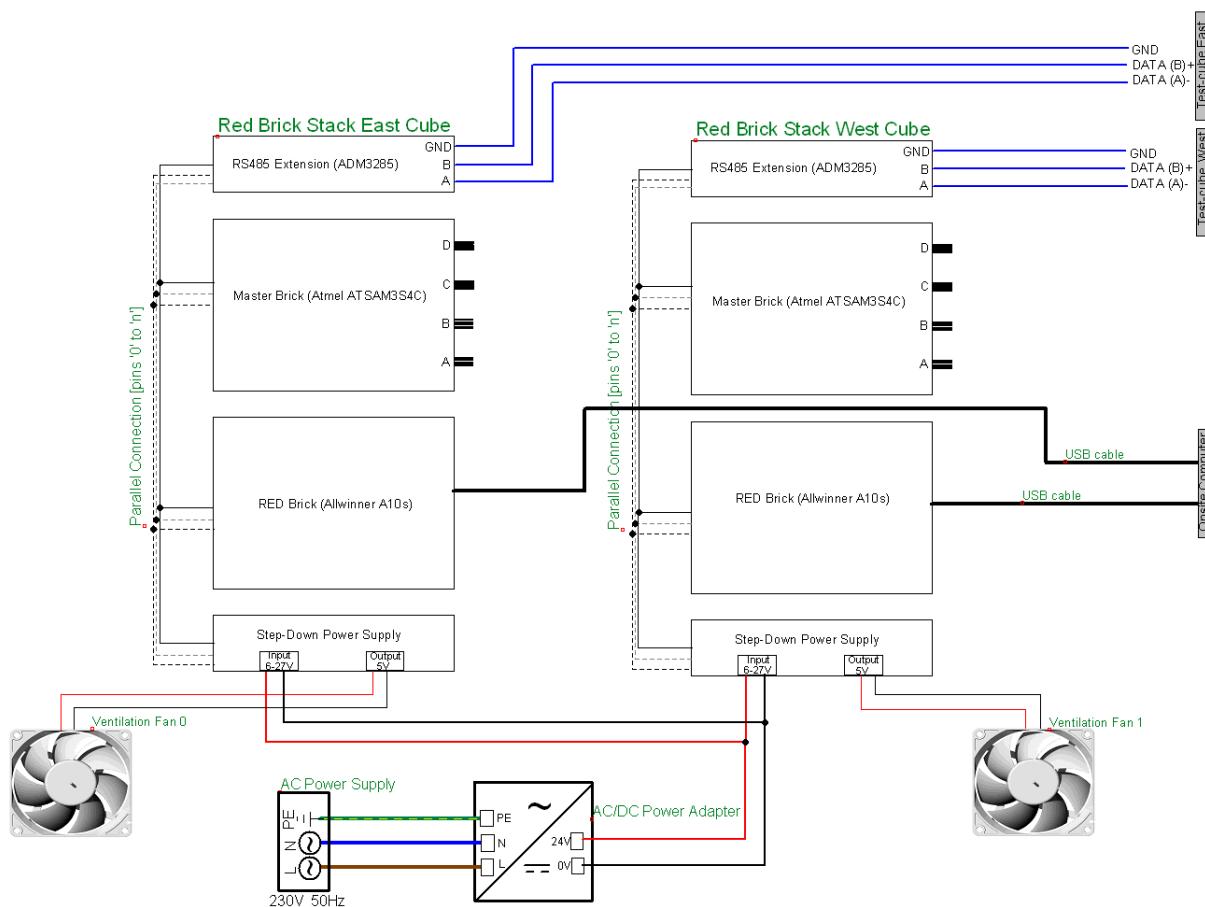
Die aktiven Systeme (Heizung und Befeuchter) jedes Kubus sind einzeln an einen SSR (KS15) im Stromversorgungskasten angeschlossen, welche durch ein PWM-Signal gesteuert werden (Xiamen Jinxinrong Electronics Co., Ltd). Zur Kontrolle der Luftfeuchtigkeit im Inneren des wasserdichten Stromversorgungskastens ist ein Feuchtigkeitssensor integriert. Zur Messung des elektrischen Energieverbrauchs der Systeme werden drei Energieverbrauchsmesser mit Stromwandlungsklemmen eingesetzt (XiDi Technology, 2015). Die Energieverbrauchsmesser benötigen jeweils einen AC/AC-Spannungstransformator, um die 230-Volt-Versorgung auf 9 Volt herunterzutransformieren. Die Stromzangen werden an den stromführenden Draht (L) der elektrischen Versorgungskabel an drei Stellen angeklemmt: An der Hauptversorgung, an der Steckdose für die Heizung sowie an der Hilfssteckdose. Beide Testkuben werden separat über IoT (Internet of things) Smart Plugs mit Strom versorgt, damit alle Geräte remote ein- und ausgeschaltet und somit die Experimente aus der Ferne geregelt werden können.

Abbildung 147 Schematische Abbildung des Stromversorgungskastens inkl. Steckdosen für die aktiven Systeme (eigene Darstellung)



Die Daten aus den Testkuben werden an ihre dedizierten Mikrocomputer weitergeleitet (Prozessor: Allwinner A10s, Cortex A8 1GHz, 3D Mali 400 GPU, NEON/Speicher: 512MB DDR3 SDRAM, Micro-SD-Card als Flash), welche in der „Red Box“ im Hauptaum der Solarstation untergebracht sind. Diese Mikrocomputer enthalten jeweils einen Master-Node (Mikrocontroller) für die serielle RS-485-Kommunikation in den jeweiligen Netzwerken, d.h. den Testkuben West und Ost. Auf der SD-Karte (Secure Digital) der Mikrocomputer befindet sich das benötigte Software-Image. Dieses wird für die Datenspeicherung und das Ausführen des Python-Skripts für Mess-, Steuer- und Regelstrategie verwendet. Darüber hinaus werden auf diesem Wege die Datenprotokolle angewendet und gespeichert. Auf jene Daten kann gleichzeitig über einen lokal installierten Desktop-Computer zugegriffen werden. Per Remote kann somit zu jedem Zeitpunkt flexibel auf die Messdaten der Testreihen zugegriffen werden.

Abbildung 148 Schematische Abbildung der „Red Box“ (eigene Darstellung)



Zusammenfassung des Python-Skripts für das Mess-, Steuer und Regelungssystem

Das Skript der Mess-, Steuer- und Regeltechnik ist in Python 3 geschrieben. Alle Sensoren und Aktoren im System haben eine eindeutige Kennung, welche durch exklusive Befehle in den Libraries weitergeleitet werden, um die Daten jedes Sensors separat abrufen zu können. Zunächst wird eine Log-Datei (.csv-Format) erstellt und mit dem Datum der Erstellung versehen. In dieser Datei werden die Sensordaten geschrieben und abgespeichert, bis das Programm heruntergefahren oder neu gestartet wird. Bei einem Neustart des Computers, startet das Programm ebenfalls automatisiert neu und schreibt und speichert erneut die Sensordaten in die Log-Datei, sofern sich das Datum nicht verändert hat. Wenn der Neustart des Computers an einem anderen Tag als dem Erstellungsdatum der Logdatei erfolgte, wird eine neue Log-Datei erstellt und verwendet. Auf diese Weise werden verschiedene Logs erstellt, um Experimente, die an verschiedenen Tagen des Jahres durchgeführt werden, einfacher trennen zu können.

Die Log-Dateien schreiben in der ersten Zeile, durch ein Semikolon getrennt, zunächst das Datum und die Uhrzeit und anschließend die einzelnen Sensornamen. In den darauffolgenden Zeilen wird zunächst das aktuelle Datum und die Uhrzeit verzeichnet und anschließend in die entsprechenden Sensorspalten die individuellen Sensorwerte eingetragen.

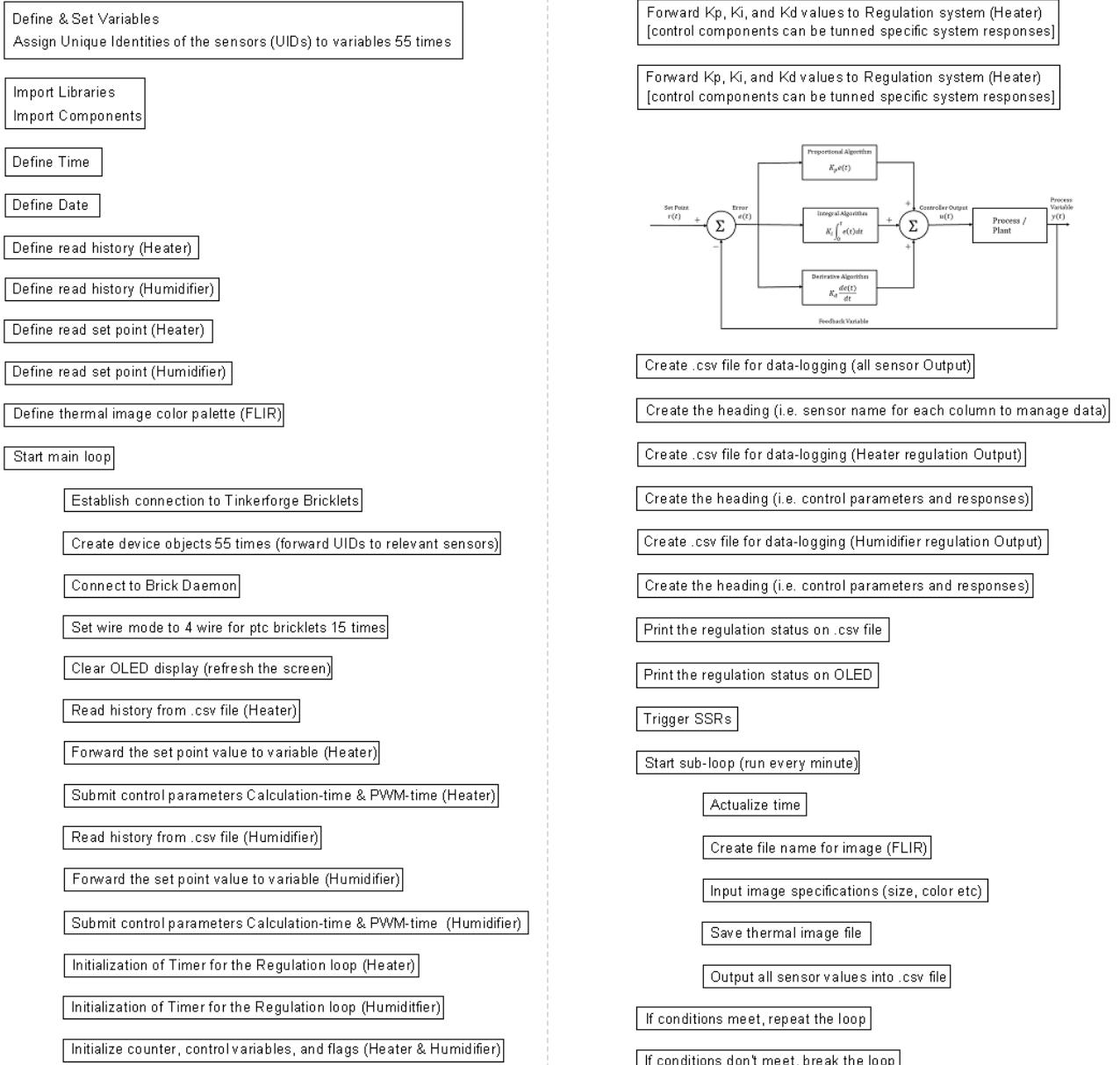
Für die Regelung gibt es separate Regelungsdateien (.csv-Dateien), welche von dem Python Skript eingelesen werden. Das Programm öffnet die Datei, vergleicht das aktuelle Datum und die Uhrzeit mit denen in der Regelungsdatei (.csv-Datei) und springt zur entsprechenden Zeile, um den Sollwert (SP) einzustellen. Ebenfalls in die Regelung implementiert wurde ein sogenannter Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID-Regler), welcher eine rückgekoppelte Modulationstechnik umfasst. Der PID-Regler erhält benutzerdefinierte Koeffizienten (Ansprechzeit, Schwingungsdämpfung, Überschwingen und Einschwingzeitverkürzung etc.) der Regelungsschemata, welche beschreiben wie sich das System verhalten soll und anschließend das System adaptieren und optimieren. Der PID-Regler erhält die Prozessvariable (PV) vom Kugelthermometer und einem Feuchtigkeitssensor, welcher sich in der Mitte jedes Testkubus befindet. Er berechnet daraus den Fehlerwert durch die Subtraktion der Prozessvariable vom Sollwert (SP). Das Trigger-Signal wird an die Halbleiterrelais (SSRs) gesendet, welche die Heizung und den Befeuchter mit der Frequenz versorgen, die von der Größe des Fehlerwerts abhängt.

Die Variablen des Regelsystems werden auf ein OLED-Display projiziert und gleichzeitig in separaten Log-Dateien (.csv-Format) für Heizung und Befeuchtung gespeichert. Die Datenerfassungsschleife für Sensoren und Regelung sind so programmiert, dass sich die Datenerfassung jede Minute wiederholt. Währenddessen laufen die Regelung sowie die Hauptprozesse im Hintergrund ab.

Die Wärmebilder werden getrennt von den anderen Sensoren erzeugt, da der Ausgabetyp unterschiedlich ist. Zu Beginn der Aufzeichnung wird die Farbpalette für das Wärmebild festgelegt. Am Ende des 1-minütigen Prozesses wird ein Dateiname für die Bilddatei (.png-Format) erzeugt. Der Dateiname ist durch die Uhrzeit und das Datum definiert. Das Programm empfängt dann ein kontrastreiches Graustufenbild von der FLIR-Kamera. Die Farbpalette wird auf das Bild gelegt, um das Wärmebild zu erstellen. Die Bildgröße wird skaliert und im Datenprotokoll dauerhaft gespeichert.

Der Wärmestromsensor folgt der gleichen Aufzeichnungsmethodik wie die anderen Sensoren. Hier ist ein Plug-and-Play-Mechanismus möglich, da das Programm bereits die UIDs der Komponenten enthält. Beim Ein- bzw. Ausstecken zeichnet das Datenprotokoll, wie bei den anderen Sensoren, eine Eingabe ohne Wert auf. Darüber hinaus wird eine Verbindung zur log-Datei erstellt und durch den entsprechenden Zeitstempel an der richtigen Stelle der Wert integriert.

Abbildung 149 Übersicht über den Aufbau und der Struktur des Python-Skripts für die Integration des Mess-, Steuer- und Regelungskonzepts (eigene Darstellung)



Datenverarbeitung, Validierung der Simulation und Integration und Programmierung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

Ahmad Nouman, Christian Hepf

In diesem Kapitel werden die Datenverarbeitung sowie die Regelungstechnik der aktiven Systeme beschrieben und erläutert. Hierbei wird besonders auf das Konzept der Mess-, Steuer- und Regelungskonzept der Heizung, Befeuchtung und Lüftung eingegangen. Abschließend wird die gebäudetechnische Anbindung an das thermisch aktivierte Massivholzelement in der Solarstation aufgezeigt.

Regelungstechnik für die aktiven Systeme

Zu den aktiven Systemen der beiden Testkuben gehören eine 250-W-Heizung (RRH TR 250) (Kraemer & Kraus Waermetechnik GmbH), ein Befeuchter (AH 660) und eine Vakuum-Pumpe mit Ventil und Massenstrommessgerät (Kraemer & Kraus Waermetechnik GmbH; Medisana AG). In der aktuellen Version des Lüftungskonzepts werden das Ventil und das Massenstrommessgerät, welche für einen konstant kontrollierten Luftstrom erforderlich sind, nicht verwendet. Stattdessen wird die Vakuum-Pumpe direkt an die Luftzufuhr angeschlossen, welche die Luft aus den beiden Testkuben absaugen. Dies kann dazu verwendet werden die Testkuben vor den Experimenten abzukühlen und während der Messreihe konstant zu entlüften. So kann Frischluft durch die Lufteinlässe in die Testkuben eintreten und wird durch den Luftauslass von der Vakuumpumpe abgesaugt. Die Stromversorgung der Pumpe erfolgt über einen Schutzschalter, der mit einem IoT-Netzstecker verbunden ist. Die Stromkästen in beiden Kammern sind an wasserdichte Steckdosen mit verschließbaren Deckeln angeschlossen. Die Heizungen und der Befeuchter werden im Inneren des Kubus mit Strom versorgt. Die Stromversorgung jeder Steckdose erfolgt über einen separaten SSR, welche über ein PWM-Signal vom angeschlossenen Mikrocontroller gesteuert werden. Der SSR wird zum galvanisch getrennten Schalten der Gleich- oder Wechselstromlasten verwendet. In diesem Fall wird ein 380V/25A AC-Option zur Steuerung der Heizung und des Befeuchters herangezogen. Zur Sicherheit wurden die SSRs im monostabilen Multivibrator/Monoflop-Modus betrieben. In diesem Modus erhält der SSR ein Impulssignal mit einer vordefinierten Triggerperiode. Während dieser Zeit ist der Stromkreis geschlossen und der Strom kann ließen. Nach Ablauf der Triggerperiode wird der Stromkreis bis zum nächsten Triggersignal wieder geöffnet. Diese Technik wird eingesetzt, um Brandgefahren im Falle einer unvorhergesehenen Störung/Fehlfunktion im System zu vermeiden.

Die aktiven Systeme werden kontinuierlich betrieben, bis die Sollwerte (SP) der Temperatur und der Feuchte erreicht sind. Um die Sollwerte zu erreichen und das System im Gleichgewicht zu halten, wurde der Auslösemechanismus im Python-Skript durch den PID-Regler optimiert. Der PID-Regler berechnet iterativ die Abweichung vom definierten Sollwert (SP) und der gemessenen Prozessvariablen (PV), welche als Fehlerwert bezeichnet wird. Der Regelparameter, d. h. der Proportional-, Integral- und Differentialanteil, werden entsprechend dem Fehlerwert kontinuierlich angepasst. Die mathematische Gleichung des Konzepts lautet wie folgt:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

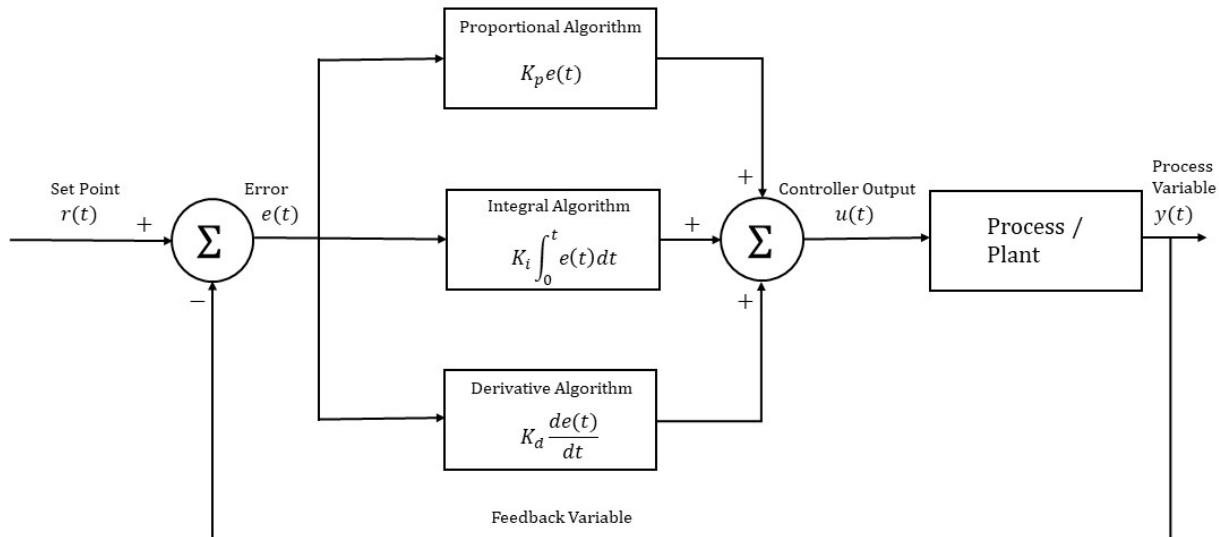
K_p = Koeffizienten für den proportionalen Term (P)

K_i = Koeffizienten für den Integralterm (I)

K_d = Koeffizienten für den Ableitungsterm (D)

Alle drei Koeffizienten stellen einen nicht-negativen Wert dar. Das Python-Skript für die Mess-, Steuer und Regungsstrategie wurde bereits im vorangehenden Kapitel erläutert.

Abbildung 150 Blockschaltbild eines Proportional-Integral-Differenzial-Reglers (PID-Regler) (eigene Darstellung)



Gebäudetechnische Anbindung an das thermisch aktivierte Massivholzelement (TAM) in der Solarstation

Das TAM besteht aus mehreren Holzschichten, wobei eine davon ausgefräst ist und der Hohlraum in dieser Schicht einen Luftkanal bildet, der ein Beheizen bzw. Kühlen des Wandelements ermöglicht. Ein Lüftungskanalrohr aus Metall (Durchmesser = 100 mm) verbindet das TAM mit der Gebäudetechnik. Im Inneren des Kanalrohrs wird die Luft durch eine elektrische Heizung erwärmt und mittels eines Ventilators in die Wand geleitet.

Die elektrische Heizung ist mit zwei integrierten Thermostaten verbunden, welche die Stromzufuhr zur Heizung bei zwei verschiedenen Temperaturen (50 °C und 120 °C) kappen. Dies dient dem Brandschutz. Der Benutzer kann einen oder beide Thermostate (je nach Einrichtung und Sicherheitsanforderungen) über den elektrischen Anschlusskasten anschließen. In den Messreihen am TAM auf der Solarstation wurde die elektrische Zufuhr für das Heizgerät zusätzlich de- bzw. aktiviert, abhängig von der operativen Temperatur, gemessen über die Schwarzkugel im Kubus. Somit wurde das interne Thermostat des Heizers entkoppelt und über das Python-Skript mit der operativen Temperatur verknüpft. Somit konnte das TAM auf die gewünschte Temperatur gebracht werden und wurde mehrfach gegen einen Brandfall abgesichert. Hierbei kam erneut der PID-Regler zum Einsatz, um vor allem auf das träge Verhalten des thermisch aktvierten Massivholzelements reagieren zu können.

Der Zuluftventilator für den Luftstrom im TAM wird an eine zusätzliche Steckdose im Versorgungskasten angeschlossen. Obwohl die Lüftung über das Programmierskript gesteuert werden kann, war ein manueller Ein-Aus-Schalter für diesen Zweck besser geeignet, welcher zusätzlich per Remote angesteuert werden kann, um bei den Messreihen maximale Flexibilität zu erzeugen.

Abbildung 151 Draufsicht auf das TAM inkl. der Darstellung der Position der einzelnen Komponenten (eigene Darstellung)

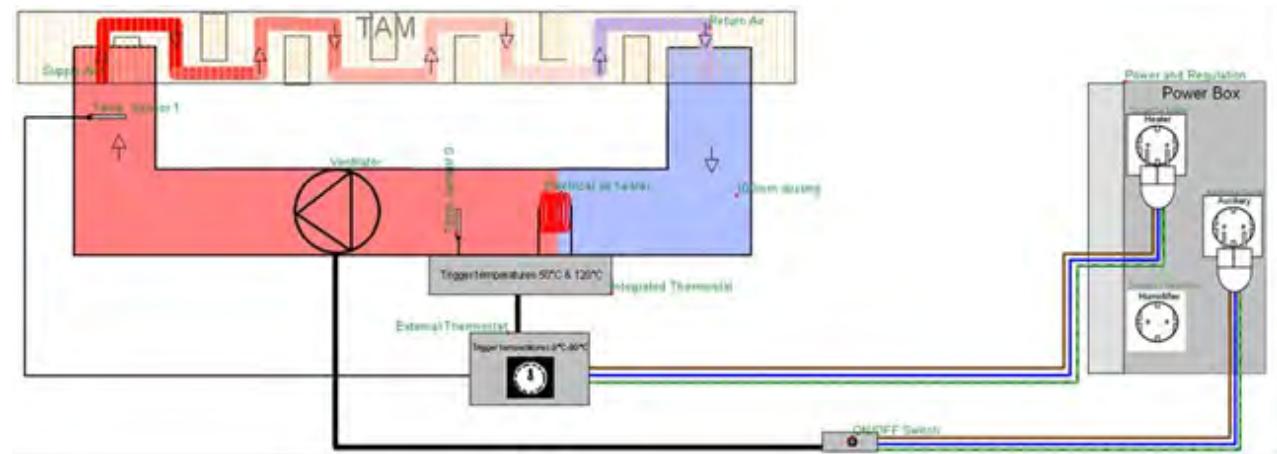


Abbildung 152 Schematische Abbildung des Luftstroms durch das TAM inkl. der Gebäudetechnik (eigene Darstellung)

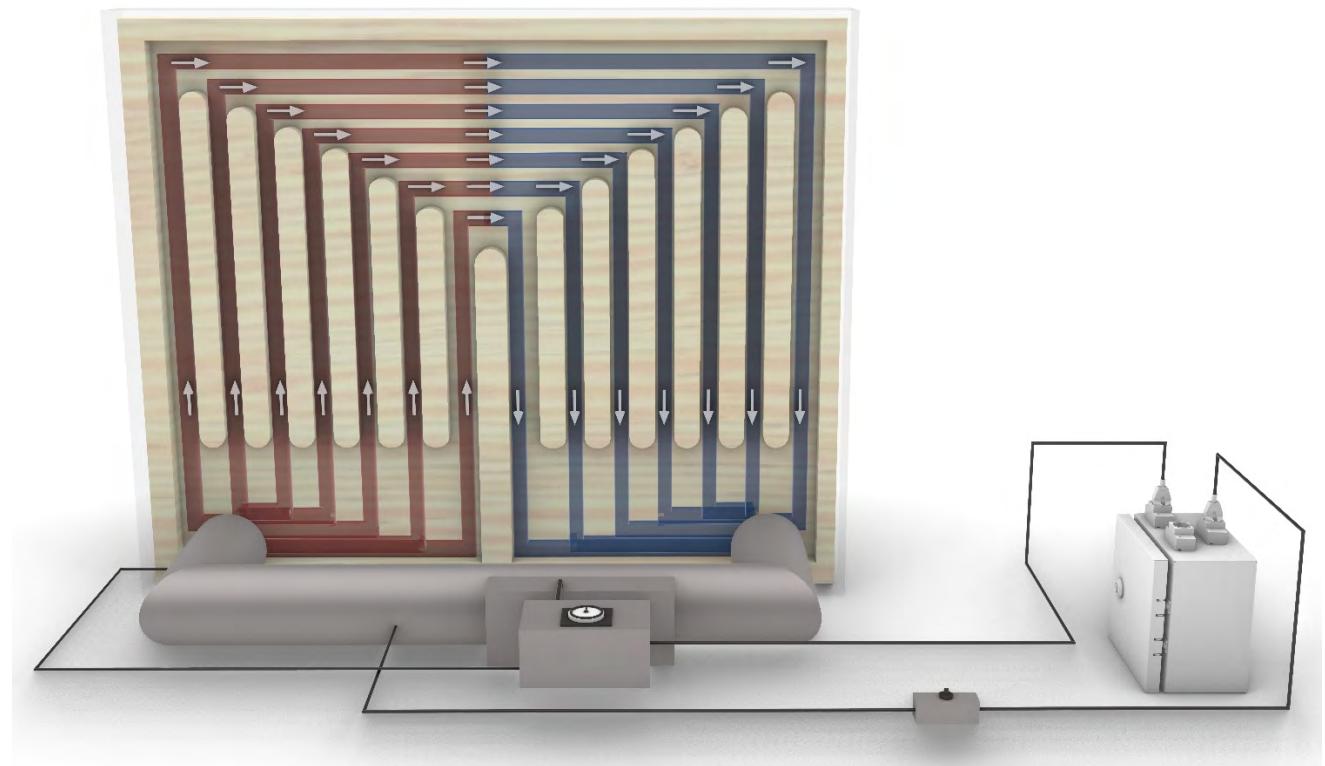


Tabelle 18 Liste der Abkürzungen

| | |
|------------------|---|
| AFE | Analog Front End |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CT | Current Transformer |
| FLIR | Forward Looking InfraRed |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| L | Live Wire |
| MRT | Mean Radiant Temperature |
| OLED | Organic Light-Emitting Diode |
| PID | Proportional Integral Derivative |
| PV | Process Variable |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| RTC | Real-Time Clock |
| RTD | Resistance Temperature detectors |
| SP | Set Point |
| SSR | Solid State Relay |
| TAM | Thermisch Aktiviertes Massivholzelement |

Kapitel V – Langzeitfeldversuche in Testkuben

Wartung und Anpassung der Versorgungs- und Messtechnik, Messdatenaufbereitung und -auswertung

Nina Flexeder; Christian Hepf; Ahmad Nouman

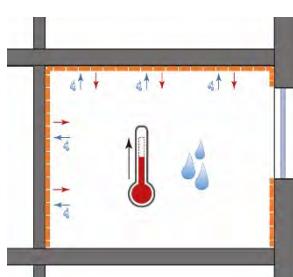
Hygrothermisches Verhalten des Brettsperrholzkubus im Realmaßstab infolge eines gesteuerten isothermen Feuchtesprungs (Kubus Kösching)

Nina Flexeder

Hypothese zur Anwendung der Methoden aus dem Zwillingsversuch im Dreidimensionalen

Zur Übertragung der Methoden aus Kapitel III auf den Maßstab eines gesamten Raumes wird der Kubus in Kösching (Wandaufbau identisch zu BSP_01) nachgerüstet. Es soll zunächst überprüft werden, inwieweit sich Messmethode #D, zwei Temperatursensoren unter identischen Bedingungen zu verwenden, auch für Messungen im Feldversuch nach Messmethode #H eignet, vgl. Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“, S. 82 ff. Die Paare bestehen aus zwei PT-1000-Sensoren mit Vierleiterschaltung und der eigens entwickelten Hüllen in Pyramidenform, vgl. Kapitel IV, Abschnitt „Primäre Oberflächentemperaturmessung“, S. 163. Der erste Sensor liegt direkt auf dem Material auf. Der zweite, baugleiche Sensor liegt auf einer Fläche unmittelbar daneben, auf der zuvor eine dampfbremsende Folie (sd-Wert 5 m) montiert wurde. Es werden jeweils drei dieser Sensorenpaare im Kubusinneren montiert: mittig an der Nordostwand (gelb dargestellt), mittig an der Nordwestwand (rot dargestellt) sowie an der Decke (blau dargestellt). Für einen isothermen Feuchtesprung wird nach abgeschlossener Montage die Tür zum Kubus geschlossen und nach 20 Minuten die Befeuchtung für eine Dauer von 50 Minuten remote gestartet. Der Befeuchter wurde hierzu an ein Relais angeschlossen sowie auf einer Waage positioniert.

**Abbildung 153 Prinzip
Erwärmung durch Befeuchtung**



**Abbildung 154 Erhöhung der absoluten Luftfeuchte durch 50 Minuten
Befeuchtung- Aktive Wasserabgabe an die Raumluft im Brettsperrholz-Kubus
Kösching**

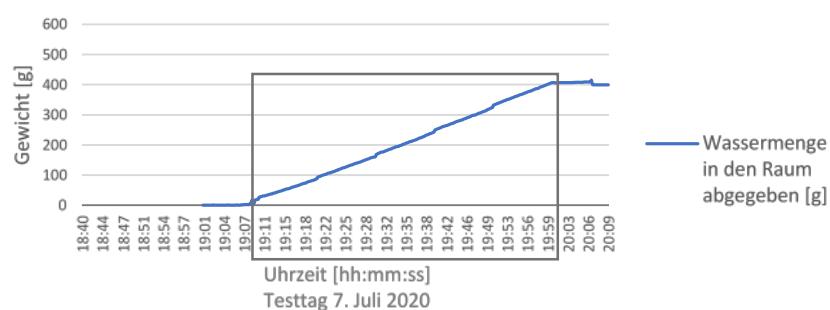
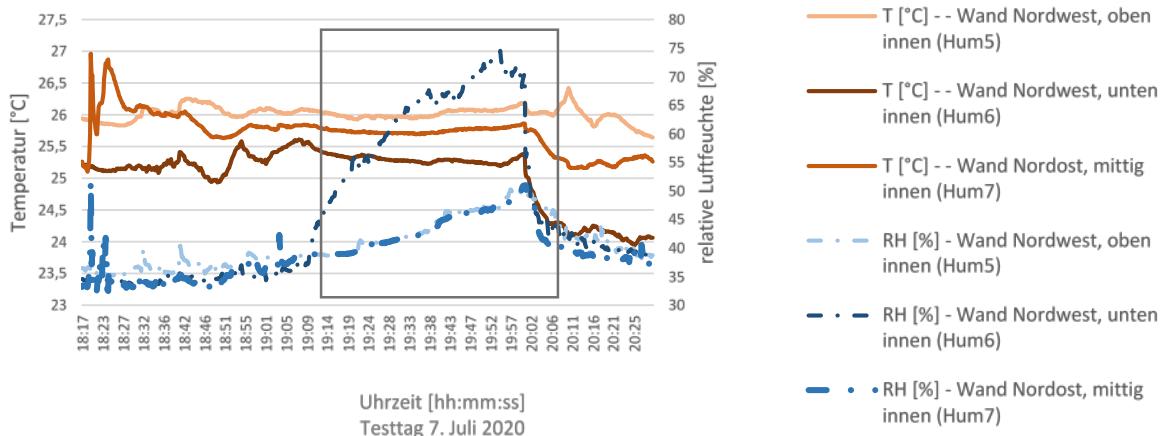
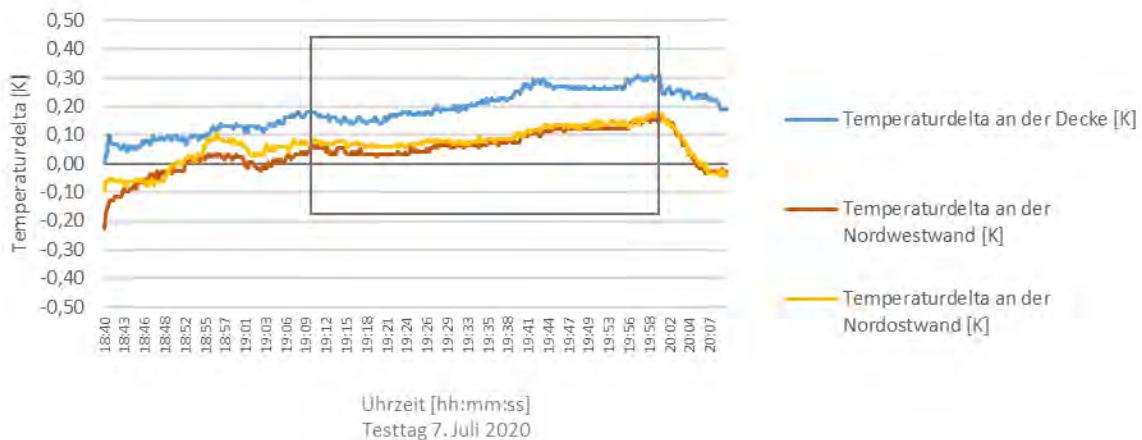


Abbildung 153 und Abbildung 154: eigene Darstellungen (Flexeder)

Ergebnisse des gesteuerten Feuchtesprungs im Brettsperrholzkubus

Die Ergebnisse des ersten Experiments mit aktiver Befeuchtung ohne Luftwechsel und bei sonst gleichbleibenden Bedingungen im Juli 2020 zeigen, dass sich die Methoden aus dem Laborbetrieb prinzipiell auf Feldtests übertragen lassen. Der Betrieb des Befeuchters über 50 Minuten führt zu einer Abgabe von rund 400 g Wasser (dampfförmig) an die Raumluft, vgl. Abbildung 154. Dies führt zu einer Änderung der relativen Luftfeuchte im Raum sowie insbesondere in den oberflächennahen Luftsichten, den sogenannten Grenzschichten, vgl. Abbildung 155.

Abbildung 155 Rel. Luftfeuchten & Temperaturen in der Grenzschicht, innenseitig. Kubus Kösching, vgl. BSP_01

Abbildung 156 Temperaturdelta an Decken- und Wandoberfläche, innen. Kubus Kösching, vgl. BSP_01

Abbildung 155 und Abbildung 156: eigene Darstellungen (Flexeder)

Interpretation und Auswertung der Ergebnisse aus dem Kurzzeit-Feldversuch

Im Vergleich zu Laborexperimenten bestehen die Herausforderungen der Messungen im Brettsperrholzkubus Kösching in der Isolierung einzelner hygrothermischer Effekte. So zeigt die Kurve der relativen Luftfeuchte im oberflächennahen Bereich auch bereits vor der gesteuerten mechanischen Befeuchtung einen tendenziellen Anstieg, vgl. Abbildung 155. Dies könnte auf die tageszeitlichen Schwankungen oder aber die Anwesenheit von Personen zurückgeführt werden.

Zur Auswertung der Oberflächenerwärmung wird jeweils die Differenz zwischen der an der hygrisch aktiven Materialoberfläche und der an der abgeklebten Oberfläche in unmittelbarer Umgebung gemessenen Temperatur gebildet. Das Delta dieser beiden Messwerte wird wiederum auf die Zeit aufgetragen und als Erwärmung der Materialoberfläche rein durch Freiwerden der Sorptionsenthalpie interpretiert. Für den Zeitraum der aktiven Befeuchtung (50 Minuten) zeigt sich an allen drei Messpunkten (Decke, Nordwestwand sowie Nordostwand) eine Erwärmung durch diesen hygrothermischen Effekt um rund 0,15 Kelvin, vgl. Abbildung 156. Es fällt auf, dass die Kurven auch bereits vor dem Start des mechanisch induzierten Feuchtesprungs steigen.

Dynamische Messungen mit aktiver Steuerung im reduzierten Maßstab (Kubus Ost)

Nina Flexeder

Methodik zur Messung und Interpretation der Effekte in Kubus Ost

In den folgenden Unterabschnitten wird das hygrothermische Verhalten des Testelements BSP_01 (A) mit dem Testelement BSP_02 (B, Aufbau siehe S. 152 f) im instationären Verhalten in Kubus Ost gemäß Messmethode #G verglichen, vgl. Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“, S. 82 ff. Für die Versuche im November 2020 wurde Testelement B zuvor vollflächig mit einer dampfbremenden Folie (sd-Wert 5m) verklebt, wobei sämtliche oberflächennahen Sensoren unterhalb der Folie lagen, vgl. Abbildung 157.

Zur Evaluation der hygrothermischen Effekte auf Materiallevel infolge von klimatischen Sprüngen werden die Lufttemperatur und -feuchte jeweils in drei Höhen in der oberflächennahen Grenzschicht vor dem Testelement gemessen und in der weiteren Untersuchung in Relation gesetzt. Vor Testelement A, dem frei sorbierenden Brettsperrholztestelement BSP_01, wird die lokale relative Luftfeuchte mit den Datenpunkten O_A_b1, _b2, _b3 in 800 mm, 500 mm und 200 mm mittig aufgezeichnet. Die zugehörigen Lufttemperaturen werden mit O_A_c1, _c2, _c3 bezeichnet, vgl. Kapitel IV, Abschnitt „Mess- und Versorgungskonzept für die Langzeitmessungen in den Testkuben“. Die entsprechenden Werte vor Testelement B, dem durch die Folie an der freien Wasserdampfsorption gehinderten Brettsperrholztestelement BSP_02, werden durch O_B_b1, _b2, _b3 sowie O_B_c1, _c2, _c3 gekennzeichnet. Diese Systematik wird im Folgenden auf sämtliche weitere Testelement-spezifischen Messgrößen übertragen. Die Messperiode beträgt für alle Messdatenpunkte bei diesem Experiment 30 Sekunden.

Die resultierenden Oberflächentemperaturen werden durch Temperatursensoren mit eigens entwickelter Hülle gemessen, vgl. Abschnitt „Primäre Oberflächentemperaturmessung“, S. 163ff. Pro Testelement sind jeweils fünf baugleiche Temperatursensoren auf der Oberfläche montiert, vgl. Abbildung 158 und Abbildung 159.

Abbildung 157 Kubus Ost mit BSP_01 und BSP_02 (abgedeckt)



Abbildung 158 Anordnung der Oberflächentemperatursensoren

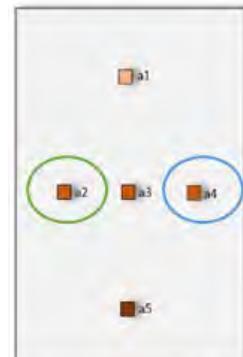


Abbildung 159 Beispielhafte Messergebnisse der Oberflächentemperaturen - Kubus Ost – Fassadentestelement A (BSP_01) für einen Ausschnitt von 15 Minuten

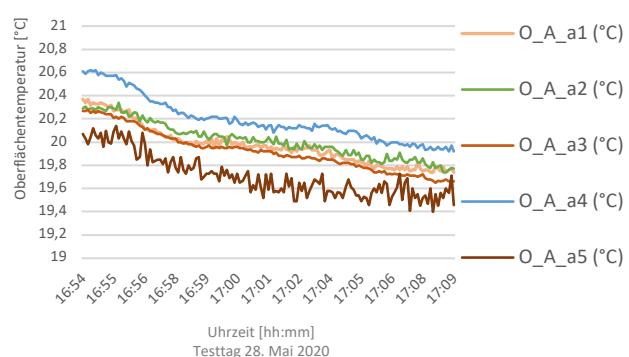


Abbildung 157 - Abbildung 159: eigene Darstellungen (Flexeder)

Um die Änderung der Oberflächentemperatur durch Freiwerden von Sorptionsenthalpie von anderen Effekten trennen zu können, werden in den folgenden Unterabschnitten (S. 183 - 190) jeweils die Messwerte von Testelement B von dementsprechenden Positionen des Testelement A subtrahiert. Gemäß den Erkenntnissen im Rahmen der Zwillingsversuche im Labormaßstab aus Kapitel III lässt ein (normierter) positiver Wert somit auf eine Erwärmung infolge von Adsorption und ein (normierter) negativer Wert auf eine Abkühlung infolge von Desorption schließen. Da sich im Feldversuch zahlreiche weitere Effekte einstellen, werden anschließend

die so ermittelten Oberflächentemperaturdifferenzen ($O_X_{a1}, \dots, _{a5}$) durch die jeweiligen Lufttemperaturdifferenzen ($O_X_{c1}, _{c2}, _{c3}$) bereinigt. Dieser Bearbeitungsschritt ist insofern kritisch zu sehen, da es sich möglicherweise um einen logischen Kreisbezug handelt: Besteht ein Unterschied zwischen den Lufttemperaturen von Testelement A und B, weil sich die Luft aus Gründen wie verschiedene Luftströmungen, isolierende Folie, Positionierung des Radiators oder einem anderen Faktor verschieden schnell / stark erwärmt und sollten somit aus der Untersuchung der Oberflächentemperaturen bereinigt werden? Oder sind die gemessenen Temperaturunterschiede in der Grenzschicht bereits Auswirkungen der Sorptionsenthalpie und eine Bereinigung würde die Resultate verfälschen? Diese Frage konnte im Rahmen dieses experimentellen Aufbaus nicht abschließend geklärt werden, sofern verfügbar werden die Resultate dargestellt.

Darüber hinaus werden weitere ergänzende Messgrößen aufgezeichnet und diskutiert. Sowohl das allgemeine Außen- und Innenklima als auch die kurzzeitigen Eingriffe durch Auffeuften, Ablüften und Aufheizen haben Auswirkungen auf den Wärme- und Stofftransport durch das gesamte Bauteil. Um das grundsätzliche hygrothermische Verhalten (und etwaige Pufferungseffekte) im Querschnitt vor, während und nach den Eingriffen zu dokumentieren, wurden Kombisensoren in eigens entworfenen Hüllen in jeweils vier verschiedenen Tiefen verbaut, vgl. S. 165 f. Diese sekundären Messgrößen lassen über die jeweiligen materialspezifischen Sorptionsisothermen Rückschlüsse auf die tatsächliche Materialfeuchte zu. Abbildung 160 und Abbildung 161 zeigen die Einbausituation in Kubus Ost, welche baugleich ebenso in Kubus Kösching nachgerüstet wurde. In Abbildung 162 werden beispielhaft die Messergebnisse dieser hygrometrischen Feuchtebestimmung gezeigt, wobei die Verläufe der relativen Luftfeuchte stets in Abhängigkeit der gemessenen Lufttemperatur zu interpretieren sind.

Abbildung 160 Anordnung der Kombisensoren im Testelement / in der Kubusaussenwand zur hygrometrischen Materialfeuchtebestimmung

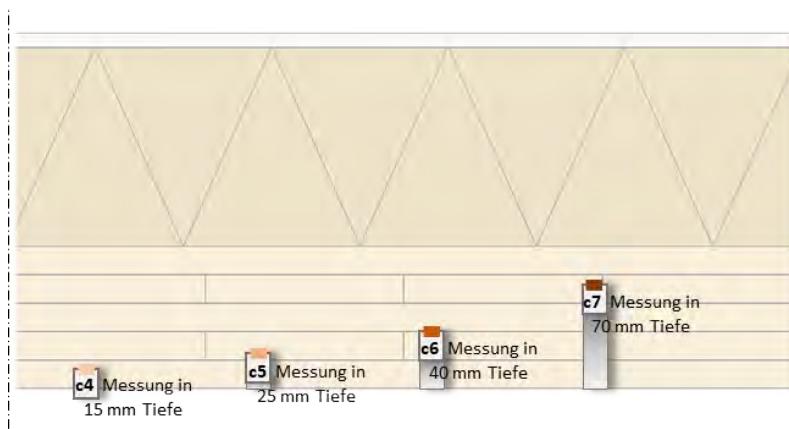


Abbildung 161 In 70 mm Tiefe verbauter Kombisensor (O_A_b7 und O_A_c7)



Abbildung 162 Exemplarische Darstellung der gemessenen relativen Luftfeuchte und -temperatur in einer kleinen abgedichteten Kammer im Materialquerschnitt (hygrometrische Materialfeuchtebestimmung)

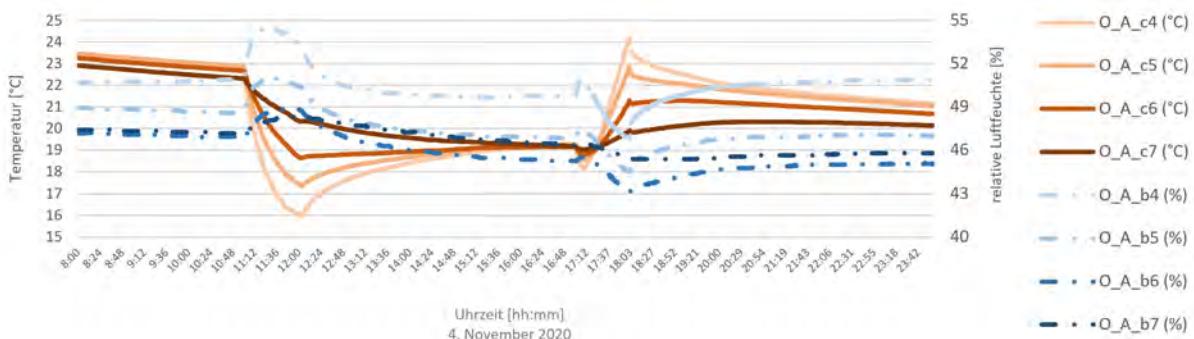


Abbildung 160 - Abbildung 162: eigene Darstellungen (Flexeder)

Adsorptionsversuch: Messbarer thermischer Effekt auf mechanische Erhöhung der Luftfeuchte?

Im Folgenden wird exemplarisch ein Experiment gezeigt, bei welchem die relative Luftfeuchte in Kubus Ost durch eine vierstündige Befeuchtung (19:00 – 23:00 Uhr) angehoben wurde. Abbildung 163 zeigt die resultierenden Werte für relative Luftfeuchte und -temperatur unmittelbar vor Testelement A. Im Vergleich mit den Werten vor Testelement B, vgl. Abbildung 164, fällt auf, dass die relative Luftfeuchte auch vor dem Versuchsstart im abgedichteten Folienpaket wesentlich tiefer lag, als im restlichen Kubus. Beiderseits wird eine Erwärmung um rund 1,5 K gemessen, welche auf den Betrieb des elektrischen Befeuchters zurückzuführen ist. Diese Erwärmung lässt sich mit leichter Verzögerung auch in die Materialschichten beider Testelemente zurückverfolgen, vgl. Abbildung 165 und Abbildung 166. Im Querschnitt von Testelement A zeigt sich zudem eine leichte Tendenz zur Auffeuchtung.

Abbildung 163 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. Der Kasten markiert den Zeitraum der aktiven Befeuchtung durch remote angesteuerte Steckdose.

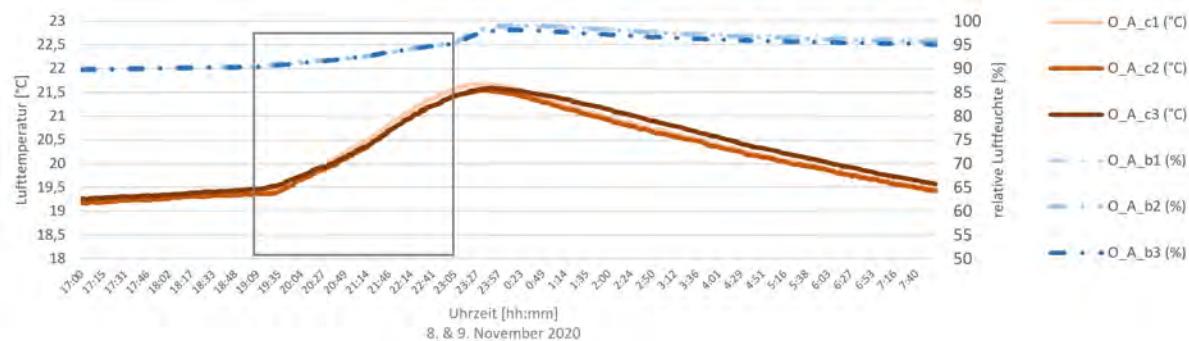


Abbildung 164 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor dem abgedichteten Referenz-Testelement B, BSP_02, Kubus Ost.

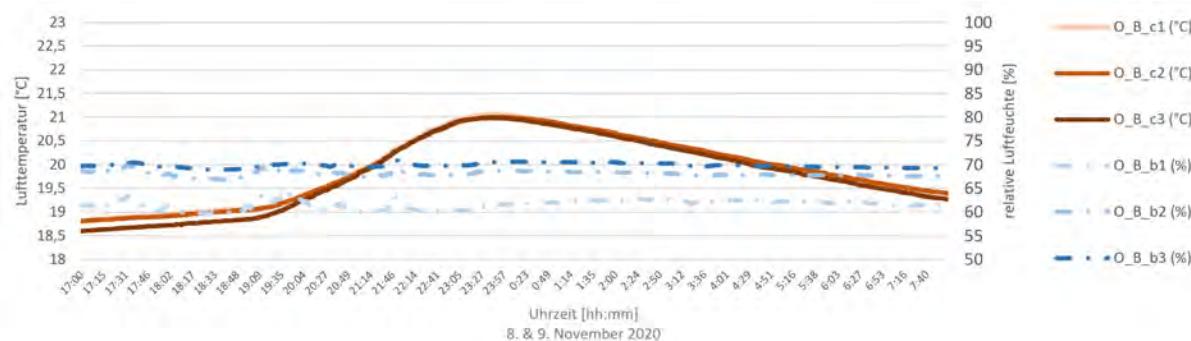


Abbildung 165 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

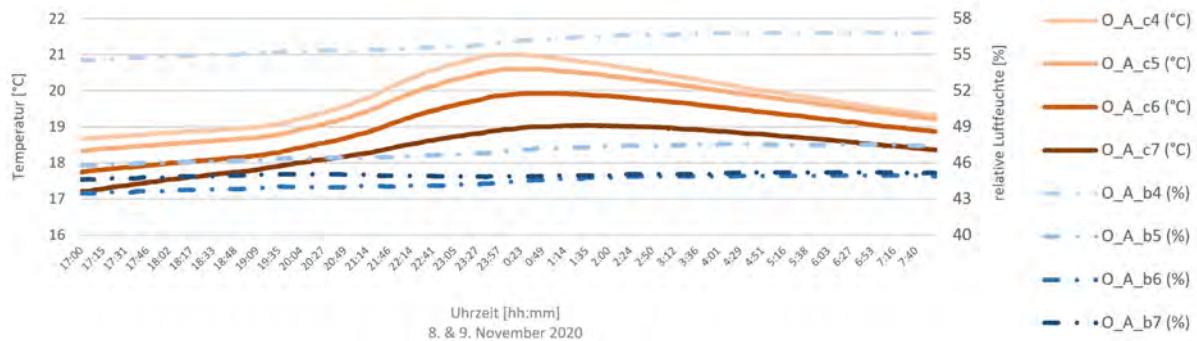


Abbildung 166 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

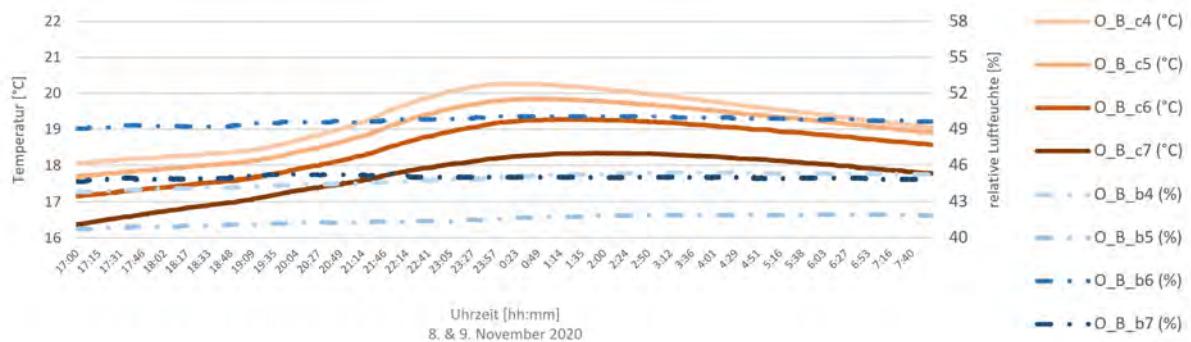


Abbildung 167 Oberflächentemperaturen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

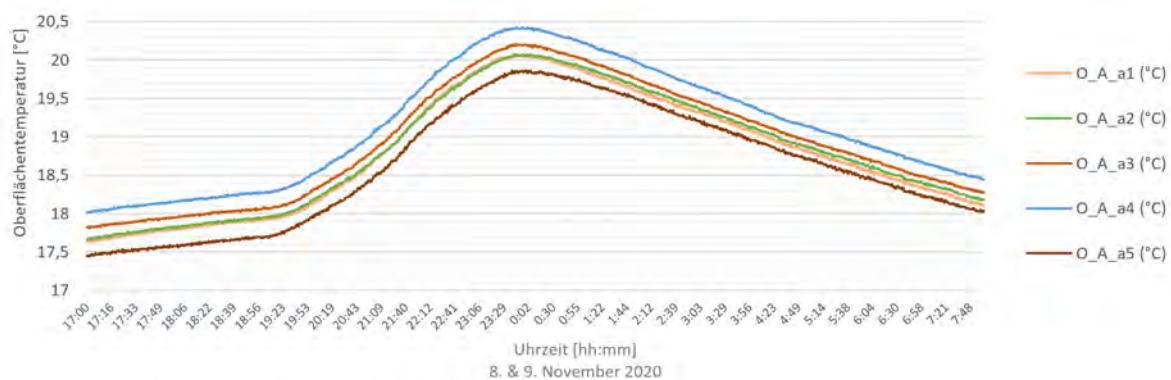


Abbildung 163 - Abbildung 167: eigene Darstellungen (Flexeder)

Die gemessenen Oberflächentemperaturen von Testelement A (BSP_01, unabgedeckt) werden in Abbildung 167 dargestellt. Der Kurvenverlauf zeigt zunächst eine klare Erwärmung infolge der Abwärme des elektrischen Befeuchtungsgeräts. Die einzelnen Sensoren zeigen zudem Divergenzen in der Größenordnung 0,5 K. Hier wird ein systematischer Fehler vermutet, der durch eine Neukalibrierung gelöst werden könnte. Für den Vergleich und die Diskussion der Ergebnisse wird deshalb im Folgenden nicht der absolute Wert, sondern der zeitliche Verlauf betrachtet. Eine positive Steigung bedeutet demnach: Erwärmung, eine negative: Abkühlung.

Aus der Subtraktion der Werte von Testelement B von den Werten von Testelement A resultieren Temperaturdeltas, welche die Erwärmung von Testelement A infolge von Adsorption vermuten lassen, vgl. Abbildung 168. Hier zeigen alle vier untersuchten Sensorenpaare einen Anstieg um rund 0,25 K an. (Die Differenz A-B, a3, konnte aufgrund von Datenausfall an dieser Stelle nicht mit betrachtet werden.)

Werden zudem die Differenzen der Lufttemperaturen der Grenzschichten gebildet, so fällt auf, dass auch diese ein lokales Maximum aufweisen, vgl. Abbildung 169. Nach Subtraktion dieser Lufttemperaturdifferenzen von den eingangs ermittelten Oberflächentemperaturdifferenzen bleiben wesentlich reduzierte Kurvenverläufe übrig, vgl. Abbildung 170. Inwiefern diese Bereinigung sinnhaft ist oder aber ermittelte Effekte so wieder herausgerechnet werden, könnte im Rahmen fortgesetzter Forschungen untersucht werden.

Abbildung 168 Resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

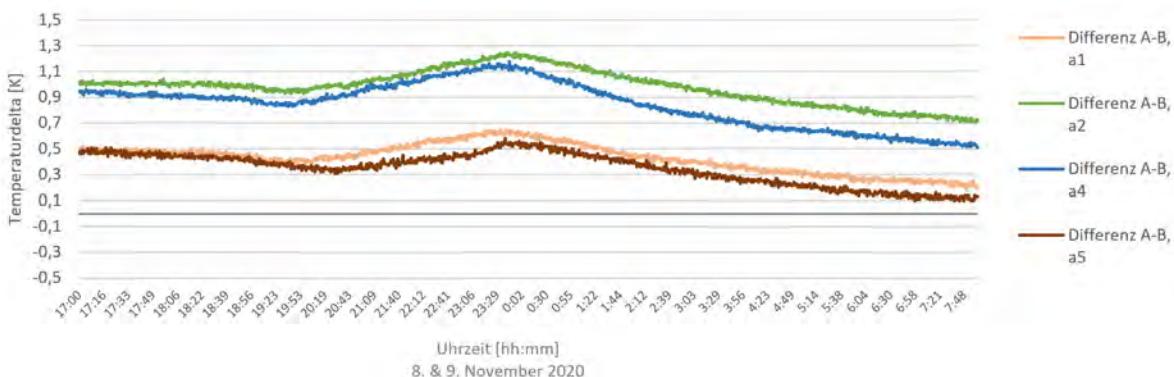


Abbildung 169 Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A und Testelement B, Kubus Ost.

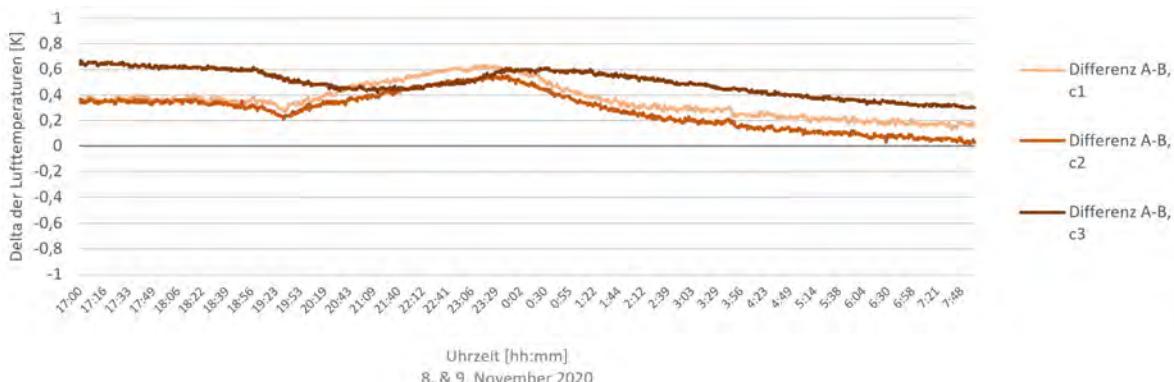


Abbildung 170 Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftsicht.

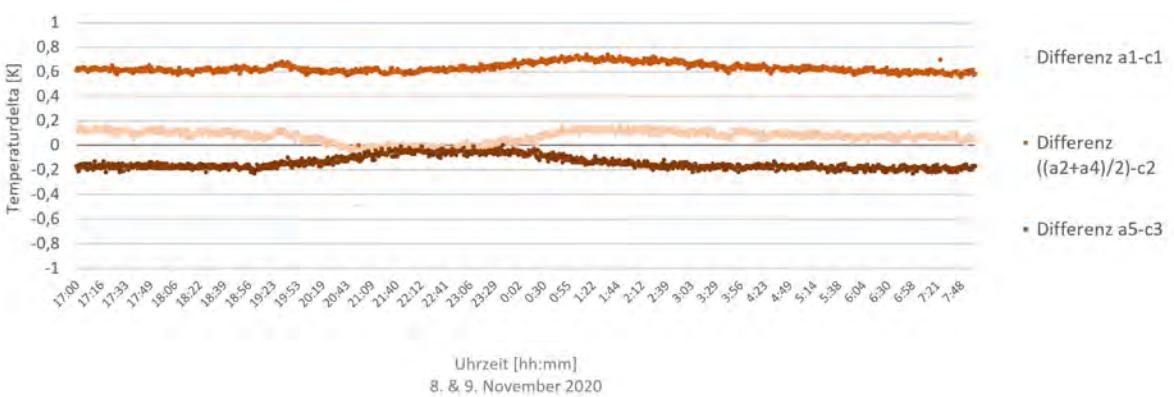


Abbildung 168 - Abbildung 170: eigene Darstellungen (Flexeder)

Desorptionsversuche: Materialreaktionen auf das Ablüften hoher relativer Luftfeuchten

Es werden im Folgenden zwei Experimente gezeigt, bei welchen Effekte durch Luftwechsel untersucht werden. Zur Vorbereitung dieser beiden Desorptionsversuche wurde im Kubus Ost die relative Luftfeuchte mithilfe eines elektrischen Befeuchters jeweils auf das Maximum erhöht. Die zwei Desorptionsversuche unterscheiden sich durch die Dauer der freien Fensterlüftung. Für den ersten Versuch wurde um 20:00 Uhr die Befeuchtung gestoppt und das Fenster lediglich für zwei Minuten geöffnet. Beim zweiten Versuch wurde das Fenster für die Dauer von einer Stunde (11:00 – 12:00) geöffnet. Nachstehend werden die Ergebnisse beider Versuche miteinander verglichen.

Die kurzzeitige Öffnung hatte einen Abfall der Lufttemperatur in den Grenzschichten zur Folge, wobei die Amplitude vor dem abgedichteten Testelement B wesentlich weniger stark ausgeprägt war, vgl. Abbildung 171 mit Abbildung 172. Ein ähnliches Phänomen lässt sich auch bei längerer Lüftungszeit beobachten, vgl. Abbildung 173 mit Abbildung 174. Hier lässt sich zudem ein weiteres Phänomen beobachten: Die durch das Fenster eindringende Frischluft führt zunächst zu einem Abfall der relativen Luftfeuchte von 100 % auf rund 75 %. Da die Fensteröffnung mit einer erheblichen Abkühlung einhergeht, sinkt die Lufttemperatur im Laufe der 60 Minuten kontinuierlich ab. Dies hat wiederum einen Anstieg der relativen Luftfeuchte zur Folge. Insbesondere beim Vergleich von Abbildung 177 mit Abbildung 179 werden die unterschiedlichen Auswirkungen von „Stoßlüften“ versus „Dauerlüften“ deutlich. Der Temperaturabfall durch die Fensteröffnung zeigt sich ebenfalls deutlich bei der Messung der Oberflächentemperaturen am Fassadentelement A (BSP_01), vgl. Abbildung 175 mit Abbildung 176. Die resultierenden Temperatur- und Feuchteverläufe jeweils im Materialquerschnitt werden in Abbildung 177 bis Abbildung 180 gezeigt. Die größten Auswirkungen hat erwartungsgemäß die einstündige Lüftung bei Testelement A, vgl. Abbildung 179. Hier steigt die relative Luftfeuchte deutlich in den oberflächennahen Schichten. Abbildung 181 und Abbildung 182 (siehe S. 189) bilden jeweils die errechneten Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A und B ab. Aufgrund der signifikanten Temperaturunterschiede der Grenzschichten sind diese Ergebnisse allerdings zunächst nicht aussagekräftig in Bezug auf die Temperaturänderung infolge von Sorptionseffekten, vgl. Diskussion auf S. 190.

Abbildung 171 Kurzzeitiger Luftwechsel (zwei Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

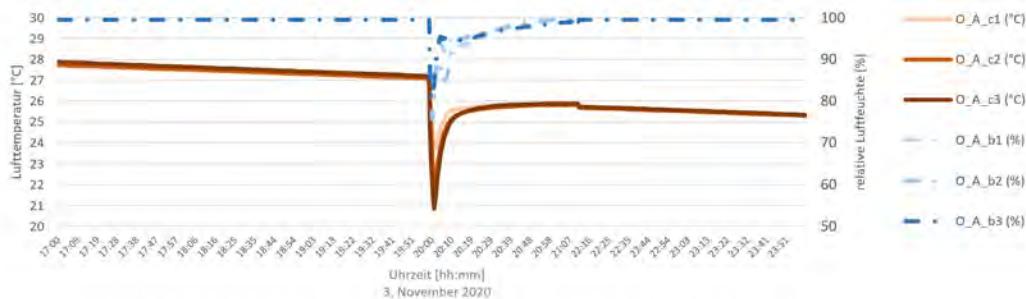


Abbildung 172 Kurzzeitiger Luftwechsel (zwei Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.



Abbildung 173 Einstündiger Luftwechsel (60 Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

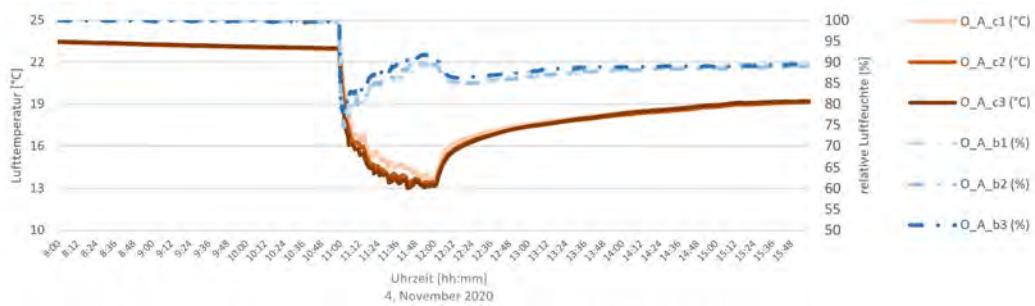


Abbildung 174 Einstündiger Luftwechsel (60 Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

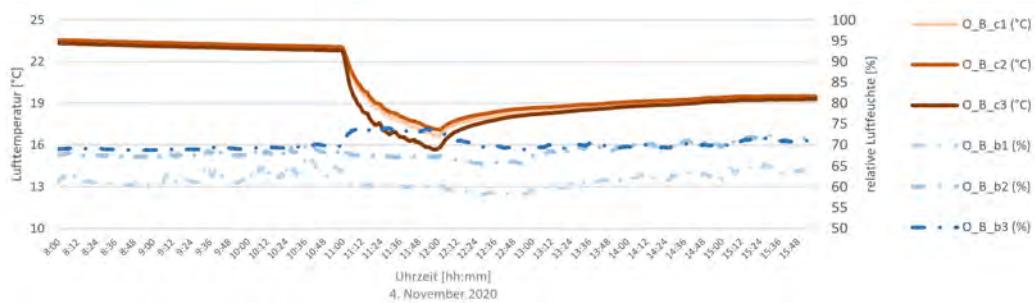


Abbildung 175 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

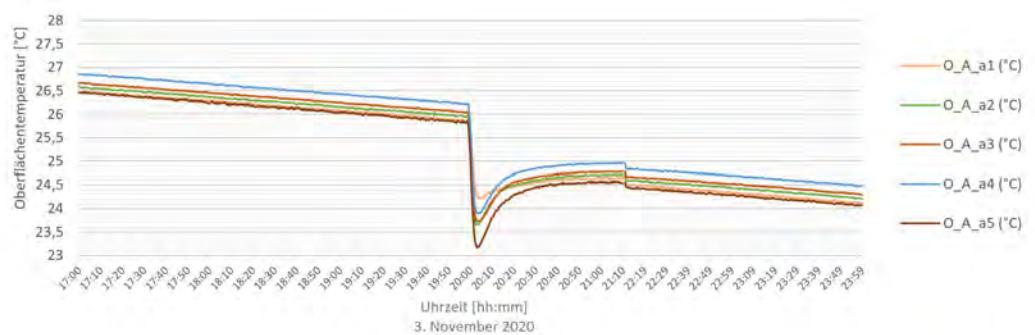


Abbildung 176 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

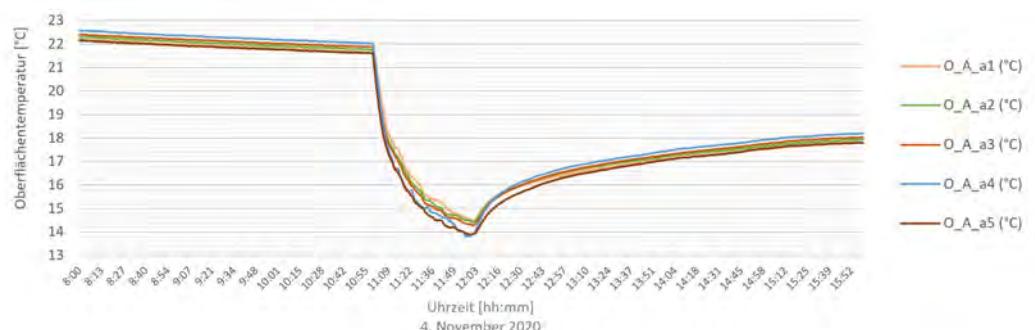


Abbildung 171 - Abbildung 176: eigene Darstellungen (Flexeder)

Abbildung 177 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

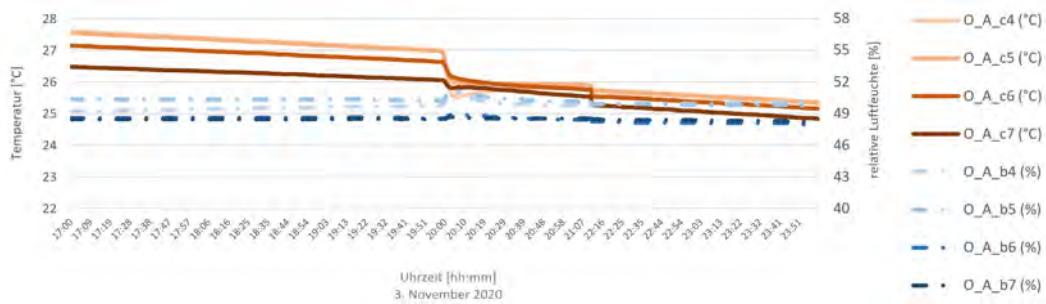


Abbildung 178 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

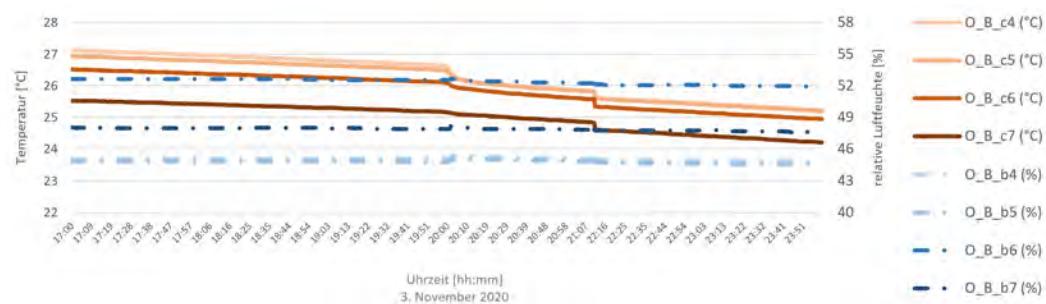


Abbildung 179 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

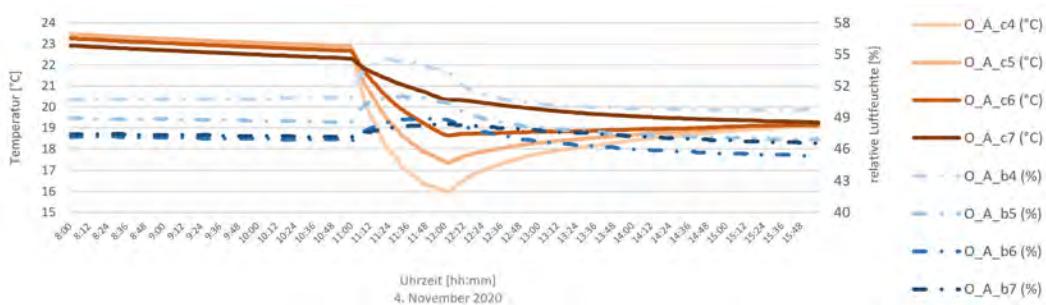


Abbildung 180 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

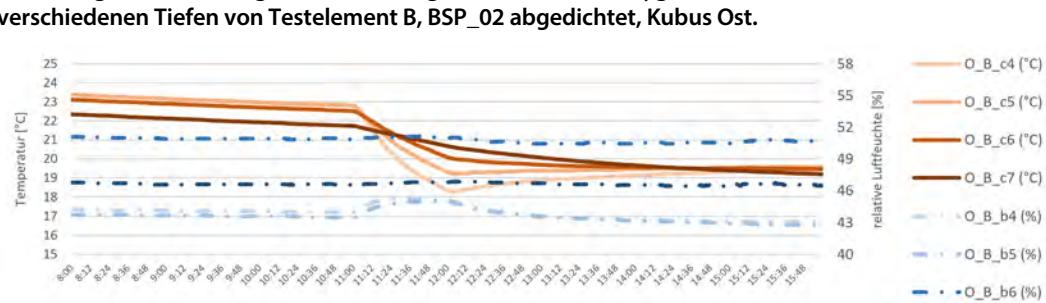


Abbildung 181 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

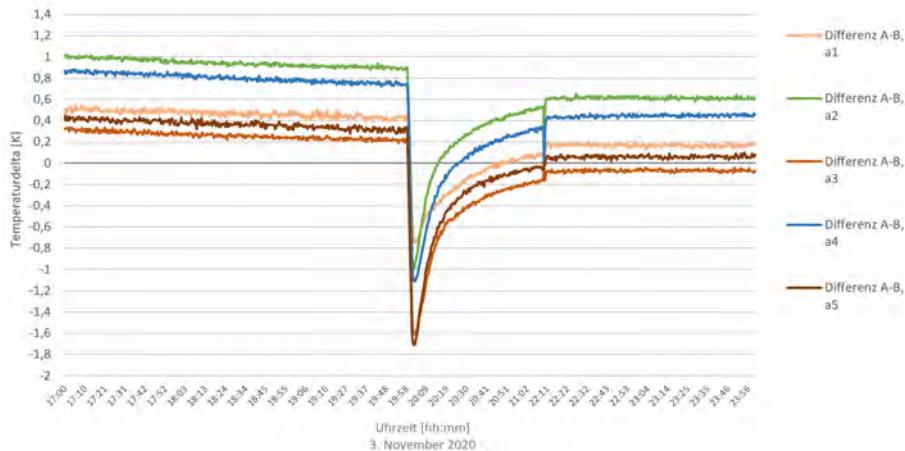


Abbildung 182 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

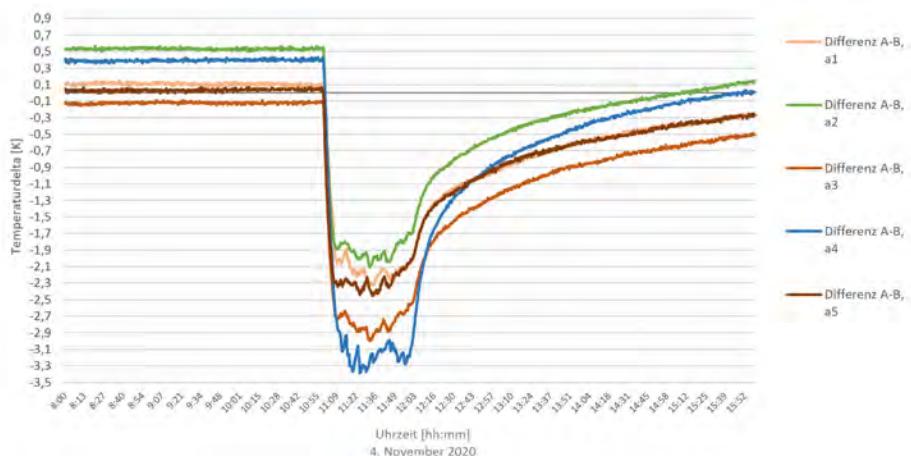


Abbildung 183 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A und Testelement B, Kubus Ost.

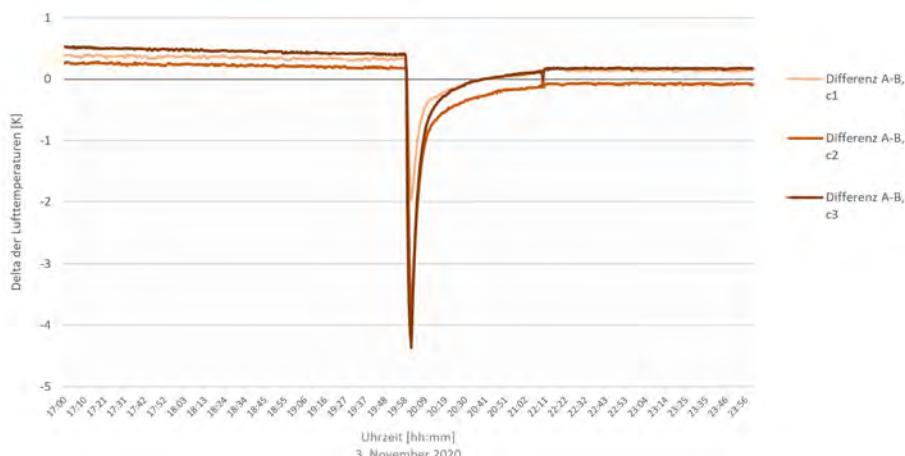


Abbildung 177 - Abbildung 183: eigene Darstellungen (Flexeder)

Abbildung 184 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A und Testelement B, Kubus Ost.

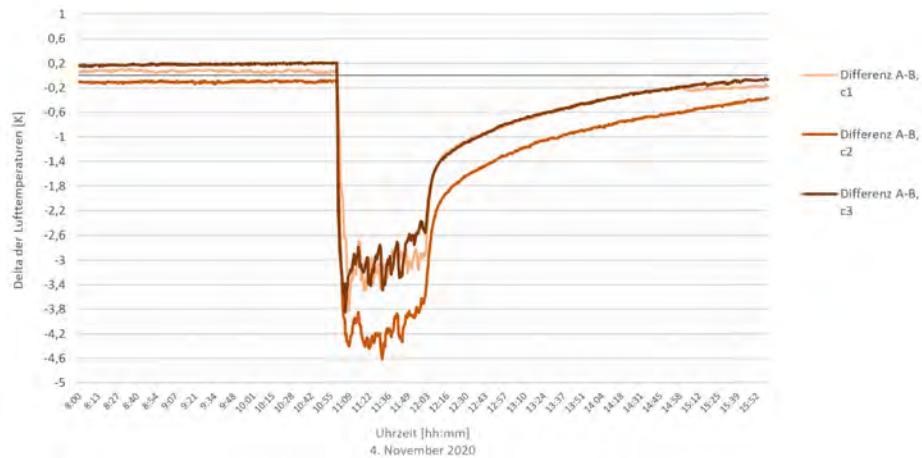


Abbildung 185 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftsicht.

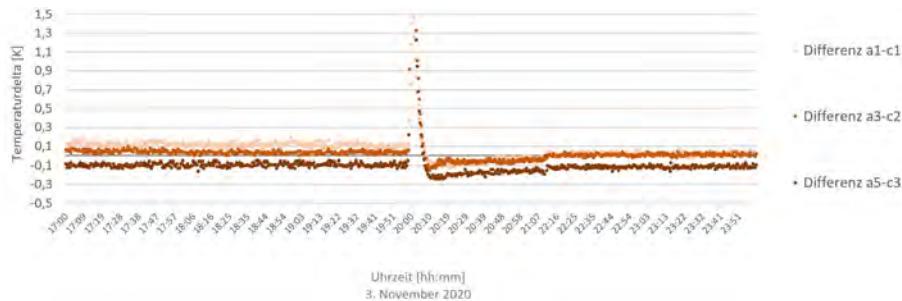


Abbildung 186 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftsicht.

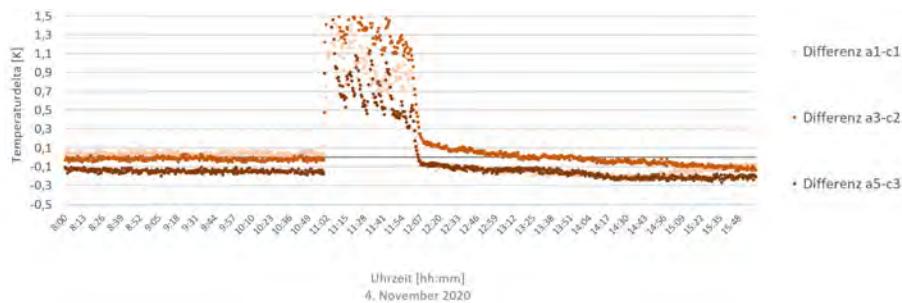


Abbildung 184 - Abbildung 186: eigene Darstellungen (Flexeder)

Der Vergleich zeigt, dass die Temperaturen der Grenzschichten in Folge der Abkühlung durch die Fensteröffnung in beiden Fällen vor Testelement A wesentlich stärker gefallen sind als vor Testelement B, vgl. Abbildung 183 und Abbildung 184. Gemäß der in Kapitel III untersuchten Grundlagen und Laborexperimente und auf Basis der gemessenen relativen Luftfeuchten in der Grenzschicht vor Fassadentestelement A wird hier zunächst ein Desorptionseffekt an der Materialoberfläche erwartet, der dann im Lauf des langsam Anstiegs der relativen Luftfeuchte ausklingt und wieder in die Adsorption übergeht. Dementsprechend wurde zunächst ein Abfall der Oberflächentemperatur mit darauffolgendem langsamen Anstieg prognostiziert. In Abbildung 185 und Abbildung 186 werden die Rechenergebnisse bereinigt dargestellt, welche sich durch die Subtraktion der Lufttemperaturdifferenzen ergeben. Diese Ergebnisse sind somit entgegengesetzt zu den Erwartungen auf Basis der theoretischen Vorüberlegungen und Laborversuche.

Aufheizversuch: hygrothermische Materialreaktion auf Erwärmung mittels Radiator

Zur Untersuchung des Einflusses einer einmaligen Erwärmung wird in der Mitte des Kubus Ost ein Radiator platziert und für 54 Minuten von 17:06 bis 18:00 Uhr am 4. November 2020 betrieben. Vor und nach dieser Aufheizphase wurde jeweils das Fenster des Kubus kurz für circa zwei Minuten geöffnet.

Im Gegensatz zu einem TAM-Element werden hier massive Brettspernholzelemente anstelle intern, von extern mit warmer Luft klimatisiert. Der Versuch soll zeigen, inwiefern sich die freie Brettspernholzoberfläche anders verhält, als das abgedichtete Referenzobjekt. Die dampfbremsende Folie liegt dabei oberhalb der oberflächennahen Sensoren O_B_a1 bis _a5 sowie O_B_c1, _c2, _c3, siehe auch Abschnitt „Methodik zur Messung und Interpretation der Effekte in Kubus Ost“, S. 181.

Während des knapp einstündigen Betriebs des elektrischen Radiators stellt sich in der Grenzschicht vor Testelement A, dem unverkleideten Brettspernholzelement BSP_01, eine Temperaturerhöhung mit ausgeprägter vertikaler Schichtung ein. Nach Beendigung des Heizbetriebs wird in der Luftsicht in 800 mm Höhe (O_A_c1) eine Maximaltemperatur von bis zu 31,5 °C gemessen und damit rund 14 K über der Lufttemperatur nach der ersten Fensteröffnung. Entsprechend der Temperaturschichtung stellt sich eine dementsprechende Schichtung der relativen Luftfeuchten ein, vgl. Abbildung 187.

In der Grenzschicht vor Testelement A verbleibt nach der zweiten Fensteröffnung eine erhöhte Lufttemperatur, welche um circa 4 K über der Starttemperatur liegt und im restlichen Untersuchungszeitraum vom 4. – 6. November 2020 langsam sinkt, vgl. Abbildung 188.

Im Vergleich dazu verändern sich Temperatur und relative Luftfeuchte der durch die dampfbremsende Folie eingeschlossenen Luftsicht vor Testelement B (BSP_02) wesentlich weniger, vgl. Abbildung 189. Die Auswertung der so ermittelten Lufttemperaturunterschiede (A-B) in Abbildung 191 zeigt, dass die Differenz sowohl mit der Zeit zunimmt als auch umso ausgeprägter ausfällt, je höher die Messpunkte liegen.

Abbildung 187 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. Die Abbildung zeigt den Ausschnitt von vier Stunden vergrößert.

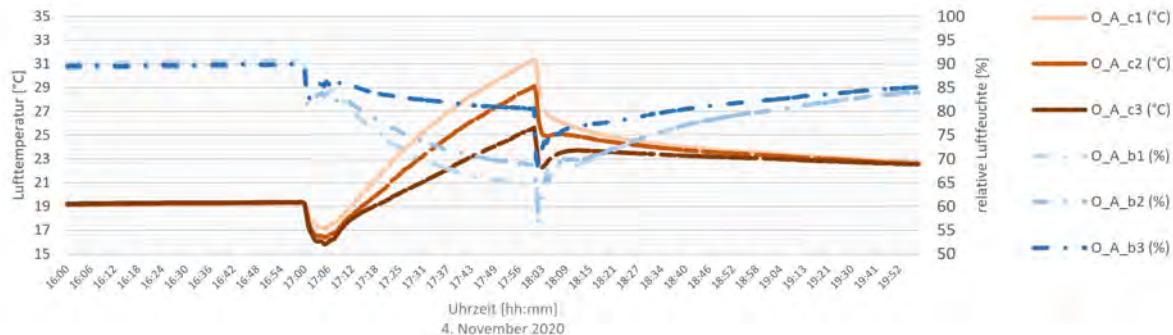


Abbildung 188 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. Der Kasten markiert die ersten vier Stunden des Versuchszeitraums.

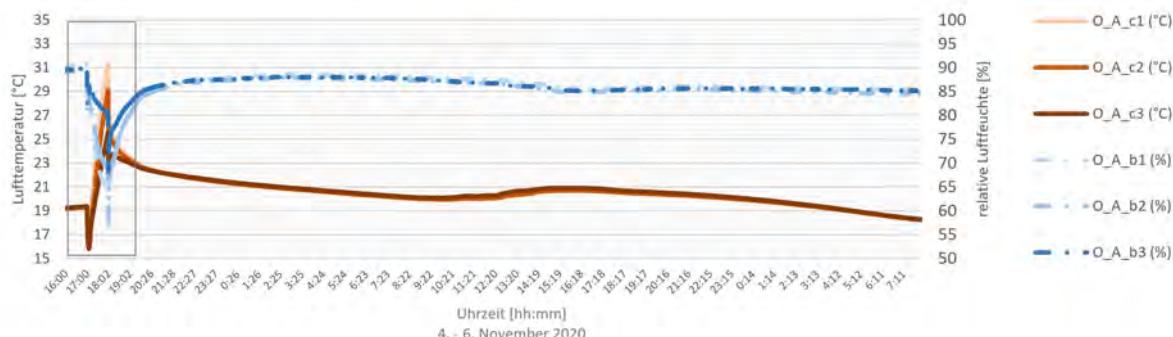


Abbildung 189 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. Die Abbildung zeigt den Ausschnitt von vier Stunden vergrößert.

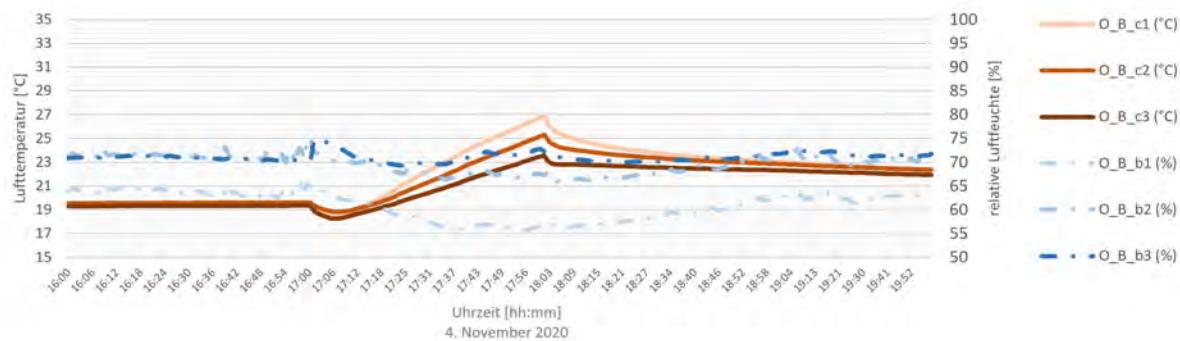


Abbildung 190 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

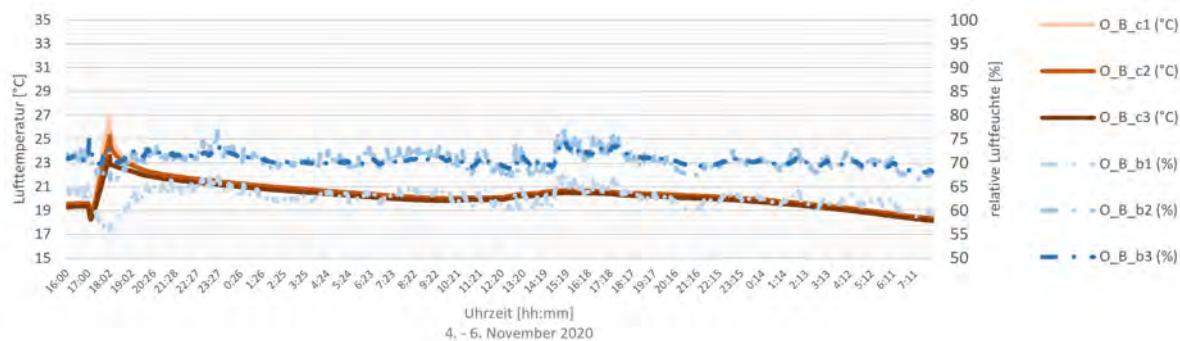


Abbildung 191 Aufheizversuch und resultierende Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A (BSP_01, frei) und Testelement B (BSP_02, mit Folie abgedichtet), Kubus Ost.

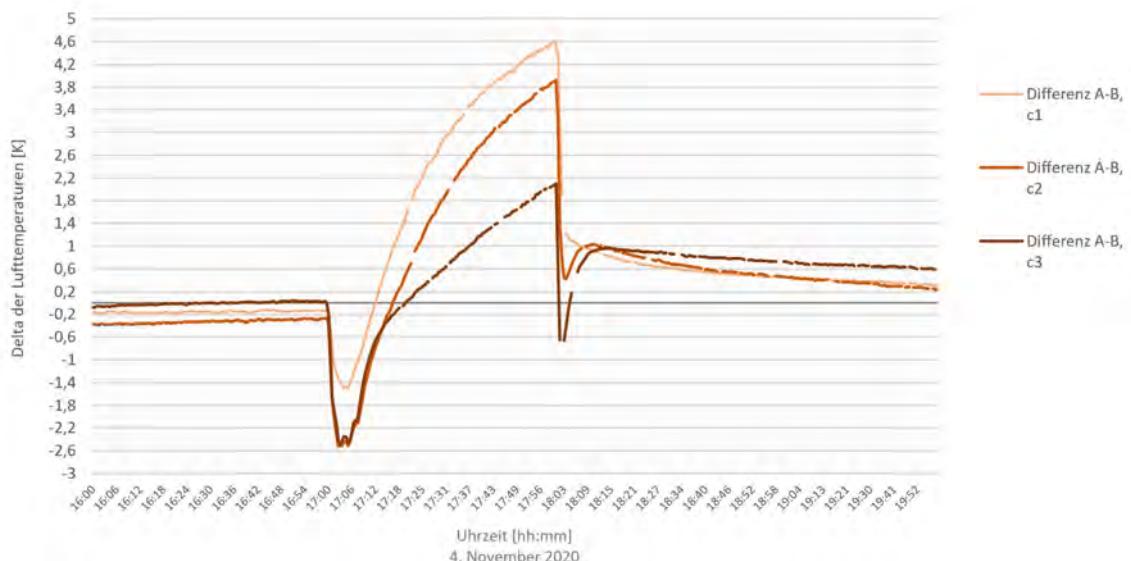
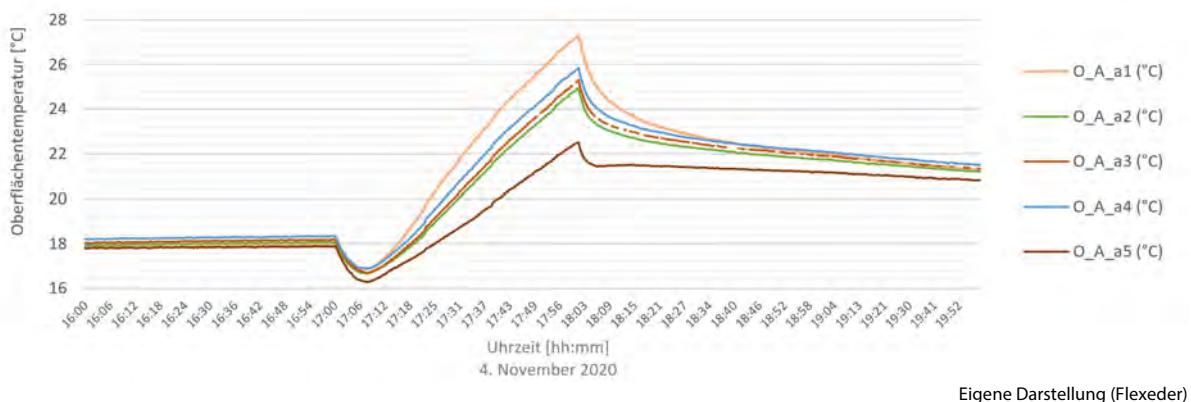


Abbildung 187 - Abbildung 191: eigene Darstellungen (Flexeder)

Abbildung 192 zeigt die Messwerte der Oberflächentemperaturen auf Fassadentelement A (BSP_01), welche in Kurvenform und thermischer Schichtung den Messwerten der Luftsicht vor diesem entsprechen, vgl. Abbildung 187. Es fällt dabei auf, dass sich die Oberfläche wesentlich geringer erwärmt als die Luftsicht direkt davor und auch die vertikale Spreizung der Temperaturamplitude zwar klar erkennbar, aber dennoch weniger stark ausgeprägt ist.

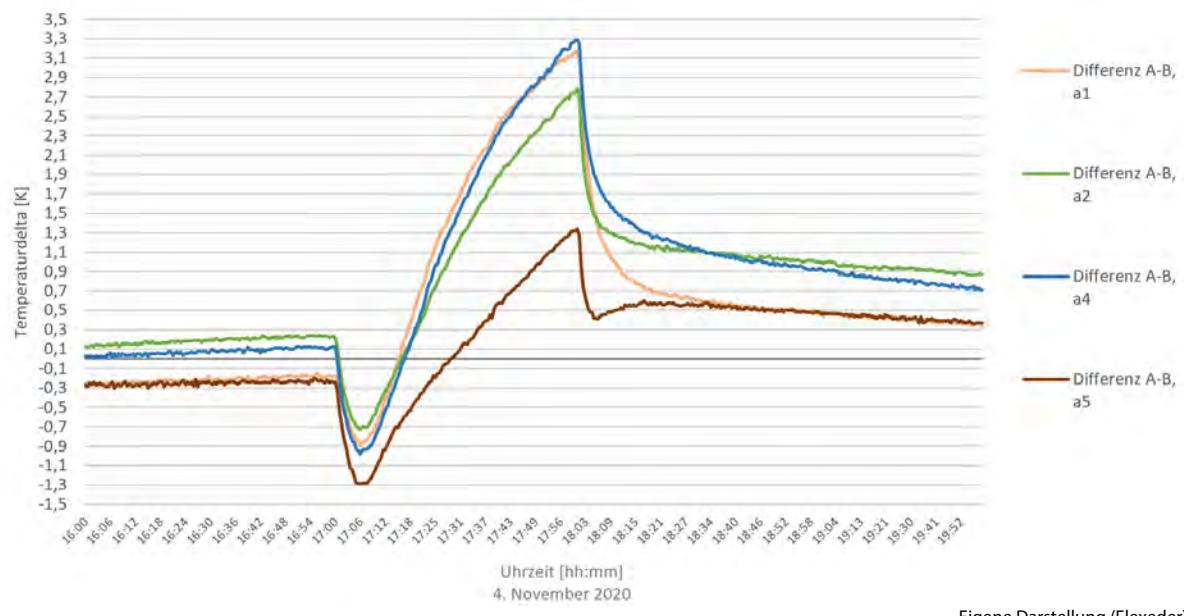
Abbildung 192 Oberflächentemperaturen an fünf verschiedenen Positionen in drei verschiedenen Höhen auf Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.



Eigene Darstellung (Flexeder)

Bei der Subtraktion der Referenzwerte von den gemessenen Oberflächentemperaturen (A-B) zeigt sich ein ausgeprägtes Delta, vgl. Abbildung 193. Infolge der ersten kurzzeitigen Fensteröffnung kühlt die Oberfläche von Testelement A um bis zu 1,3 K stärker ab, als das mit Folie verkleidete Referenztestelement B. Während des Heizbetriebs wird BSP_01 (A) im Folgenden dann um bis zu 3,3 K wärmer, als das verkleidete BSP_02 (B).

Abbildung 193 Kurzzeitige Fensterlüftung, 54 Minuten Heizbetrieb und weitere kurze Fensterlüftung - resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.



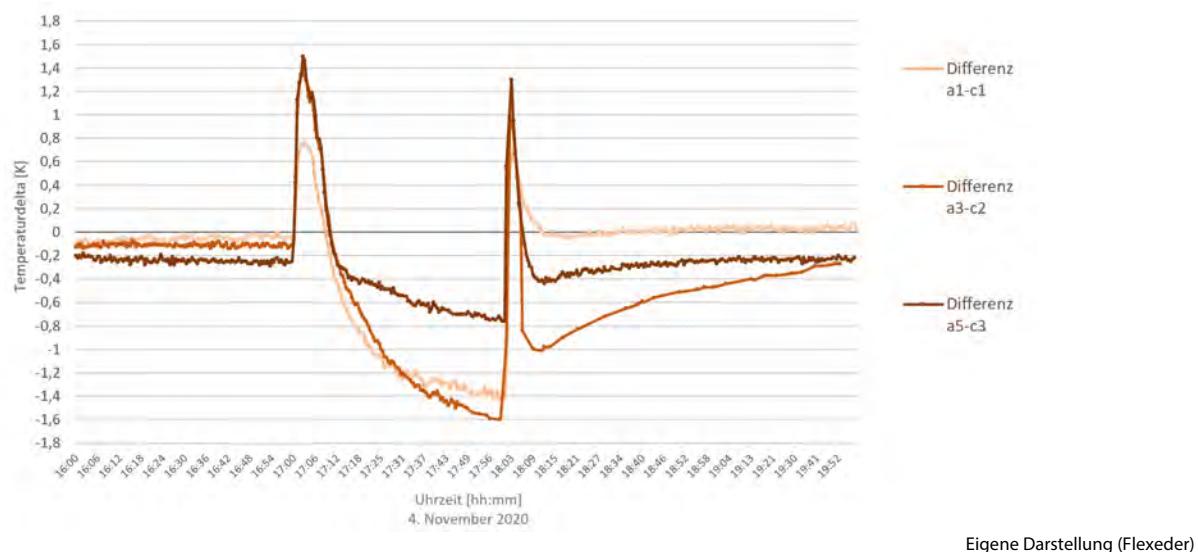
Eigene Darstellung (Flexeder)

Werden diese Temperaturdeltas der Oberflächen zudem durch die ermittelten Temperaturdeltas der Lufttemperaturen (Abbildung 187) bereinigt, so zeigt sich eine Kurvenform mit zwei lokalen Hochpunkten jeweils zum Zeitpunkt der Fensteröffnung und einem Abfall um bis zu 3 K während des Heizbetriebs, vgl. Abbildung 194. Dies lässt sich allerdings nur bedingt als erkennbare hygrothermische Pufferung der durch die Eingriffe erzeugten Luftfeuchteschwankungen erklären: Die relative Abkühlung der Oberfläche während des

Heizbetriebs ließe sich durch die Desorptionsvorgänge als Reaktion auf die allgemeine Senkung der relativen Luftfeuchte in der Grenzschicht (vgl. Abbildung 187) erklären. Doch auch die zwei Fensteröffnungen haben im Versuch einen Abfall der relativen Luftfeuchte zur Folge. Hier müsste sich demnach, ähnlich wie in den vorangegangenen Abschnitten zu den Desorptionsversuchen und auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel III, ebenso eine relative Temperaturabsenkung ergeben. Es zeigt sich also eine deutliche Diskrepanz zwischen der theoretisch erwarteten und der tatsächlich gemessenen relativen Abkühlung des Testelements A im Vergleich mit dem Testelement B.

Es wird vermutet, dass die erhöhte Trägheit des Referenztestelement B auf die Folienverkleidung und das dadurch eingeschlossene und möglicherweise isolierend wirkende Luftpölster zurück zu führen sein könnte. Um dieses unerwünschte Phänomen zu vermeiden, wurde bei den folgenden Versuchen die dampfbremsende Folie direkt auf der Materialoberfläche und somit unterhalb der Sensoren montiert.

Abbildung 194 Kurzzeitige Fensterlüftung, 54 Minuten Heizbetrieb und weitere kurze Fensterlüftung - resultierende Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftsicht.



Eigene Darstellung (Flexeder)

Die Auswertung der hygrometrischen Materialfeuchte mittels relativer Luftfeuchtemessung im Bauteilquerschnitt liefert Erkenntnisse über den Einfluss des Aufheizversuchs auf das gesamte Fassadentestelement. Hier zeigt sich, dass sich BSP_01 auch in den tiefer liegenden Schichten stärker erwärmt als das abgedichtete BSP_02, vgl. Abbildung 195 mit Abbildung 196. Im unabgedeckten Fassadentestelement BSP_01 ist zudem eine leichte Absenkung der relativen Luftfeuchte detektierbar. Generell ist die Feuchteverteilung bereits vor Versuchsbeginn in beiden Fassadentestelementen nicht identisch, was auf vorangegangene Adsorptionsversuche zurückzuführen ist. Es ist bemerkenswert, dass sich bei mittelfristiger Beobachtung keine nennenswerten Austrocknungsphänomene als Folge auf den Aufheizversuch erkennen lassen, vgl. Abbildung 197 und Abbildung 198.

Abbildung 195 Stoßlüfen, Aufheizen, Stoßlüften und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

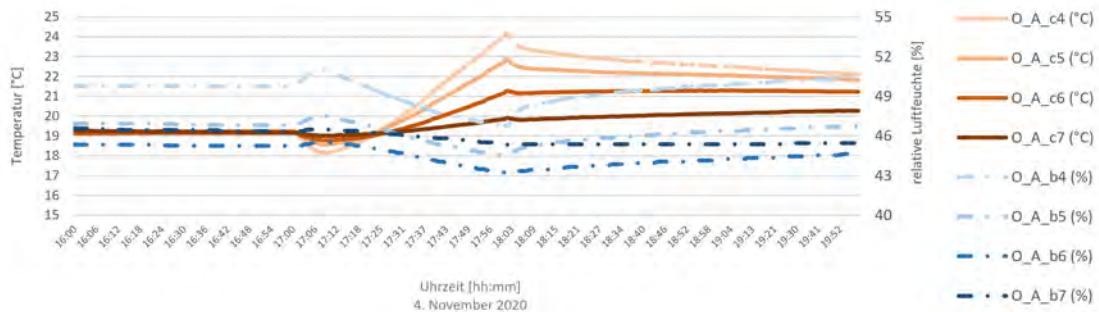


Abbildung 196 Stoßlüfen, Aufheizen, Stoßlüften und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

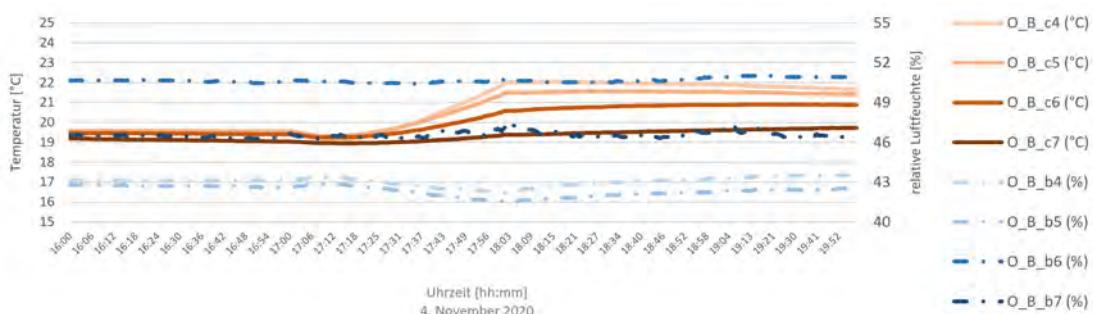


Abbildung 197 Mittelfristige Abkühlung nach dem Aufheizversuch (Stoßlüfen, Aufheizen, Stoßlüften) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

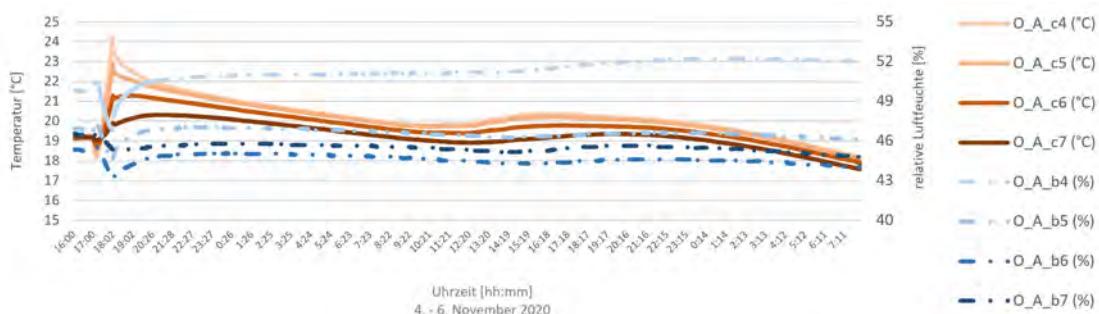


Abbildung 198 Mittelfristige Abkühlung nach dem Aufheizversuch (Stoßlüfen, Aufheizen, Stoßlüften) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost.

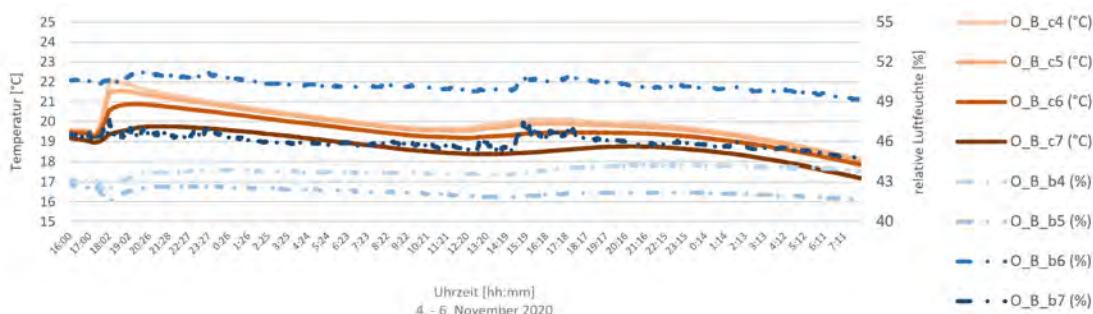


Abbildung 195 - Abbildung 198: eigene Darstellungen (Flexeder)

Experimenteller Vergleich verschiedener Brettsperrholzoberflächen anhand von Fassadentestelementen im Feldversuch (Kubus Ost)

Nina Flexeder

Hygrothermisches Verhalten von unbehandelter und lasierter Brettsperrholzoberfläche

Die Untersuchungen in Kapitel III, Abschnitt „Ergebnisse der instationären Labormessreihen“, S. 94 f, zum Feuchtepufferverhalten verschiedener Baustoffe haben gezeigt, dass allein eine Lasur den Moisture-Buffer-Value (MBV) von Holzoberflächen deutlich senken kann. So wurde für Brettsperrholz ohne weitere Beschichtung ein MBV von $0,70 \text{ kg/m}^2 \cdot \% \text{RH}$ und für Brettsperrholz mit Lasur ein verminderter MBV von $0,61 \text{ kg/m}^2 \cdot \% \text{RH}$ bestimmt (Ineichen, 2020).

Durch den direkten Vergleich der Fassadentestelemente BSP_01 und BSP_02 im passiven Feldversuch ohne gesteuerte Eingriffe sollen weiterführend folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

Wie wirkt sich eine innenseitige Lasur auf das hygrothermische Verhalten der Brettsperrholzoberfläche unter realistischen klimatischen Bedingungen aus? Lassen sich auch im Feldversuch Unterschiede zwischen der instationären Sorptivität von unbehandelter, lasierter und mit dampfbremssender Folie bekleideter Brettsperrholzoberfläche im passiven Verhalten ohne Klimatisierung messtechnisch feststellen? Inwiefern zeigen sich diese Unterschiede im thermischen Verhalten?

Zur Untersuchung wurde das passive Verhalten von BSP_01 und BSP_02 im Herbst 2020 in Kubus Ost mithilfe von Messmethode #H vgl. Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“, S. 82 ff., beobachtet. In diesem Zeitraum erfolgte keinerlei Eingriff (keine Lüftung, Heizung, Befeuchtung) und solare Einstrahlung wurde durch die Drehung des Kubus (Fenster nach Nord ausgerichtet) vermieden. Sämtliche Schwankungen des Innenklimas stammen somit aus der Erwärmung und Abkühlung des gesamten Kubus im Tag-Nacht-Rhythmus. Der Bauteilaufbau von BSP_01 gleicht den Außenwänden des Kubus Kösching. Das Fassadentestelement BSP_02 verfügt zudem über eine innenseitige Lasur, vgl. Abschnitt „Bauteilaufbauten in Brettsperrholzkonstruktion“, S. 152. Diese Lasurschicht wird als unerheblich beim Vergleich der thermischen Masse der beiden Testelemente angenommen.

Unter den Oberflächentemperatursensoren O_A_a1 und O_A_a5 wurde für die Dauer dieser Messperiode eine dampfbremsende Folie (sd-Wert 5 m) montiert, vgl. Abbildung 199. Zur Messdatengenerierung und -bereinigung werden mit Ausnahme der verschiedenen Folienabdeckungen dieselben Methoden wie im vorangegangenen Abschnitt verwendet. Gemäß den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wird erwartet, dass die Bauteiloberfläche von BSP_01 eine höhere Hygroskopizität als BSP_02 und diese wieder als BSP_01+Folie aufweist, vgl. Abbildung 200.

Abbildung 199 Messaufbau für die Experimente in Kubus Ost. Der Befeuchter wurde für diese Periode nicht benutzt.



Abbildung 200 Schematischer Vergleich der Temperatursensoren auf BSP_01 (links, teils mit Folienabdeckung) und BSP_02 (rechts). Die Pfeile geben das erwartete Gefälle des messbaren hygrothermischen Effekts an.

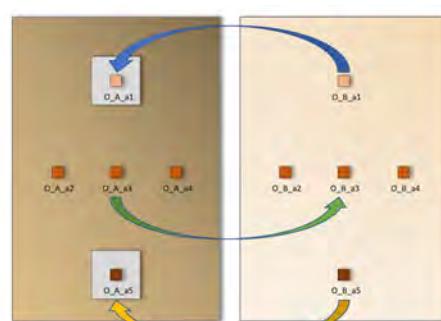


Abbildung 199 + Abbildung 200: eigene Darstellungen (Flexeder)

Zur besseren Übersichtlichkeit werden im Folgenden ausgewählte Ergebnisse von 72 Stunden mit den für diesen Zeitraum typischen Messwerten gezeigt. Die Raumlufttemperatur zeigt in diesem Abschnitt tageszeitliche Schwankungen zwischen rund 18 °C und 23 °C. Dementsprechend variieren auch die Messwerte der relativen Luftfeuchte um rund 2,5 bis 3,0 %-Punkte, vgl. Abbildung 201. Die Oberflächen weisen ähnliche Temperaturschwankungen auf, vgl. Abbildung 202. Für die weitere Auswertung werden die Messwerte auf/vor Fassadentestteil B jeweils von den Messwerten auf/vor Fassadentestteil A subtrahiert. Die resultierenden Temperaturdifferenzen werden zunächst noch unbereinigt in Abbildung 203 dargestellt. Ungeachtet möglicher systematischer Abweichungen der Messtechnik deutet ein lokales Maximum demzufolge darauf hin, dass die Fläche an Fassadentestteil A zu diesem Zeitpunkt wärmer war, als an Fassadentestteil B.

Abbildung 201 Relative Luftfeuchten und -temperaturen, gemessen in der Mitte des Kubus Ost auf drei verschiedenen Höhen.



Abbildung 202 Temperaturen, gemessen an der Bauteiloberfläche von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

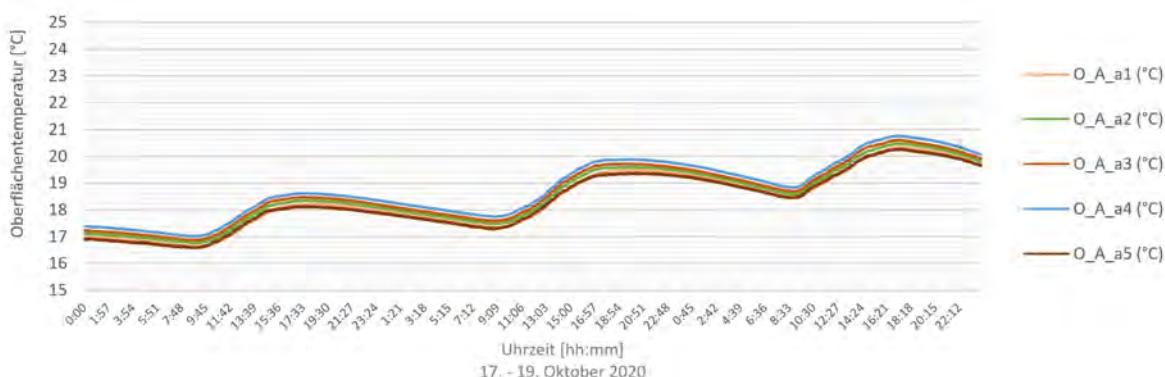


Abbildung 203 Temperaturdifferenzen zwischen den Messwerten von Testelement A (BSP_01) und Testelement B (BSP_02), Kubus Ost.

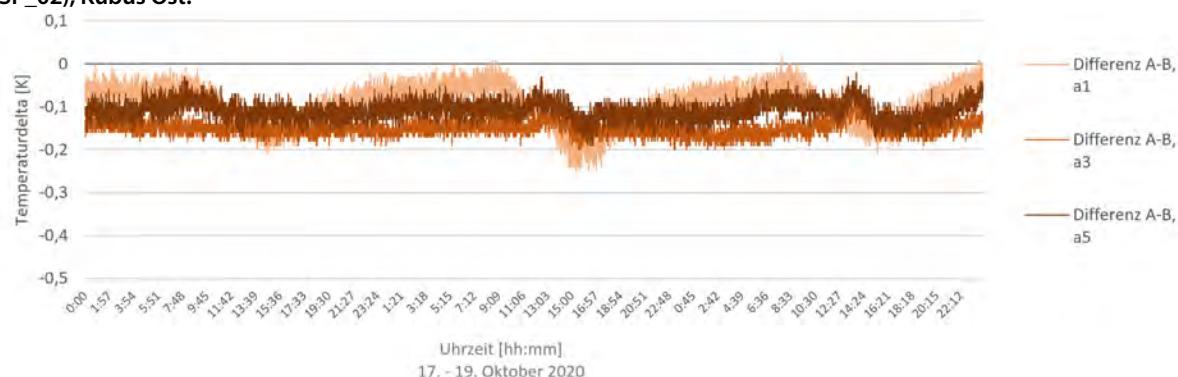
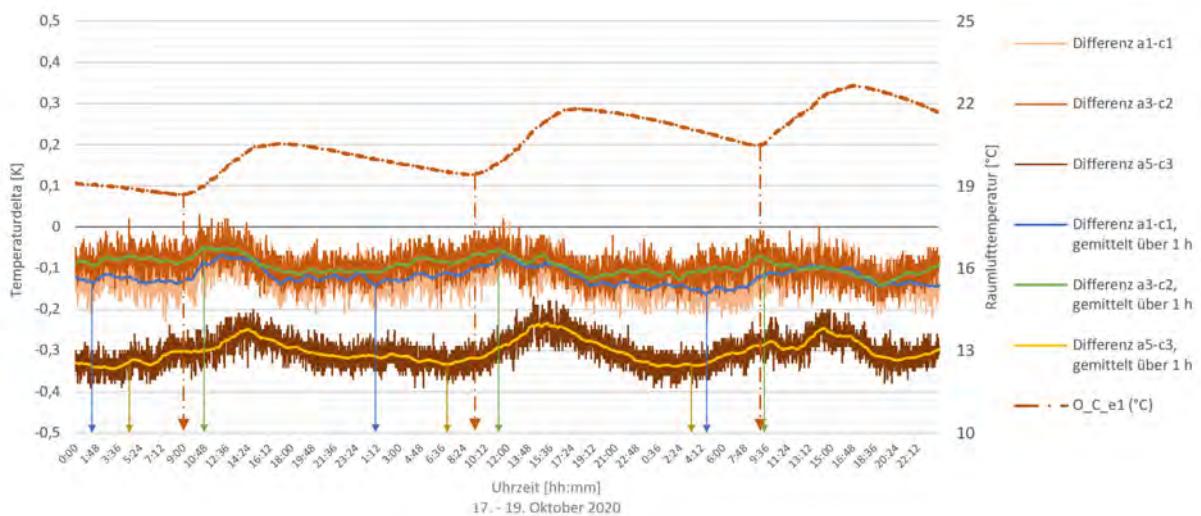


Abbildung 201 - Abbildung 203: eigene Darstellungen (Flexeder)

Da sich zudem allerdings auch stets kleinere Differenzen in der lateralen Lufttemperaturverteilung im Kubusinneren ergeben, werden diese Werte anschließend anhand der Messwerte aus den Grenzschichten bereinigt. Die resultierenden Kurven sowie der gleitende Durchschnitt über je eine Stunde (gebildet aus dem Messwert selbst, 59 Datenpunkten vor jenem, 60 Datenpunkten nach jenem) können aus Abbildung 204 abgelesen werden. Für die weiterführende Interpretation der Ergebnisse ist hier außerdem die vorherrschende Innenraumtemperatur aufgetragen, welche täglich morgens um circa 9 Uhr am kühlssten (lokales Minimum) und am späten Nachmittag um circa 17 Uhr am wärmsten (lokales Maximum) ist.

Abbildung 204 Auswertung der nach der Temperaturdifferenzen der Grenzschicht bereinigten Oberflächentemperaturdifferenzen. Die Pfeile markieren die lokalen Minima/Maxima der gemittelten Kurven.



Eigene Darstellung (Flexeder)

Zur Beantwortung der Frage: „Wann ist die lasierte Brettsperrholzoberfläche BSP_02 wärmer als ein mit Folie abgedichtetes Referenz-Testelement?“ müssen die lokalen Minima der Kurven a1-c1 (blau) und a5-c3 (gelb) betrachtet werden. Demnach ist die lasierte Brettsperrholzoberfläche in den frühen Morgenstunden (circa 1 – 6 Uhr) um rund 0,15 K wärmer als an späteren Tageszeitpunkten. Am frühen Nachmittag (circa 12 – 15 Uhr) zeigt sich bei diesen Kurven ein lokales Maximum, hier ist die lasierte Brettsperrholzoberfläche vergleichsweise kühler als die mit Folie abgedichtete Referenzfläche.

Zur Beantwortung der Frage: „Wann ist die unbehandelte Brettsperrholzoberfläche BSP_01 wärmer als die lasierte Brettsperrholzoberfläche BSP_02?“ müssen die lokalen Maxima der Kurve a3-c2 (grün) betrachtet werden. Diese Kurve lässt jeweils vormittags (circa 9 – 12 Uhr) Erhebungen erkennen. Daraus wird geschlossen, dass sich die unbehandelte Brettsperrholzfläche in diesem Zeitraum gegenüber der lasierten Brettsperrholzoberfläche geringfügig stärker erwärmt hat.

Die Vermutung, dass die unbehandelte gegenüber der lasierten Brettsperrholzoberfläche ein größeres hygrothermisches Potential aufweist, lässt sich anhand der passiven Messungen demnach bestätigen. Darüber hinaus zeigt sich, dass sich beide Holzoberflächen morgens erwärmen und somit dann, wenn die Raumluft am kühlssten ist. Es sind für den untersuchten Messzeitraum also gewisse Pufferungseffekte nachweisbar, wobei die Temperaturunterschwankungen der Luft um das circa 20-fache größer sind als die ermittelten Oberflächentemperaturunterschiede durch Sorptionswärmee.

Vergleich von unbehandeltem und mit Lehmplatte und -putz verkleidetem Brettsperrholzelement

Zur Weiterentwicklung der TAM-Oberfläche wird bereits in Kapitel III, Abschnitt „Variantenstudie zur TAM-Beplankung via hygrothermischer Bauteilsimulation“, S. 106 ff, die Idee erprobt, die Brettsperrholzoberfläche durch zusätzlich aufgebrachte Lehmschichten zu optimieren. Eine solche Modifikation hätte nicht nur eine Änderung der Hygroskopizität der dem Innenraum zugewandten Oberfläche, sondern auch eine generelle Erhöhung der Bauteilmasse zur Folge.

Es wird deswegen im Folgenden mithilfe von Messmethode #G, vgl. Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“, S. 82 ff., zunächst untersucht, welchen Einfluss eine zusätzliche Beplankung der Brettsperrholzwand mit Lehm auf das Puffervermögen durch thermische Masse hat. Hierzu wird die Basisvariante BSP_01 mit der Variante BSP_03 verglichen, vgl. Abschnitt „Bauteilaufbauten in Brettsperrholzkonstruktion“, S. 152 ff. Der Versuchsaufbau gleicht jenem aus den vorangegangenen Abschnitten, wobei in diesem Fall die dampfbremsende Folie direkt auf das Testelement B und somit unterhalb der oberflächennahen Sensoren montiert wurde, vgl. Abbildung 205. Die Bildung einer isolierenden Luftsicht zwischen Folie und Bauteiloberfläche soll hiermit weitestgehend vermieden werden.

Der Versuchsablauf ist komplett passiv, ohne steuernde Eingriffe oder Luftwechsel. Sämtliche klimatischen Schwankungen sind somit allein auf Temperaturunterschiede im Tag-Nacht-Rhythmus zurückzuführen.

Abbildung 205 Messaufbau für die Experimente in Kubus Ost mit BSP_01 (links) und BSP_03, abgeklebt (rechts).



Abbildung 206 Einbau der Kombisensoren zur Erfassung der Bauteiltemperatur und -feuchte in jeweils vier verschiedenen Tiefen. Da BSP_03 (rechts) über eine zusätzliche 25 mm starke Innenbeplankung verfügt, erreichen hier nur die Sensoren O_B_b6/c6 und O_B_b7/c7 die Brettsperrholzsicht.

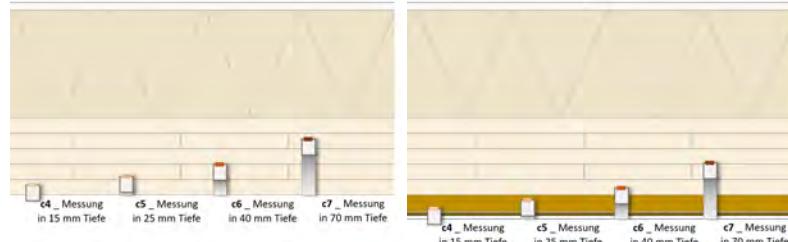


Abbildung 205 + Abbildung 206: eigene Darstellungen (Flexeder)

Beim Vergleich des hygrothermischen Verhaltens im Bauteilquerschnitt gilt es zu beachten, dass die Kombisensoren zur hygrometrischen Materialfeuchtebestimmung stets mit 15 mm, 25 mm, 40 mm und 70 mm Abstand zur Oberfläche montiert wurden. Dies bedeutete, dass diese durch die zusätzliche Beplankung von BSP_03 nicht in denselben Schichten des Brettsperrholzelementes wie in BSP_01 sitzen, vgl. Abbildung 206.

Es werden zunächst die Messergebnisse einer Woche im Dezember 2020 betrachtet. Die Messung des hygrothermischen Verhaltens im Bauteilquerschnitt kurz nach dem Einbau des Fassadentestelements BSP_03 (beim Einbau bereits mit Folie abgedichtet) zeigt, dass die Ausgangs-Materialfeuchte in Fassadentestelement B (BSP_03, rechts) wesentlich über derjenigen in BSP_01 liegt, vgl. Abbildung 207 mit Abbildung 208. Die Verläufe der Temperaturwerte beider Testelemente hingegen folgen auf ähnliche Weise mit erkennbaren Verzögerungen grob den Messwerten der Lufttemperatur in Kubusmitte, vgl. Abbildung 209. Diese offensichtlichen Effekte der thermischen Pufferung werden im Folgenden im Detail untersucht.

Abbildung 207 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

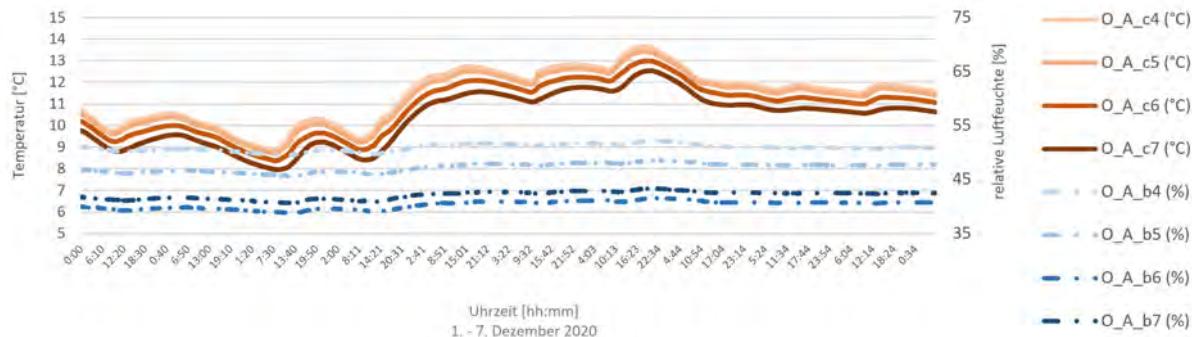


Abbildung 208 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP 03 abgedichtet, Kubus Ost.

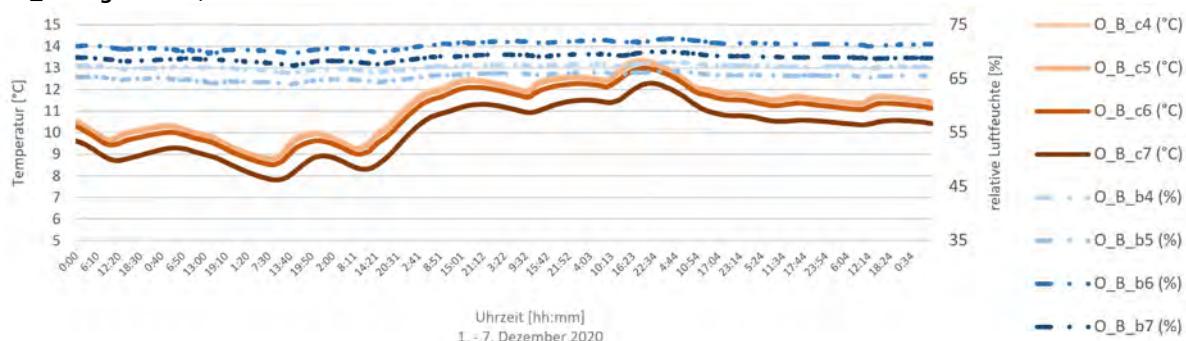


Abbildung 209 Relative Luftfeuchte und -temperatur, gemessen in der Mitte von Kubus Ost in drei verschiedenen Höhen. Der Kasten markiert den folgenden Untersuchungsausschnitt.



Abbildung 207 - Abbildung 209: eigene Darstellungen (Flexeder)

Zur weiteren Diskussion wird der Untersuchungszeitraum auf die Tage 2. – 4. Dezember 2020 beschränkt. Beim Vergleich der Messwerte fällt auf, dass die Kurven der relativen Luftfeuchte und -temperatur in der Grenzschicht direkt vor Fassadentestelement A wesentlich homogener verlaufen als in Kubusmitte, vgl. Abbildung 210 mit Abbildung 211. Die gemessenen Oberflächentemperaturen auf Testelement A (BSP_01) werden für den Betrachtungszeitraum in Abbildung 212 dargestellt. Beim Vergleich der Temperaturdifferenzen zu Testelement B (BSP_03, abgedichtet), sind deutliche Schwankungen erkennbar, vgl. Abbildung 213. Die Messwerte von Testelement B wurden dabei stets von jenen des Testelement A subtrahiert. Ist die Kurve (normiert) positiv, war demnach die unbehandelte Brettsperrholzoberfläche (BSP_01) zu diesem Zeitpunkt wärmer als die durch Folie abgedichtete Lehmoberfläche (BSP_03).

Da sich die Lufttemperaturen vor Testelement A und B im Untersuchungszeitraum ebenfalls geringfügig unterscheiden, vgl. Abbildung 214, werden die errechneten Differenzen im Folgenden durch die Lufttemperaturen bereinigt in Abbildung 215 dargestellt.

Abbildung 210 Relative Luftfeuchte und -temperatur, gemessen in der Mitte von Kubus Ost in drei verschiedenen Höhen, dargestellt für einen Zeitraum von drei Tagen.

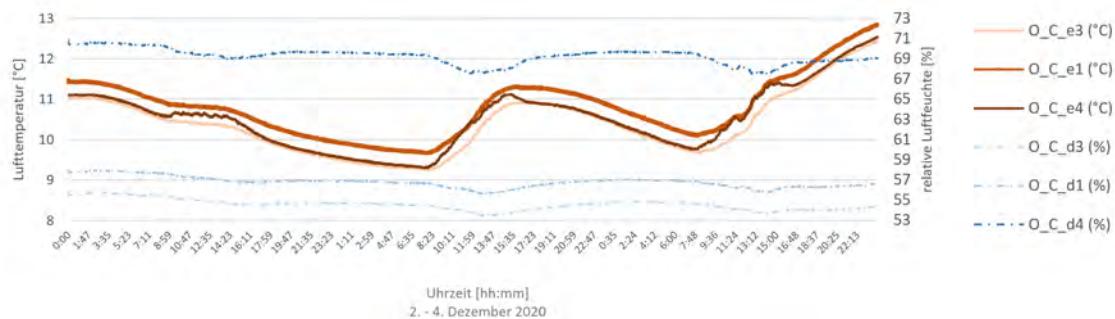


Abbildung 211 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

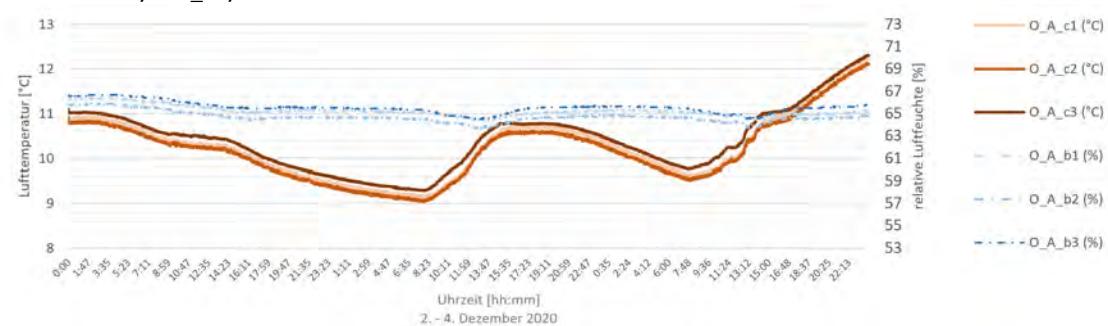


Abbildung 212 Temperaturen, gemessen an der Bauteiloberfläche von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost.

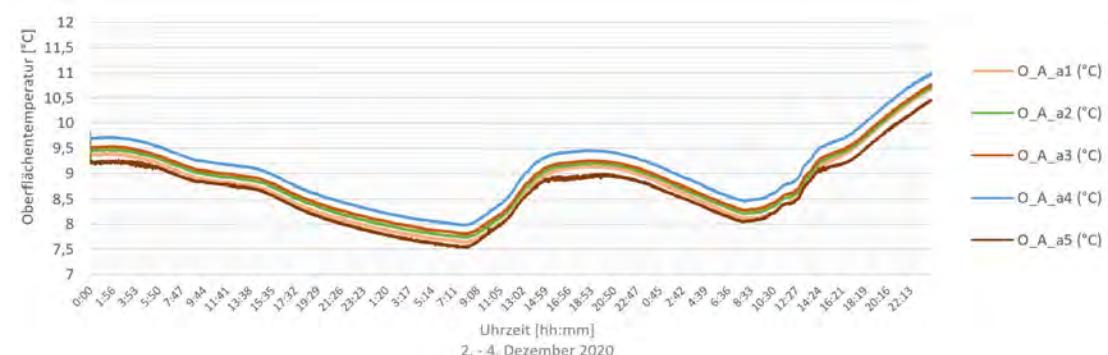


Abbildung 213 Temperaturdifferenzen zwischen den Messwerten von Testelement A (BSP_01) und Testelement B (BSP_03 abgedichtet), Kubus Ost.

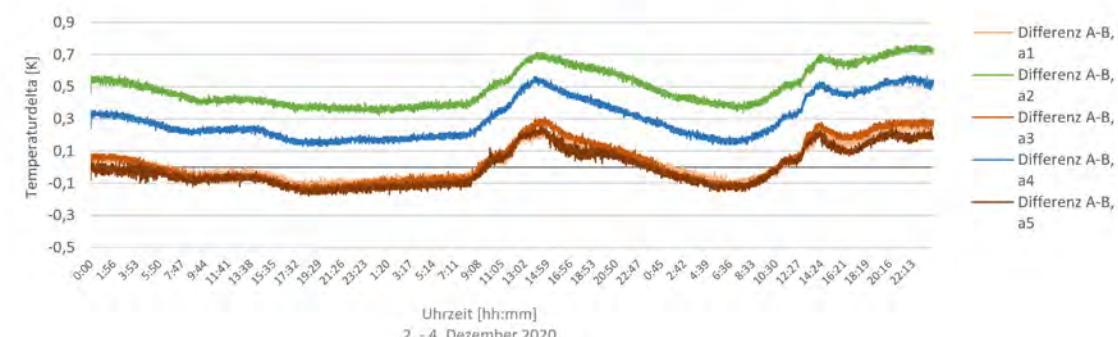


Abbildung 214 Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A (BSP_01, frei) und Testelement B (BSP_03, mit Folie abgedichtet), Kubus Ost.

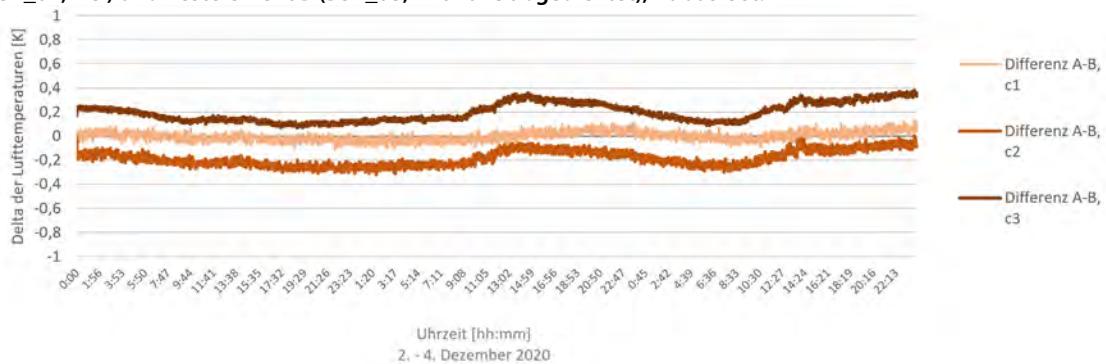


Abbildung 215 Auswertung der nach der Temperaturdifferenzen der Grenzschicht bereinigten Oberflächentemperaturdifferenzen. Die Pfeile markieren die lokalen Minima/Maxima der Kurve der Lufttemperatur gemessen in der Raummitte von Kubus Ost (O_C_e1).

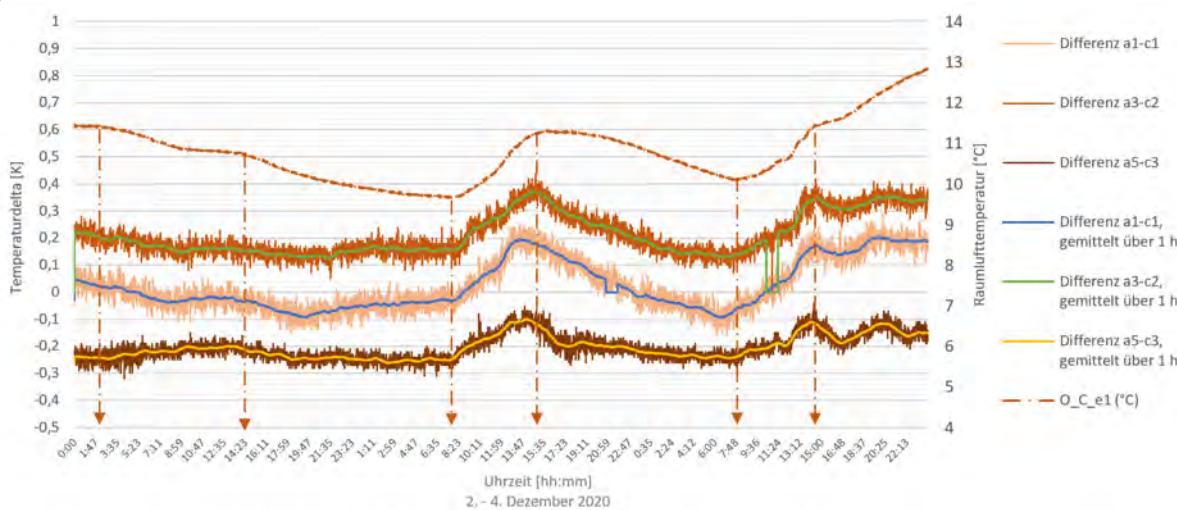


Abbildung 210 - Abbildung 215: eigene Darstellungen (Flexeder)

Aus Abbildung 215 lassen sich deutliche Parallelen zwischen den bereinigten Werten der Temperaturdifferenzen und der allgemeinen Lufttemperatur mittig im Kubus erkennen. So steigen beispielsweise alle vier Kurven am zweiten Tag von morgens gegen 8 Uhr bis nachmittags um circa 15 Uhr deutlich an. Dies bedeutet, dass sich in jenem Zeitraum, in welchem sich die allgemeine Temperatur im Kubus erhöht, die Oberfläche von Testelement A (BSP_01) stärker erwärmt als das abgeklebte Testelement B (BSP_03). Die Messwerte lassen sich demnach folgendermaßen interpretieren:

Es ist aus den vorangegangenen Versuchen (siehe Abschnitt „Hygrothermisches Verhalten von unbehandelter und lasierter Brettsperrholzoberfläche“, S. 196 ff) bekannt, dass die hygrokopische Oberfläche von Brettsperrholz durch den gegenläufigen hygrothermischen Effekt („hygrothermische Masse“) passive Klimaschwankungen geringfügig puffern kann.

Testelement A, welches über eine frei sorbierende Brettsperrholzoberfläche verfügt, hat demnach das Potential, die klimatischen Lufttemperaturschwankungen nicht nur durch seine thermische, sondern auch durch seine hygrothermische Masse abzumildern. Testelement B, welches durch die aufgebrachte Folie am Sorptionsprozess gehindert wird, verfügt in diesem Versuch lediglich über das thermische, nicht aber das hygrothermische Potential. Dennoch zeigt Abbildung 215, dass die Oberflächen von Testelement B in den warmen Phasen kühler und in den kalten Phasen wärmer als Testelement A sind, ergo die Temperaturschwankungen noch besser puffern. Daraus folgt: die erhöhte thermische Masse durch die zusätzlich aufgebrachte Lehmschicht (BSP_03) zeigt größeres Pufferpotential als die erhöhte hygrothermische Masse durch die hygrokopische Oberfläche des unbehandelten Brettsperrholzelements (BSP_01).

Untersuchung der klimaregulierenden Langzeitwirkung durch die Hygroskopizität der Brettsperrholzwände im Realmaßstab (Kubus Kösching)

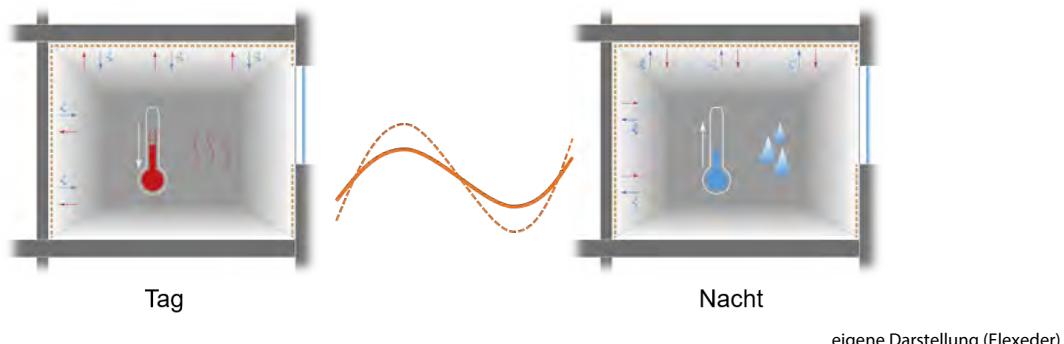
Nina Flexeder

Hypothese zur passiven hygrothermischen Pufferung von natürlichen Klimaschwankungen

Die Ergebnisse der kurzzeitigen Sprungversuche aus Kapitel III lassen vermuten, dass nicht nur die rein thermischen, sondern auch das hygrothermischen Materialparameter messbare Auswirkungen auf das instationäre thermische Langzeitverhalten von Brettsperrholzwänden aufweisen. Hieraus wird folgende Hypothese entwickelt und im Feldversuch (Realmaßstab) über rund zehn Monate hinweg experimentell geprüft:

Tagsüber, bei einfallender Solarstrahlung, trocknen die hygroskopischen Oberflächen und wirken kühlend. Abends und nachts, wenn die Raumlufttemperatur sinkt, wird die Raumluftfeuchte wieder adsorbiert, wodurch die Oberflächentemperatur steigt. Dies würde bedeuten, dass eine Wandkonstruktion ungeachtet ihrer thermischen Masse Temperaturschwankungen auch durch hygrothermisches Verhalten puffern kann. Der Wert der hygrothermischen Masse hätte demnach ebenso Relevanz bei der Beurteilung der langfristigen klimaregulierenden Wirkung einer massiven Brettsperrholzwand.

Abbildung 216 Prinzip der hygrothermischen Pufferung



Methoden zur Messung und Beurteilung hygrothermischer Effekte im Langzeitversuch

Inwieweit dieser selbstregulierende Mechanismus im Feldversuch messbar auftritt, wird mittels Falsifizierung überprüft. Wenn die Oberfläche am Sorptionsprozess gehindert wird (d.h. ihre Hygroskopizität wird ausgeschaltet, beziehungsweise wesentlich gedämpft), so sollten die hygrothermischen Pufferungseffekte bei sonst gleichbleibenden Bedingungen signifikant geringer ausfallen.

Zur Untersuchung werden im großen Brettsperrholzkubus in Kösching über eine Dauer von 293 Tagen (6. August 2020 - 26. Mai 2021) unter anderem folgende Messwerte mit einer Periode von 10 Minuten kontinuierlich und ohne signifikante Störungen oder Eingriffe aufgezeichnet:

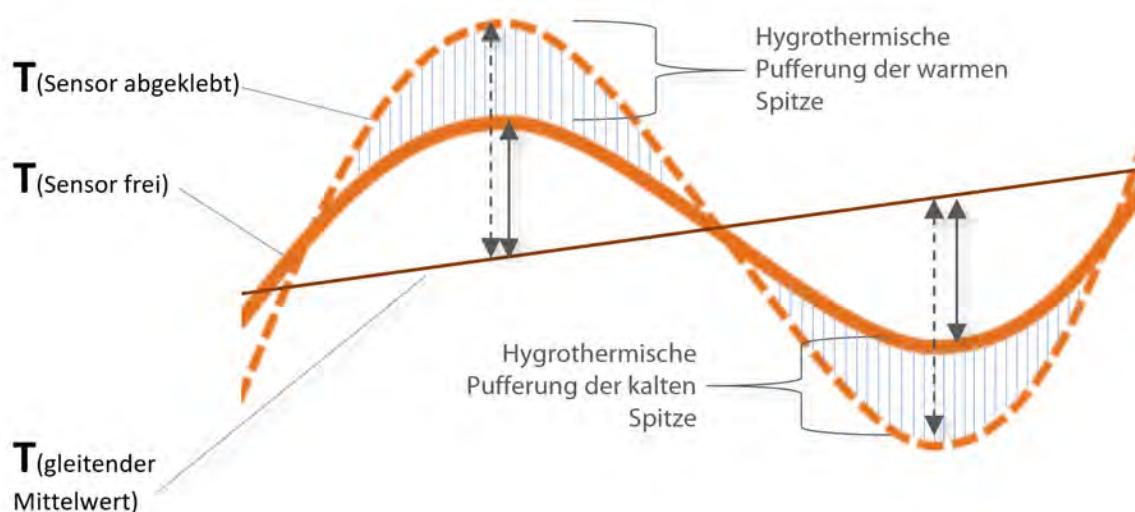
Das Materialverhalten der Brettsperrholzaußentände (rein passiv, ohne aktive Befeuchtung, Belüftung oder Heizung) wird durch die Messung der relativen Luftfeuchte RH [%] sowie der zugehörigen Lufttemperatur [°T] in den Schichttiefen 15 mm, 25 mm, 40 mm und 70 mm der nach Nordost ausgerichteten Außenwand dokumentiert. Die durch die tages- sowie jahreszeitlich bedingten Schwankungen des Außenklimas ausgelösten Änderungen des oberflächennahen Innenklimas werden ebenso durch Monitoring der relativen Luftfeuchte RH [%] sowie der zugehörigen Lufttemperatur [°T] aufgezeichnet. In unmittelbarer Nähe dazu werden die resultierenden Oberflächentemperaturen [°T] mit und ohne Folienabdeckungen (sd-Wert 5 m) gemäß der Messmethode #H gemessen, vgl. Abschnitt „Methoden zur Quantifizierung dynamischer hygrischer und hygrothermischer Effekte“, S. 82 ff. Auf Basis dieser Messergebnisse werden zunächst die zwei kältesten Wintertage und die zwei wärmsten Sommertage ausgewählt und isoliert betrachtet. Die

hygrothermischen Effekte auf Materialebene werden sodann durch die Differenzen der Ergebnisse der primären Oberflächentemperaturmessung im Zwillingsversuch (Messmethode #G) berechnet.

(Für ausführlichere Beschreibungen der Messmethodik wird an dieser Stelle auf den vorangegangenen Abschnitt „Hygrothermisches Verhalten des Brettsperrholzkubus im Realmaßstab infolge eines gesteuerten isothermen Feuchtesprungs“, S. 179 sowie Kapitel IV, Abschnitt „Primäre Oberflächentemperaturmessung“, S. 163, verwiesen.)

Zur Beurteilung des langfristigen tragen thermischen Verhaltens der Konstruktion werden anschließend die Kurven der gemessenen Temperatur mit und ohne Folienabdeckung mit dem gleitenden Mittelwert der gemessenen Oberflächentemperatur verglichen, vgl. Abbildung 217. Als Merkmal einer guten Pufferwirkung wird die Abflachung der Temperaturschwankungen definiert. Liegt die Oberflächentemperatur zum Zeitpunkt t über dem Mittelwert der letzten zwölf und kommenden zwölf Stunden, so ist eine kühlere Oberfläche wünschenswert. Ist die Oberflächentemperatur zum Zeitpunkt t kühler als der gleitende Mittelwert, so würde hingegen eine vergleichsweise wärmere Oberfläche puffernd wirken. Zur Quantifizierung der Dauer und Amplitude der Pufferwirkung wird die eingeschlossene Fläche zwischen den zwei Temperaturkurven (Sensor abgeklebt vs. Sensor frei) herangezogen. Das hygrothermische Potential wird somit im Rahmen dieses Abschnitts als Integral mit der Einheit Kelvinstunden [Kh] dargestellt.

Abbildung 217 Schema zur rechnerischen Beurteilung der hygrothermischen Pufferung im Langzeitexperiment



eigene Darstellung (Flexeder)

Da der Kubus im Untersuchungszeitraum lediglich passiv im Monitoring überwacht und nicht aktiv beheizt wurde, liegen die Temperaturschwankungen trotz der Pufferungseffekte zeitweilig weit außerhalb der Komfortzonen für typische Nutzungen.

Messergebnisse des passiven Langzeitfeldversuchs im Brettsperrholzkubus Kösching

Abbildung 218 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf von relativer Luftfeuchte und -temperatur gemessenen in verschiedenen Tiefen der Brettsperrholzaussenwand (Materialfeuchtebestimmung durch hygrometrische Messung). Im unklimatisierten Testkubus variierte die Temperatur im Aussenwandquerschnitt im Betrachtungszeitraum von 293 Tagen zwischen rund 1 °C und 33 °C. Bei Reduktion der Betrachtung auf den wärmsten sowie den kältesten Zeitraum wird auch der Einfluss der tageszeitlichen Schwankungen deutlich, vgl. hierzu Abbildung 219 und Abbildung 220. Außerdem ist eine klare Abhängigkeit von Materialtemperatur und -feuchtigkeit von der Schichttiefe erkennbar. Auffällig ist dabei, dass - unabhängig von Sommer oder Winter - die Temperatur nach außen stets abnimmt. Das Feuchteprofil scheint sich allerdings beim Übergang Sommer-Winter umzukehren.

Abbildung 218 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in verschiedenen Tiefen des Wandquerschnitts über den Jahresverlauf. Kubus Kösching, vgl. BSP_01

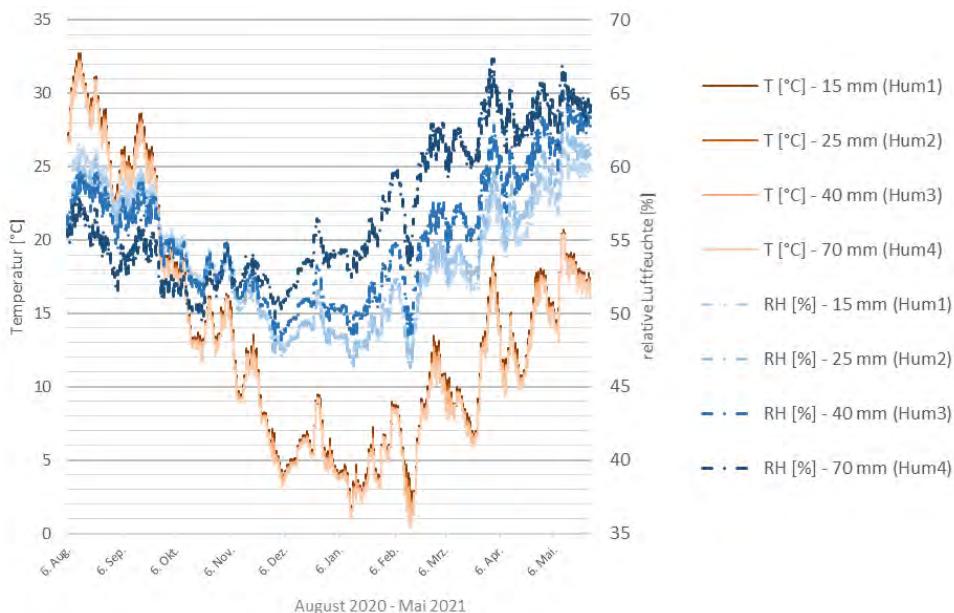


Abbildung 219 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in verschiedenen Tiefen des Wandquerschnitts über die zwei heißesten Messtage im August 2020. Kubus Kösching, vgl. BSP_01

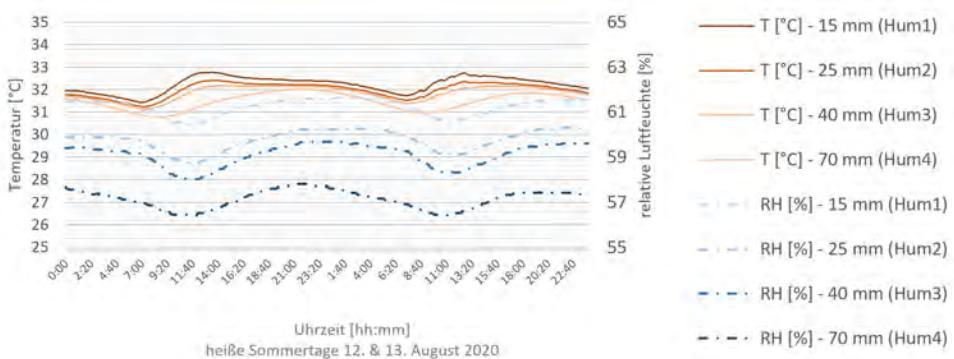


Abbildung 220 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in verschiedenen Tiefen des Wandquerschnitts über die zwei kältesten Messtage im Februar 2021. Kubus Kösching, vgl. BSP_01

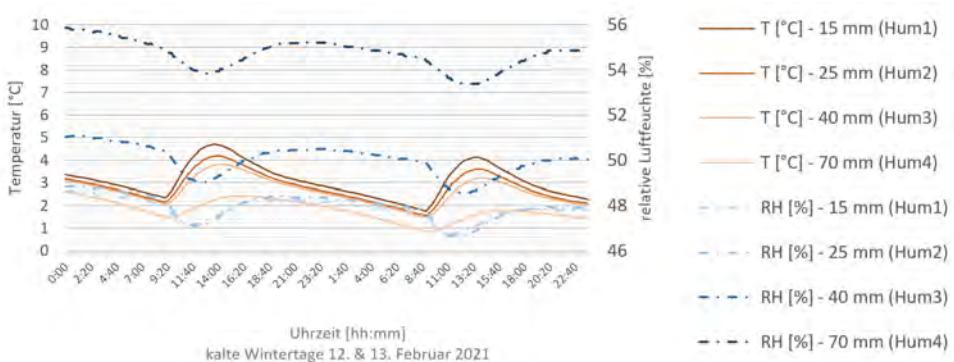
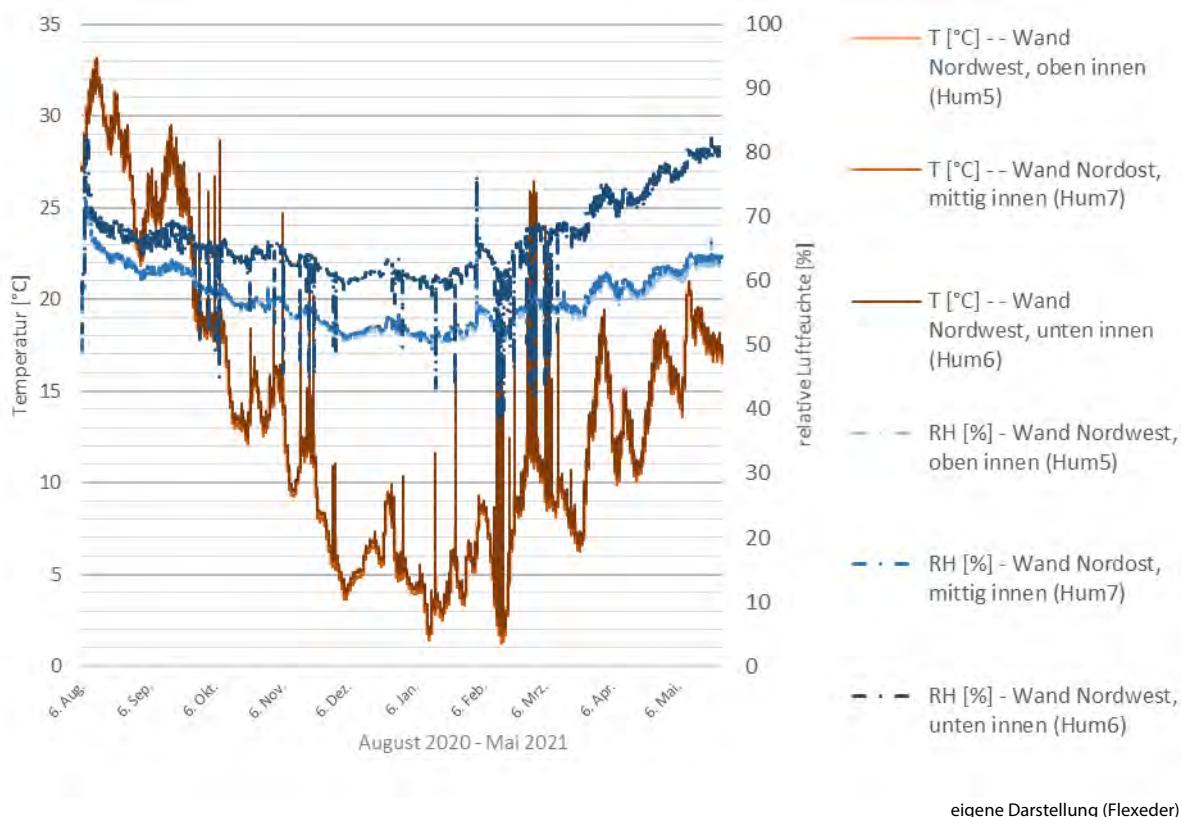


Abbildung 218 - Abbildung 220: eigene Darstellungen (Flexeder)

Die gemessenen Lufttemperaturen und -feuchten jeweils in der Luftsicht kurz vor der Bauteiloberfläche zeigen ähnliche Tendenzen, vgl. Abbildung 221. Allerdings fällt auf, dass insbesondere die Werte, welche im unteren Bereich der Nordwestwand innen (Hum6) gemessen wurden, teils starke Fluktuationen aufweisen. Diese Sprünge könnten möglicherweise auf solare Einstrahlung zurückzuführen sein. Zudem wird beobachtet, dass die Werte der relativen Luftfeuchte in den Grenzschichten deutlich über jenen liegen, welche im Bauteilquerschnitt gemessen wurden. Die gemessenen Lufttemperaturen liegen hingegen in einem ähnlichen Bereich.

Abbildung 221 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in der Grenzschicht an verschiedenen Stellen im Kubus



eigene Darstellung (Flexeder)

Die resultierenden Temperaturen der innenseitigen Brettsperrholzoberflächen wurden an insgesamt acht Punkten gemessen: zwei PT-1000-Sensoren an der Decke (DP1e, DP2e, blau dargestellt), vier PT-1000-Sensoren an der Nordwestwand (DP3e – DP6e, rot dargestellt) und zwei PT-1000-Sensoren an der Nordostwand (DP7e, DP8e, gelb dargestellt). In Abbildung 222 werden die Oberflächentemperaturen beispielhaft für die zwei kältesten Messtage im Februar 2021 dargestellt. Die Ausschläge der Oberflächentemperaturen des unteren Bereichs der Nordwestwand (DP4e – DP6e) werden dabei auf solare Einstrahlung zurückgeführt, vgl. Abschnitt „Über die Relevanz der Sensorauswahl und -positionierung in Bezug auf die Himmelsrichtung“, S. 212 ff. Dies führt dazu, dass die Berechnung der Differenzen nach Messmethode #H große Kurvenschwankungen ergibt, welche allerdings nicht vom tatsächlichen hygrothermischen Effekt stammen, vgl. Temperaturdelta an der Nordwestwand (rot) in Abbildung 223.

Es wird deswegen in der Auswertung danach differenziert, wann die Ergebnisse der Sensoren durch solare Einstrahlung beeinträchtigt waren und dementsprechend nicht mehr in die Gesamtbewertung einfließen. Die Temperatursensoren innenseitig der Deckenplatte wurden zu keinem Zeitpunkt direkt angestrahlt, hier kam es allerdings im August 2020 zeitweilig zu einem Sensorausfall, die fehlenden Daten sind als Lücke dargestellt, vgl. Abbildung 224. Die anschließende Interpretation der Messdaten an der Decke bezieht deshalb sich auf einen reduzierten Zeitraum von 271 Tagen (28.08.2020 – 25.05.2021).

Abbildung 222 Messergebnisse der Oberflächentemperaturmessung an verschiedenen Punkten der Brettsperrholzoberflächen, innen. Dargestellt für die zwei kältesten Tage der Messperiode im Kubus Kösching, Wandaufbau vgl. BSP_01

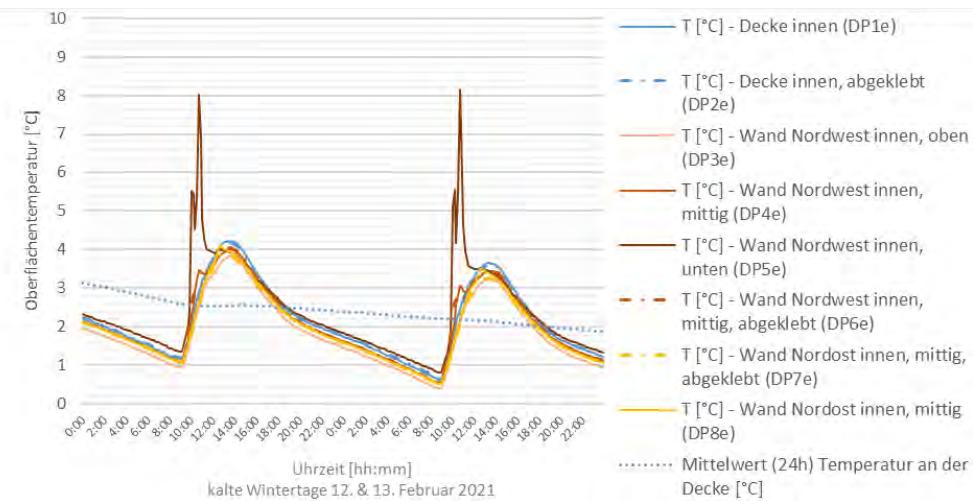


Abbildung 223 Temperaturdifferenzen an verschiedenen Punkten der Brettsperrholzoberflächen, innen. Dargestellt für die zwei kältesten Tage der Messperiode im Kubus Kösching, Wandaufbau vgl. BSP_01

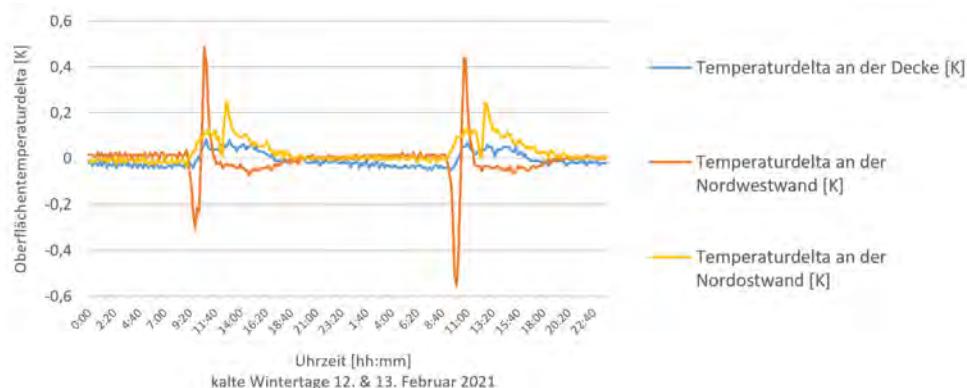


Abbildung 224 Temperaturdifferenzen an verschiedenen Punkten der Brettsperrholzoberflächen, innen. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching, Wandaufbau vgl. BSP_01

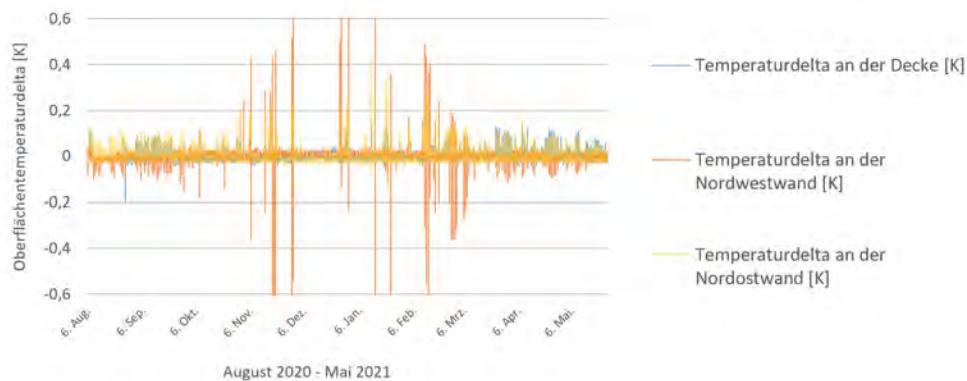


Abbildung 222 -Abbildung 224: eigene Darstellungen (Flexeder)

Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf die langfristige Messbarkeit des hygrothermischen Potentials von unbehandeltem Brettsperholz im Innenraum

In Abbildung 225 werden die gemessenen Innentemperaturen der Decke mit der daraus errechneten Temperaturdifferenz ($DP1e - DP2e$) gegenübergestellt. Die gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen dem abgeklebten und dem freien Feld an der Brettsperholzdecke sind ganzjährig relativ gering ausgeprägt und überschreiten selten den Betrag von 0,1 K, vgl. Abbildung 226 (rechte Achse). Im Zeitraum der zwei kältesten gemessenen Tage im Februar 2021 schwanken sie sogar lediglich zwischen -0,05 K und +0,08 K, vgl. Abbildung 225 (rechte Achse).

Abbildung 225 Gemessene Oberflächentemperaturen, gleitender Mittelwert sowie Temperaturdelta an der innenseitigen Deckenoberfläche aus Brettsperholz. Dargestellt für die zwei kältesten Tage der Messperiode im Kubus Kösching

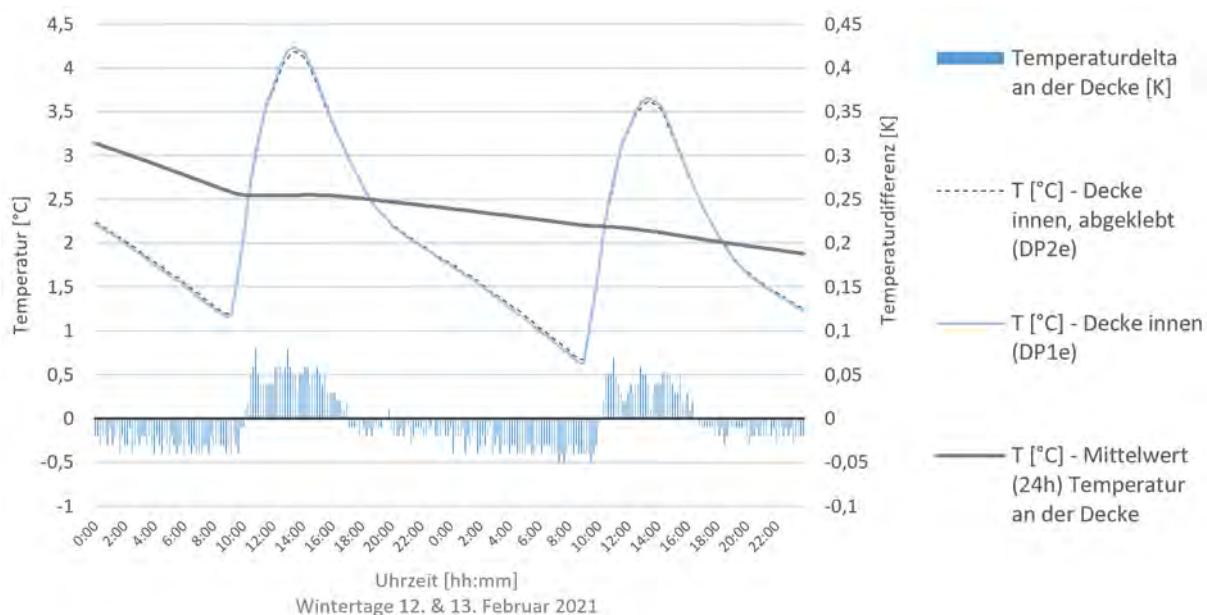


Abbildung 226 Gleitender Mittelwert der Oberflächentemperatur sowie Temperaturdelta an der innenseitigen Deckenoberfläche aus Brettsperholz. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching

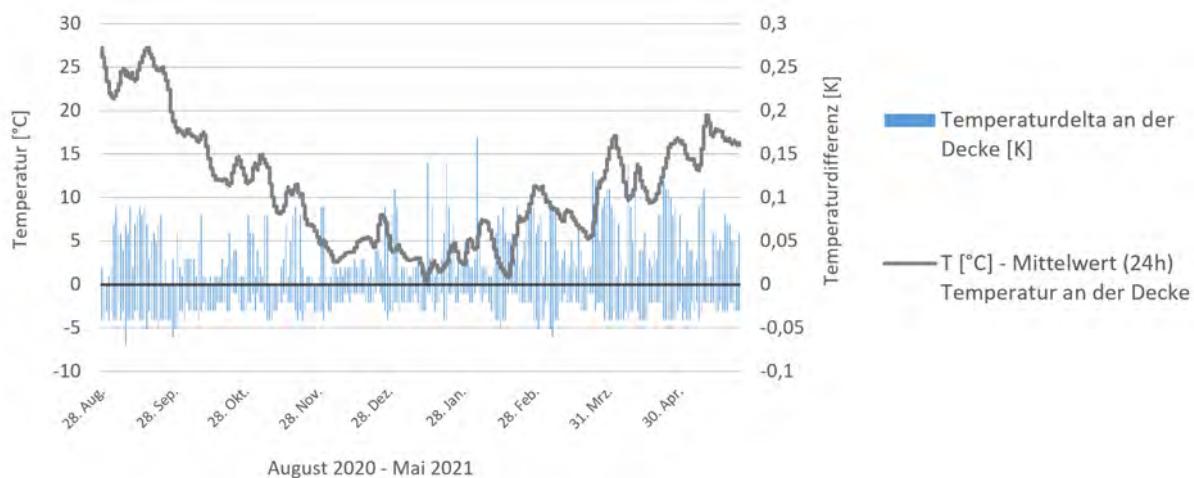


Abbildung 225 und Abbildung 226: eigene Darstellungen (Flexeder)

Unter Anwendung der auf S. 203 f beschriebenen Methode errechnet sich daraus, aufsummiert über den Zeitraum von 271 Tagen, ein hygrothermisches Pufferpotential der warmen Temperaturspitzen von -34,8 Kh und der kalten Spitzen von -47,7 Kh. Auch für die selektive Auswertung der Nordost- und der Nordwestwand ergibt sich ein Pufferpotential <0 Kh. Diese negativen Werte würden demnach bedeuten, dass sich die Hygroskopizität der Brettsperrholzoberfläche sogar nachteilig auf das thermische Pufferpotential auswirkt. Die Auswertungen der Messergebnisse aus dem passiven Langzeitversuch können die Hypothese zur positiven hygrothermischen Pufferwirkung somit nicht bestätigen.

Es wird vermutet, dass die rein passiv erzielten Temperaturdifferenzen für diesen Versuchsaufbau und die verwendete Messtechnik möglicherweise zu niedrig waren. Je kleiner der Betrag des messtechnisch zu erfassenden Effekts ist, desto mehr fallen störende Faktoren aus der Umwelt auf. So wurde beispielsweise die geringfügig isolierende Wirkung der zusätzlich aufgebrachten dampfbremsenden Folie sowie der Unterschied der Übergangswiderstände vernachlässigt. Um diese Messungenauigkeiten zu relativieren, wird deshalb empfohlen, das Langzeitexperiment mit deutlich ausgeprägteren thermischen Tag-Nacht-Schwankungen (beispielsweise erzeugt durch einen Radiator oder ein TAM) zu wiederholen.

Abbildung 227 Gleitender Mittelwert der Oberflächentemperatur sowie Temperaturdelta an der Innenseite der Nordostwand aus Brettsperrholz. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching

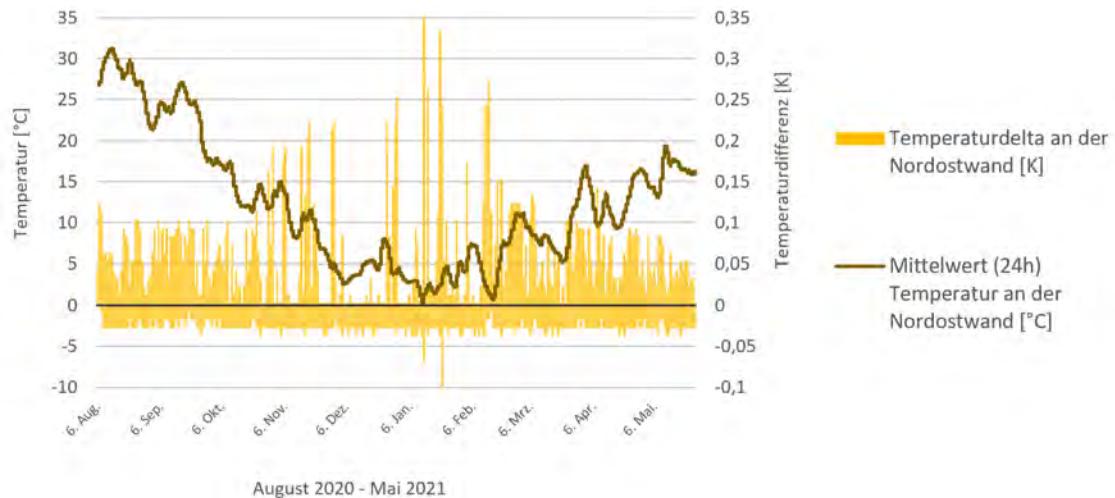


Abbildung 228 Gleitender Mittelwert der Oberflächentemperatur sowie Temperaturdelta an der Innenseite der Nordwestwand aus Brettsperrholz. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching



Abbildung 227 und Abbildung 228: eigene Darstellungen (Flexeder)

Maßgebliche Unterschiede beim Vergleich von Labor- und Feldmessungen

Nina Flexeder

Divergierende Messwerte bei vergleichenden Messungen in verschiedenen Höhen

Die Kapitel III diskutierten Messungen in Laborumgebungen beschränken sich auf Prüfkörper mit wenigen Zentimetern Größe, welche in der Regel waagerecht liegend untersucht wurden. Solare Einstrahlung sowie anderweitige Veränderungen des Laborklimas können hier ausgeschlossen werden. Anders verhält es sich bei Messungen in den Feldversuchen im reduzierten Maßstab auf der Solarstation (Kubus Ost, Kubus West) sowie im Realmaßstab im Brettsperholzkubus in Kösching. Hier ist unter anderem mit einer hygrothermischen Schichtung der Luftschichten innerhalb der Messkuben zu rechnen.

Zur stichprobenartigen Untersuchung des Einflusses der Höhe der positionierten Sensoren werden die Messwerte von fünf warmen Sommertagen (2020) sowie von fünf kalten Wintertagen (2021) aus dem Kubus in Kösching exemplarisch untersucht.

In diesem Brettsperholzkubus wurden an einer mittig montierten Traverse in den Höhen 50 mm, 600 mm, 1100 mm, 1360 mm und 2790 mm, jeweils gemessen ab Oberkante Fertigfußboden (OKFF), die Lufttemperatur [°C] mit einer Auflösung von 0,01 K und einer Genauigkeit von $\pm 0,3 \text{ K} + 0,005^{\circ}\text{C}$ abgeschirmt gemessen. Zudem wurden in den Höhen 600 mm, 1100 mm und 1360 mm (OKFF) die Messwerte der relativen Luftfeuchte [%] mit einer Auflösung von 0,1 % in Raummitte aufgezeichnet (Mindrup, 2018). Sowohl in der warmen, als auch in der kalten Periode zeigen sich klare Tag-Nacht-Schwankungen von gemessener Lufttemperatur und -davon abhängig- relativer Luftfeuchte, vgl. Abbildung 229 und Abbildung 230. Es zeigen sich parallele Kurvenverläufe, wobei sich insbesondere im Winter eine signifikante thermische Schichtung von rund 3 K ergibt. Die Kombisensoren zur hygrometrischen Materialfeuchtemessung (Hum1 - Hum4) befinden sich auf 1810 mm OKFF in der Nordwestwand, vgl. Abschnitt „Messergebnisse des passiven Langzeitfeldversuchs“, S. 204.

Die Oberflächentemperatursensoren DP4e + DP6e befinden innenseitig der Nordwestwand und DP7e + DP8e innenseitig der Nordostwand, jeweils auf der Höhe 1440 mm OKFF. Zur weiterführenden Auswertung werden deshalb die auf der Höhe 1360 mm OKFF gemessenen Werte von relativer Luftfeuchte und -temperatur als Basiswert gesetzt. Die Abweichungen jeweils hierzu werden in Abbildung 231 und Abbildung 232 dargestellt.

Abbildung 229 Schichtung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte in Abhängigkeit der Höhe. Die Werte sind jeweils in der Mitte des Kubus in Kösching gemessen, es werden exemplarisch fünf Tage der heißesten gemessenen Periode im August 2020 gezeigt.

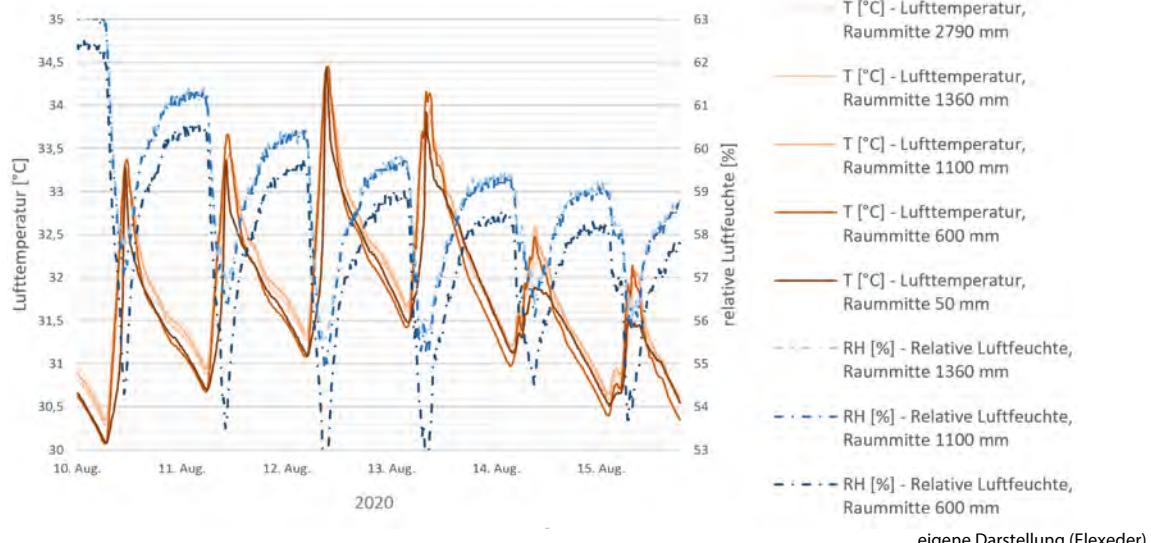


Abbildung 230 Schichtung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte in Abhängigkeit der Höhe. Die Werte sind jeweils in der Mitte des Kubus Kösching gemessen, es werden exemplarisch fünf Tage der kältesten gemessenen Periode im Februar 2021 gezeigt.

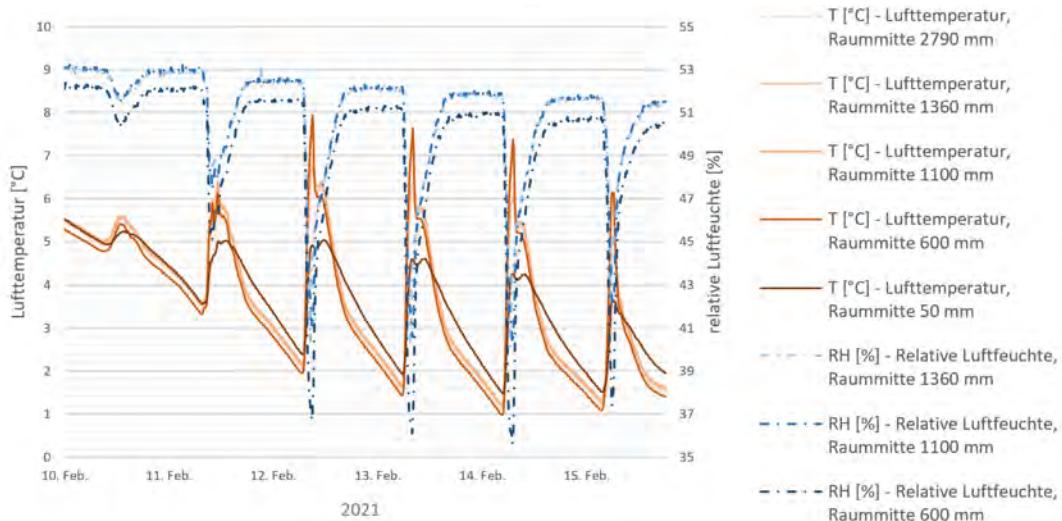


Abbildung 231 Abweichungen der gemessenen relativen Luftfeuchte und -temperatur vom Messwert auf der Höhe 1360 mm OKFF, dargestellt für fünf Tage im August 2020, Kubus Kösching.

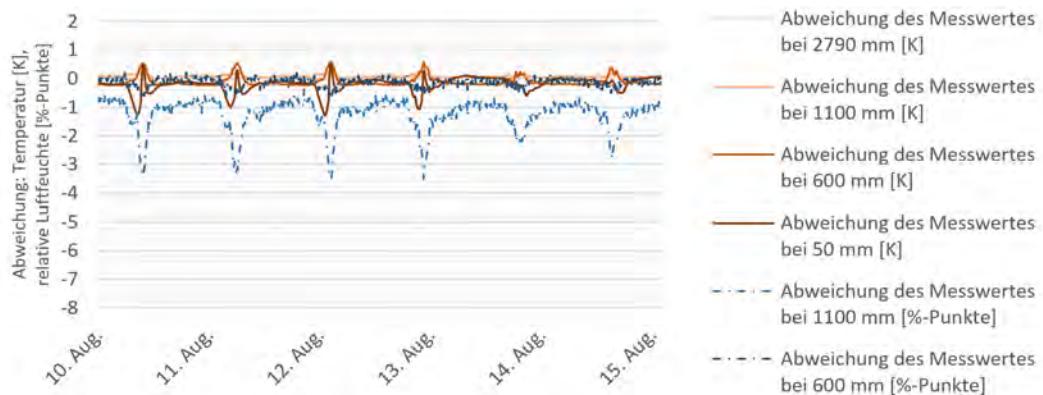


Abbildung 232 Abweichungen der gemessenen relativen Luftfeuchte und -temperatur vom Messwert auf der Höhe 1360 mm OKFF, dargestellt für fünf Tage im Februar 2021, Kubus Kösching.

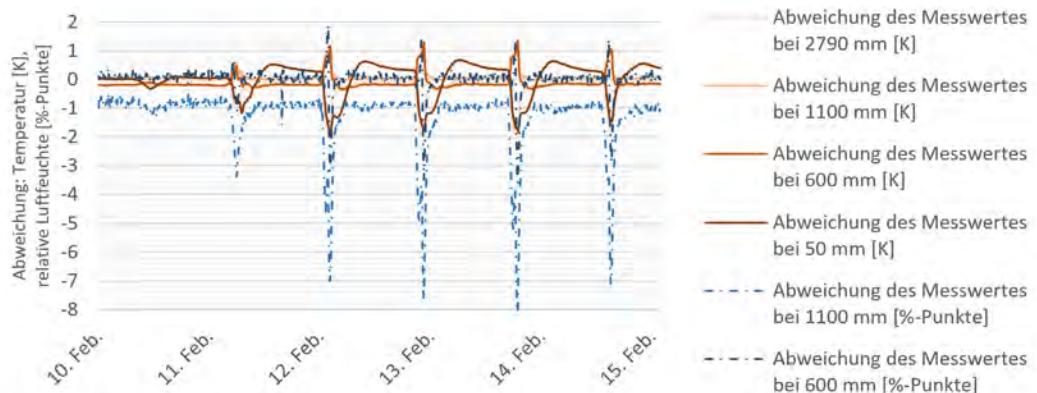
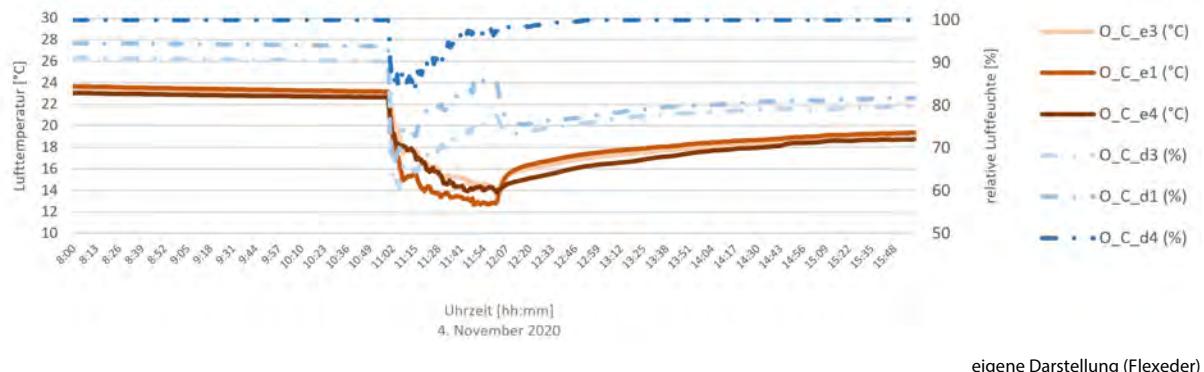


Abbildung 229 - Abbildung 232: eigene Darstellungen (Flexeder)

In Kubus Ost lassen sich ebenso Phänomene der hygrischen Luftschichtung beobachten. So lässt sich Abbildung 233 eine deutliche Schichtung der relativen Luftfeuchte erkennen, welche durch den Luftwechsel und plötzlichen Abfall der relativen Luftfeuchte und -temperatur noch ausgeprägter wird. Je höher der Sensor positioniert ist, desto geringer (O_C_d3 , hellblau) ist die gemessene relative Luftfeuchte [%]. Bei der Temperaturmessung lässt sich allerdings keine solch klare Schichtung erkennen, hier wird während der Fensteröffnung sogar der geringste Wert (O_C_e1 , mittelrot) auf mittiger Höhe verzeichnet.

Abbildung 233 Einstündiger Luftwechsel (60 Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen mittig positioniert in Kubus Ost.



Über die Relevanz der Sensorsauswahl und -positionierung in Bezug auf die Himmelsrichtung

(Zuther, 2019) liefert eine ausführliche Diskussion der Messwerte aus den Jahren 2016 – 2019 in Bezug auf thermische Pufferung, wie beispielsweise die Phasenverschiebung (thermisch) im Bauteilquerschnitt. Hierbei wird unter anderem vermutet, dass die Messung der Bauteiltemperatur insbesondere an der Innenseite der Wände leicht durch solare Bestrahlung beeinflusst werden könnte.

Die in Messwerte aus Kubus Kösching (Abschnitt „Messergebnisse des passiven Langzeitfeldversuchs“) sowie aus Kubus Ost zeigen zeitweise Auffälligkeiten, welche im Folgenden auf Korrelationen mit solarer Einstrahlung untersucht werden. In Abbildung 234 werden die gemessenen Oberflächentemperaturen von Decke und Nordwestwand exemplarisch miteinander verglichen. Es kann ein Ausschlag der gemessenen Temperaturkurven an der Nordwestwand jeweils gegen 10:35 Uhr beobachtet werden. Auf Basis des ermittelten Sonnenstands wird geschlossen, dass in diesem Zeitraum höchstwahrscheinlich die Sensoren selbst durch die tief stehende Wintersonne angestrahlt wurden, vgl. Abbildung 235. Die resultierenden Messergebnisse werden deshalb bei der Auswertung kritisch betrachtet (vgl. S. 204ff).

Abbildung 234 Temperaturen an der Wandoberfläche, innen: zwei Wintertage. Kubus Kösching, vgl. BSP_01

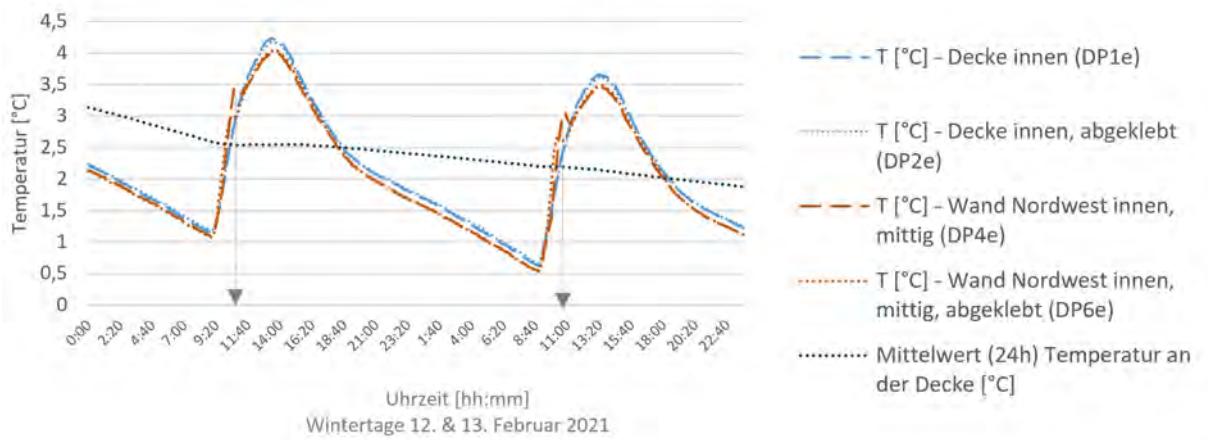


Abbildung 235 Sonnenstandsdiagramm für den Standort Kösching am 12. Februar 2021, 10:35 Uhr.

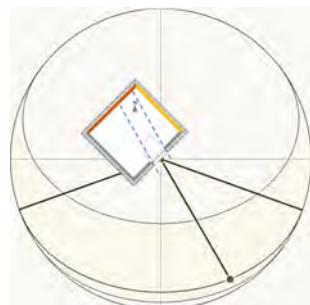


Abbildung 236 Sonnenstandsdiagramm für den Standort Kösching am 12. August 2020, 09:00 Uhr.

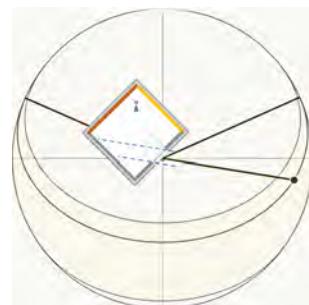
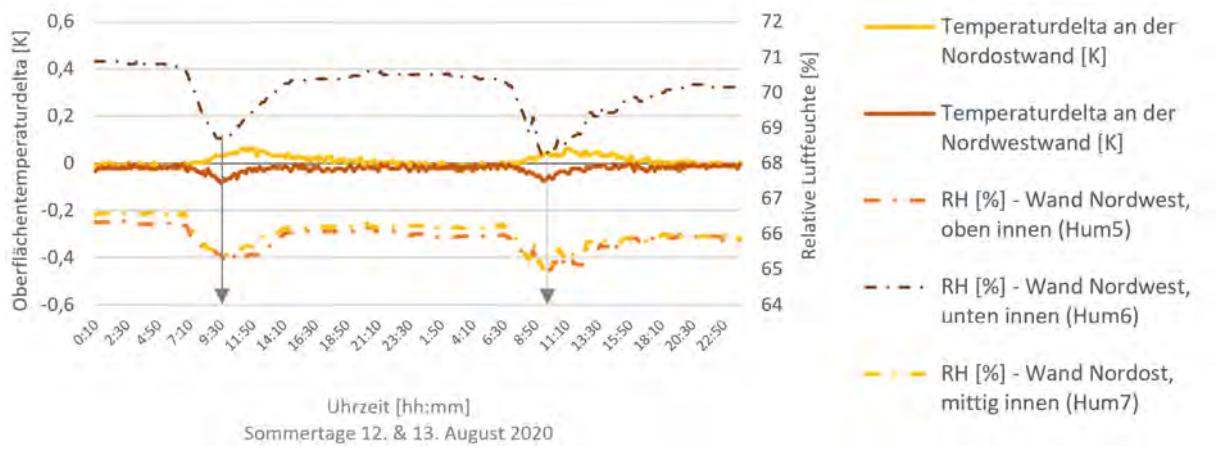


Abbildung 235 und Abbildung 236: eigene Darstellungen (Flexeder) auf Basis des Simulationstools auf www.sonnenverlauf.de

Als weiteres Beispiel für den Einfluss der solaren Einstrahlung durch die Fenstertüre des Testkubus wird im Folgenden ein regelmäßiger Abfall der an verschiedenen Punkten (Hum5, 6, 7) gemessenen relativen Luftfeuchte betrachtet, vgl. Abbildung 237. Hier sinken die gemessenen Werte der relativen Luftfeuchte zeitgleich in den oberflächennahen Luftsichten der Nordost- und Nordwestwand im Laufe des Vormittags ab und erreichen circa gegen 9 Uhr ihr Minimum. Es ist ausgeschlossen, dass zu diesem Zeitpunkt einer der betrachteten Sensoren tatsächlich direkt von der Sonne angestrahlt werden könnte, vgl. Abbildung 236. Vielmehr wird vermutet, dass sich die Luft im Kubusinneren aufgrund der zeitweisen Einstrahlung generell erwärmt und somit die relative Luftfeuchte allgemein sinkt. Die von den Oberflächentemperatursensoren DP4e und DP6e an der Nordwestwand innenseitig gemessenen Werte werden in Abbildung 237 bereits als Delta dargestellt (rot). Der leichte Abfall als Reaktion auf den Abfall der relativen Luftfeuchte wird als Abkühlung infolge von Desorption der Brettsperrholzoberfläche interpretiert und stützt die allgemeine Hypothese. Weshalb das Temperaturdelta an der Nordostwand (gelb) eine andere Kurvenform aufweist, ist soweit nicht abschließend geklärt.

Abbildung 237 Temperaturen an der Wandoberfläche, innen: zwei Sommertage. Kubus Kösching, vgl. BSP_01



eigene Darstellung (Flexeder)

Für zukünftige Versuche mit zusätzlicher Klimatisierung, beispielsweise durch ein TAM, werden ausgeprägtere Temperaturdeltas, aber auch zusätzliche Messfehler antizipiert. Die in diesem Abschnitt beschriebene Auswertung der vertikalen und horizontalen Messwerte im Jahresverlauf zeigt physikalische Umwelteinflüsse auf, welche signifikante Auswirkungen auf die Messergebnisse von Feldtests haben. Die Analyse im passiven Verhalten stellt somit die Basis für eine effektive Anpassung des Messkonzepts und die nachfolgende Messdatenbereinigung dar.

Dynamische Messungen im Testkubus West

Christian Hepf, Ahmad Nouman

In diesem Kapitel werden zwei dynamische Messreihen im Testkubus West auf der Solarstation vorgestellt. Die beiden Langzeitversuche wurden iterativ im Rahmen von vier Messtagen durchgeführt. Hierbei wurde durch das Heizsystem und den Befeuchter das Temperatur- sowie Feuchteniveau im Kubus variiert. Bei den beiden Messreihen wurde jeweils das Bauelement ausgetauscht. In der ersten Messreihe wurden die im vorherigen Kapitel bereits beschriebene Holzrahmenleichtbauelemente HRLB_01 und HRLB_02 untersucht. In der nächsten Testreihe wurde das thermisch aktivierte Massivholzelement untersucht. Hierbei wurde folglich das Heizsystem im Kubus durch die thermische Aktivierung des TAMs ersetzt. Die Befeuchtung findet weiter im Kubusinneren statt.

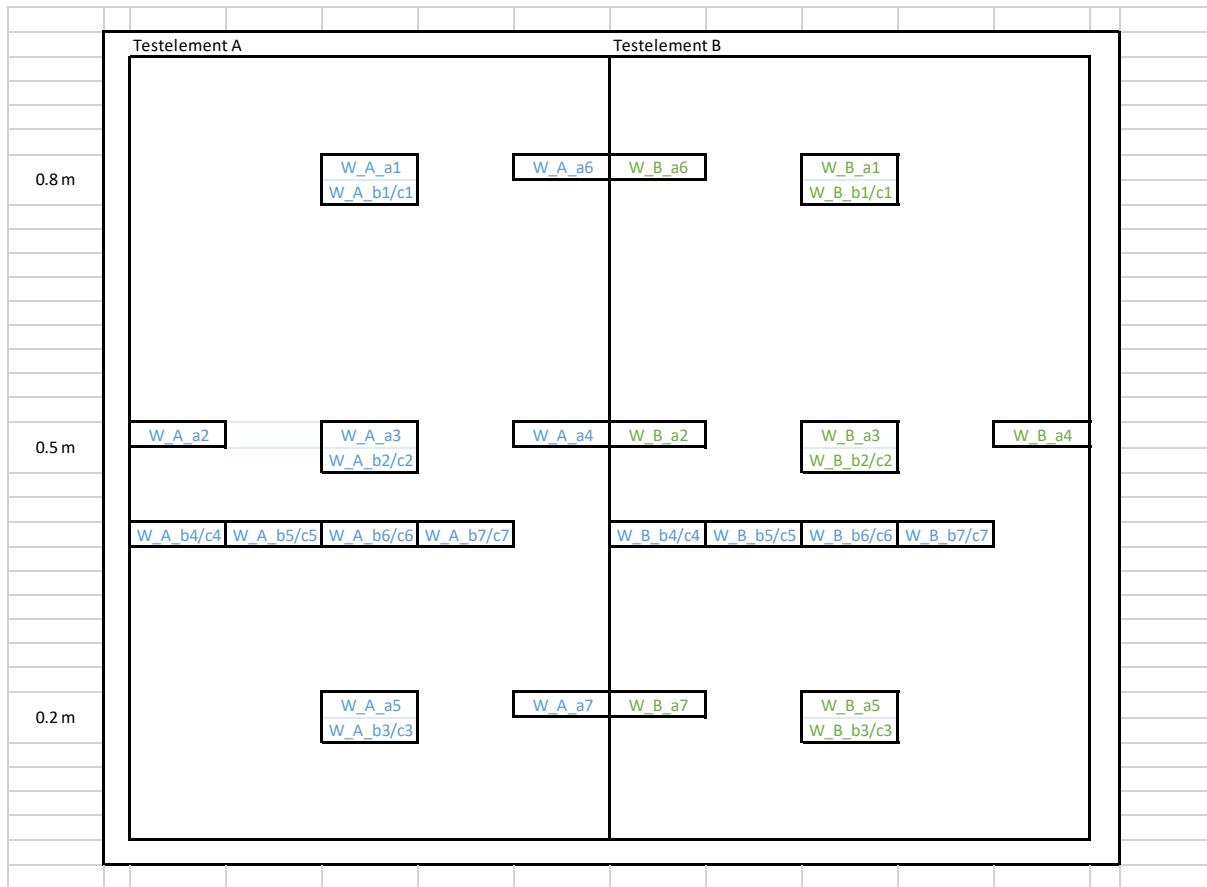
Hierbei sollen in den beiden Messreihen die beiden nachfolgenden Forschungsfragen untersucht werden:

- Welche Faktoren in den unterschiedlichen Bauteilaufbauten haben Einfluss auf eine potentielle Lastverschiebung?
- Wie lange kann durch das thermisch aktivierte Massivholzelement der thermische Komfort im Raum aufrecht gehalten werden, ohne zusätzlich Energie hinzufügen zu müssen?

Messreihe – Holzrahmenleichtbauelemente HRLB_01 und HRLB_2

Nachfolgend ist schematisch eine Übersicht der Sensoren für die Analyse der Holzrahmenleichtbauelemente dargestellt. Hierbei ist schematisch zu erkennen, wie die einzelnen Sensoren auf den beiden Testelementen angeordnet sind. Die Sensoren wurden auf den beiden Elementen in unterschiedlichen Höhen und unterschiedlichen Bauteiltiefen integriert. Das Sensoren-Set von W_A_a1 bis W_A_a6 bzw. W_B_a1 bis W_B_a6 stellen Sensoren dar, die die Oberflächentemperatur bzw. Feuchte messen. Die Sensoren W_A_b4/c4 bis W_A_b7/c7 bzw. W_B_b4/c4 bis W_B_b7/c7 stellen jeweils die Sensoren für die unterschiedlichen Bauteiltiefen dar. Hierbei sind die Sensoren in 15 mm, 25 mm, 40 mm und 70 mm Tiefe angebracht. Zusätzlich zu den hier dargestellten Sensoren konnte bei diesen Messreihen auf die im Kapitel Messkonzept beschriebenen Sensoren zurückgegriffen werden.

Abbildung 238 Schematische Übersicht Messsensoren HRLB_01 und HRLB_02 (eigene Darstellung)



Nachfolgend ist der individuelle Fahrplan für die einzelnen Messtage dargestellt. Hierbei wird beschrieben, in welchem Zeitraum die einzelnen Gebäudetechnikkomponenten aktiviert sind und welche Sollwerte für die einzelnen Perioden erreicht werden sollen. Die Messungen wurden in mehrfacher, unterschiedlicher Ausführung vollzogen, werden aber, um den Fokus dieses Forschungsberichts zu wahren, nicht weiter ausgeführt.

Abbildung 239 Fahrplan Messwoche - Holzrahmenleichtbauelemente HRLB_01 und HRLB_2**Montag 07.12.2020**

| | | |
|---------------|----------------------|--------------------------|
| 08:30 - 08:45 | | keine Vorkonditionierung |
| | Temperatur & Feuchte | |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | Befeuchter im Kubus |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | Befeuchter im Kubus |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | Befeuchter im Kubus |

Dienstag 08.12.2020

| | | |
|---------------|----------------------|--------------------------|
| 08:30 - 08:45 | | keine Vorkonditionierung |
| | Temperatur & Feuchte | |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | 6 g/kg |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | 6 g/kg |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | 6 g/kg |

Mittwoch 09.12.2020

| | | |
|---------------|----------------------|--------------------------|
| 08:30 - 08:45 | | keine Vorkonditionierung |
| | Temperatur & Feuchte | |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | 8 g/kg |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | 8 g/kg |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | 8 g/kg |

Donnerstag 10.12.2020

| | | |
|---------------|----------------------|--------------------------|
| 08:30 - 08:45 | | keine Vorkonditionierung |
| | Temperatur & Feuchte | |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | kein Befeuchter im Kubus |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | kein Befeuchter im Kubus |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | kein Befeuchter im Kubus |

Messergebnisse

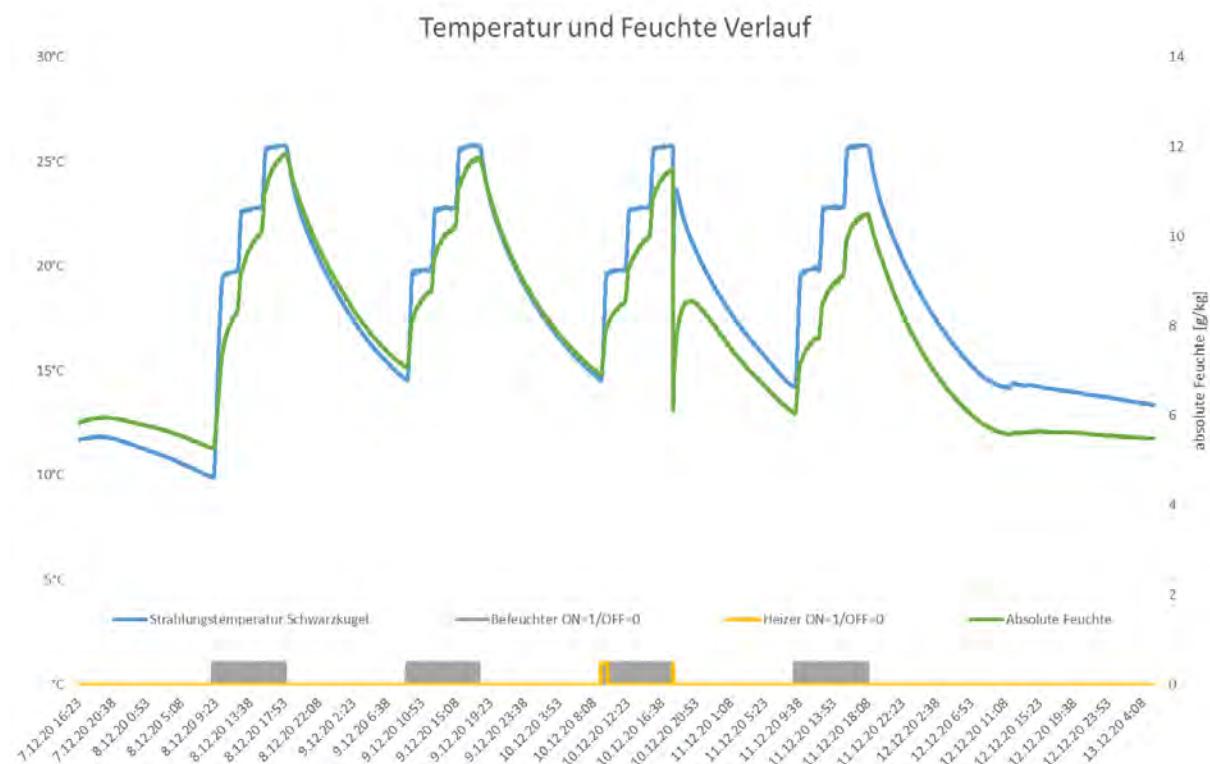
In den nachfolgenden Grafiken sind die Messergebnisse dargestellt. Hierbei zeigen die einzelnen Abbildungen unterschiedliche Verläufe und Verteilungen der Temperaturen und Feuchte in und auf den Bauteilelementen sowie im Testkubus.

Auf der linken Achse der nachfolgenden Grafik sind die Oberflächentemperaturen, hier in Blau dargestellt, angeordnet. Weiter ist die absolute Feuchte in g/kg sowie das Kontrollsiegel (einheitslos) für das Heiz- und Kühlungssystem auf der rechten Achse anzugeben. Wie bereits vorab beschrieben, erstreckt sich der Messzeitraum über vier Tage.

Der Temperaturverlauf erstreckt sich über 10-26 °C und verhält sich träge, da er zum einen über die operative Raumtemperatur, gemessen durch die Schwarzkugeltemperatur, geregelt wird. Zum anderen wird die Regelung durch eine PID-Kontrollstrategie, im Regelungskonzept beschrieben, durchgeführt. Zudem sind die unterschiedlichen Sollwerttemperaturen in den entsprechenden Zeitperioden zu erkennen und eine Auskühlung in den nicht beheizten Zeiträumen, vor allem in der Nacht, ist zu vermerken.

Weiterhin ist zu vermerken, dass die Befeuchtung nur sehr kurz aktiv ist und der Verlauf der Feuchte sich dem der operativen Temperatur stark anpasst. Abschließend ist zu erwähnen, dass zum Zeitpunkt des Entfernens des Beleuchters (3. Messetag ca. 18:00 Uhr) besonders das Feuchte- aber auch das Temperaturniveau k beeinflusst wird.

Abbildung 240 Temperatur- und Feuchteverlauf im Kubus der Messreihe HRLB_01 und HRLB_02 (eigene Darstellung)



Die nachfolgenden beiden Grafiken beschreiben den Verlauf der Temperaturverteilung auf den beiden Testelementen A und B in Korrelation zur operativen Raumtemperatur. Hierbei ist in beiden Fällen ein nahezu äquivalenter Verlauf der Oberflächentemperaturen mit unterschiedlichem Verhalten in Bezug auf die operative Raumtemperatur zu vermerken. In beiden Fällen ist die operative Temperatur konstant am höchsten und die Oberflächentemperaturen oben auf dem Element erwärmen sich schneller (ca. 1°C) als die mittig und

unten positionierten Oberflächensensoren, obwohl das Heizsystem sich unten im Kubus befindet. Dies lässt sich auch dadurch erklären, dass die Heizelemente mehr Konvektion als Strahlungswärme erzeugen.

Abbildung 241 Verlauf der Oberflächentemperatur auf dem HRLB_01 und der operativen Temperatur im Kubus (eigene Darstellung)

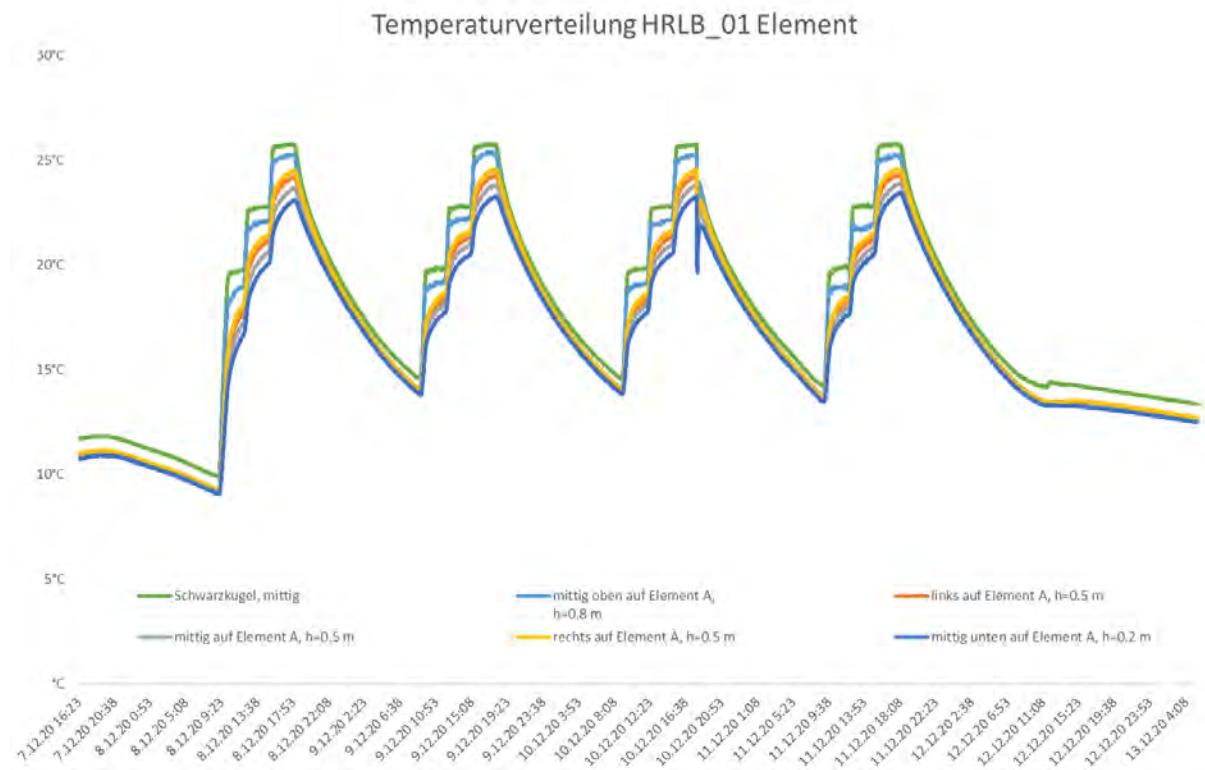
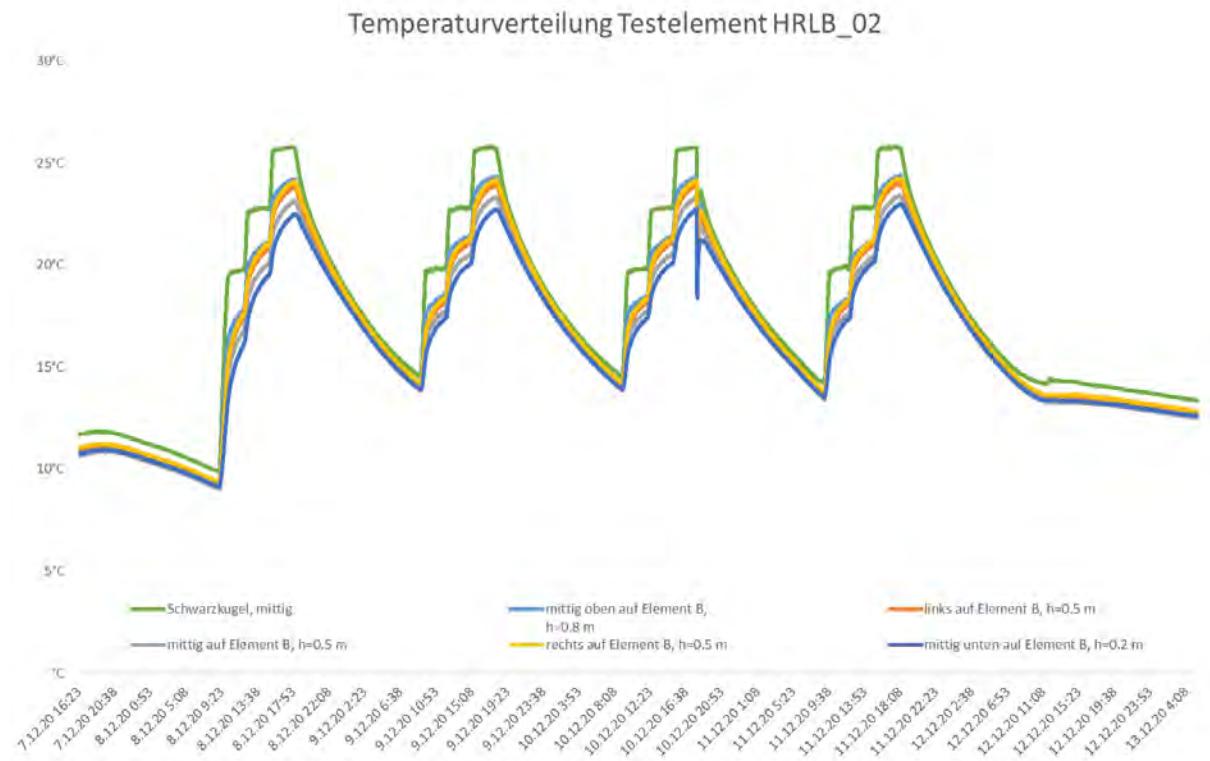


Abbildung 242 Verlauf der Oberflächentemperatur auf dem HRLB_02 und der operativen Temperatur im Kubus (eigene Darstellung)



Abschließend zeigen die beiden folgenden Grafiken die Temperatur- und Feuchteverteilung in unterschiedlichen Bauteiltiefen im HRLB_1 und HRLB_2. Die linke Achse beschreibt hierbei das Temperurniveau in den unterschiedlichen Bauteiltiefen der Bauelemente. Hier zugehörig sind die vier Graphen, die einen ähnlichen Verlauf wie in den vorangehenden Grafiken aufweisen. Darüber hinaus werden in den nachfolgenden Graphen die Luftfeuchten in den unterschiedlichen Bauteiltiefen sowie die Temperatur- und Feuchtedifferenz zwischen dem obersten (15mm) und dem tiefsten (70mm) Sensor durch die beiden dunklen Graphen aufgezeigt. Zunächst wird erst eine Grafik mit der relativen und anschließend eine weitere Grafik mit den absoluten Luftfeuchten dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass tendenziell in beiden Testelementen, aber vor allem in HRLB_2 die relative Feuchte im Bauteil von den innenseitigen Oberflächen in die Bauteiltiefe konstant abnimmt. Die Differenz der Feuchte variiert aber nur schwach und verläuft über den Messzeitraum nahezu konstant, bei einer Differenz von bis 5 %. Ein ähnliches Verhalten kann bei der Temperatur festgestellt werden. Der am Weitesten innen liegende Sensor weist die höchste Temperatur auf. Dennoch vergrößert sich die Temperaturdifferenz zwischen den Bauteiltiefen im Heizfall und steigt auf bis zu 0.5 K pro 10mm Differenz. Zudem ist zu Beginn von allen vier Messtagen zu erkennen, dass die relative Luftfeuchte in allen Bauteiltiefen zunächst absinkt. Besonders in der Nähe der Oberfläche sinkt die relative Luftfeuchte zunächst ab, erholt sich aber im Vergleich zum tiefer gelegenen Sensor schneller wieder. Dieser Effekt fällt am vierten Messtag schwächer aus, da hier keine Feuchtequelle mehr im Raum vorhanden ist. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass zum Heizbeginn zunächst die Temperatur ansteigt, die absolute Feuchte zunächst gleichbleibt und somit die relative Luftfeuchte absinkt. Gleichzeitig kann durch den Temperaturanstieg aber die Luft und das Bauteil wieder mehr Feuchte aufnehmen und somit wird dieser Effekt kompensiert. Dies geschieht in Bauteiltiefe langsamer als in der Nähe der Oberfläche.

Abbildung 243 Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_01 (eigene Darstellung)

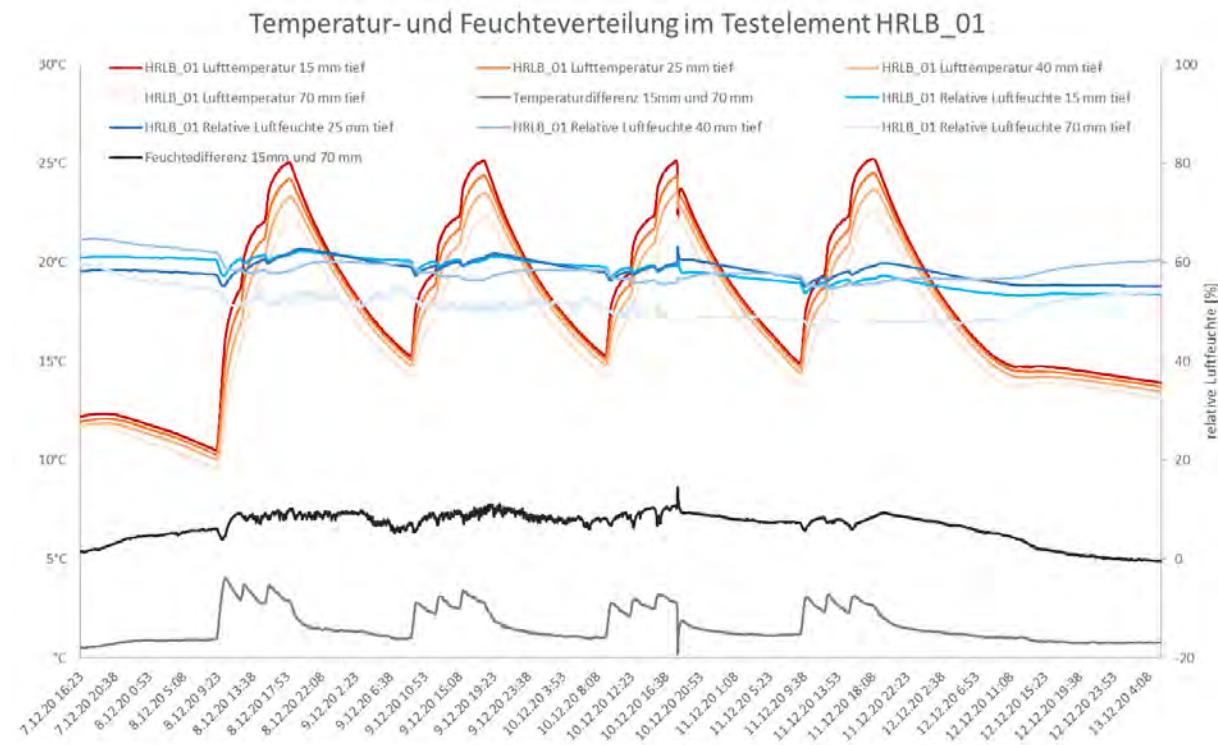


Abbildung 244 Verlauf der Temperatur und der absoluten Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_01 (eigene Darstellung)

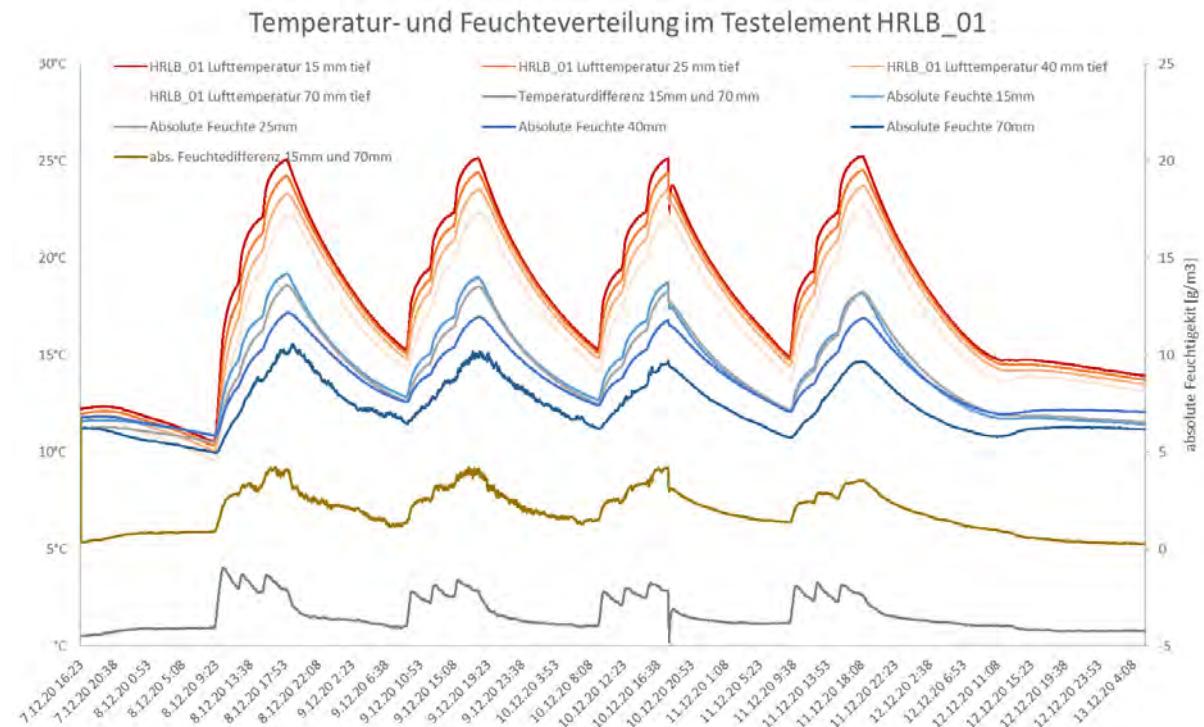


Abbildung 245 Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_2 (eigene Darstellung)

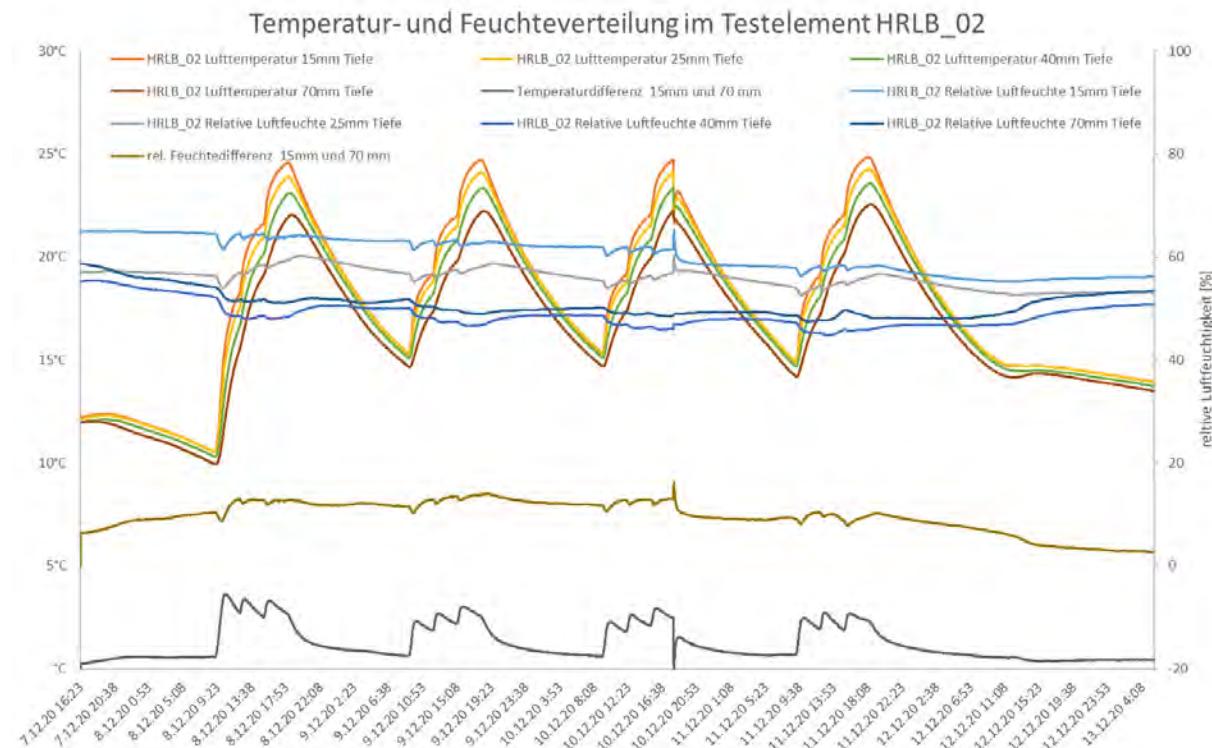
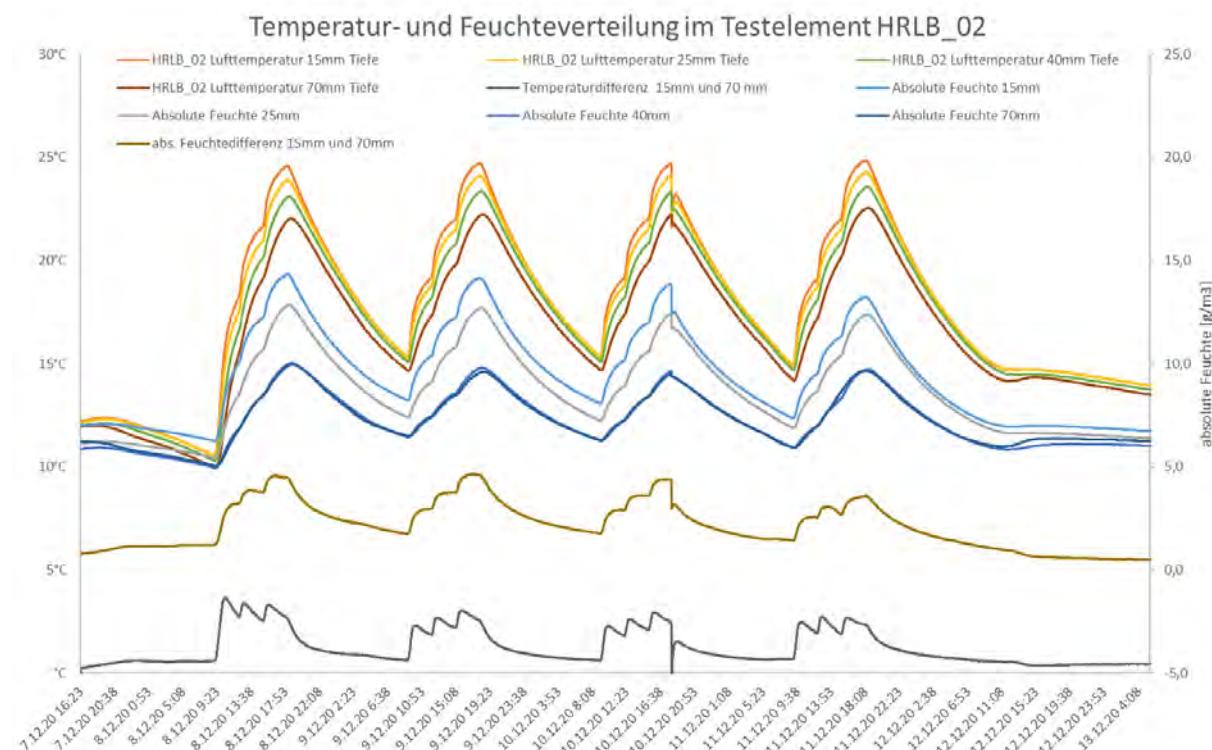


Abbildung 246 Verlauf der Temperatur und der absoluten Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_02 (eigene Darstellung)



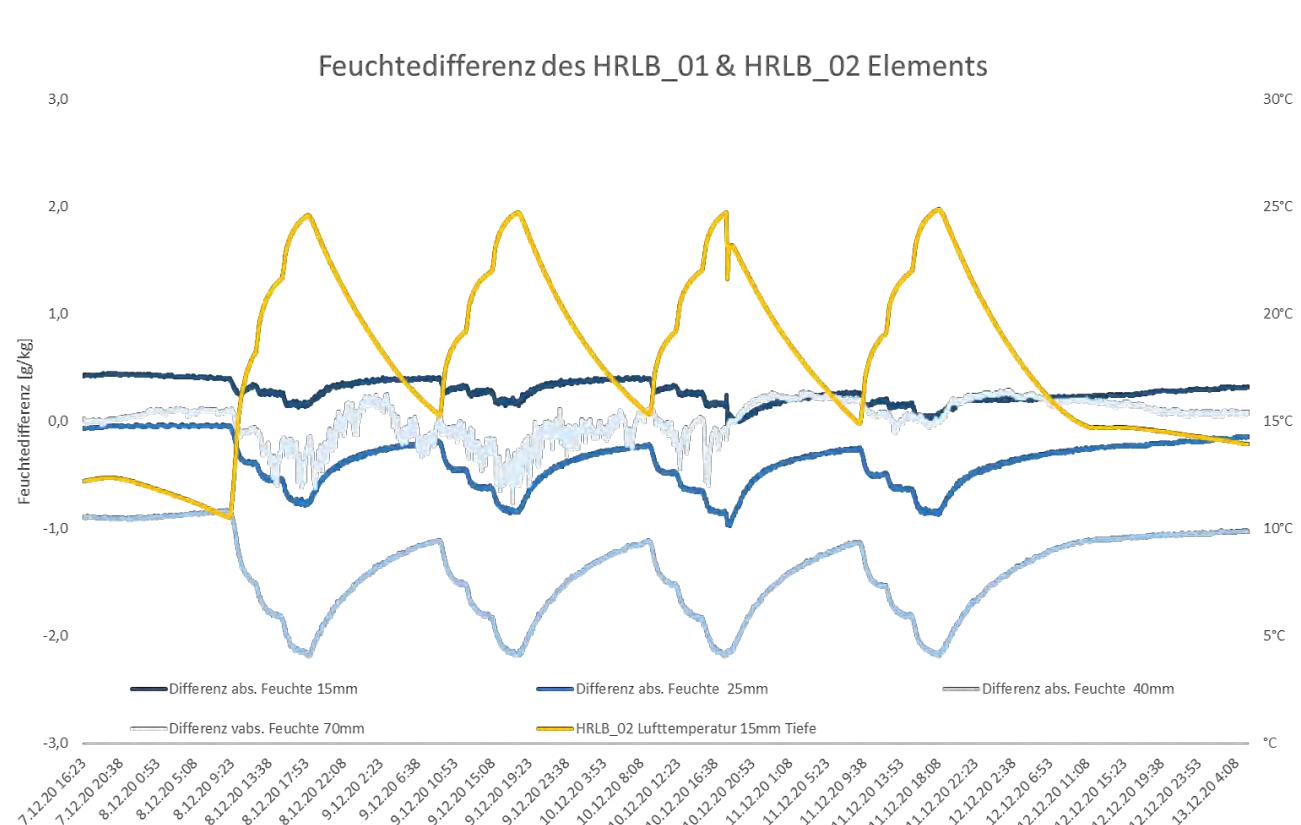
Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

Zunächst zeigen die Messergebnisse, dass das komplette Konzept des Aufbaus des hochgedämmten Kubus mit wechselbaren Wandaufbauten sowie das Mess-, Versorgungs- und IT-Konzept funktioniert und adäquate Ergebnisse liefert.

Vergleicht man die Feuchte der HRLB_01 & HRLB_02 Elemente, so lässt sich beobachten, dass diese in unterschiedlicher Tiefe verschieden stark voneinander abweichen. Bei dem HRLB_02 Element ist verglichen mit dem HRLB_01 Element, die Feuchte in 15 mm Tiefe um <0.3 g/kg größer, in 25mm Tiefe zwischen 0.2 - 0.8 g/kg geringer, in 40 mm Tiefe zwischen 0.9 – 2.2 g/kg tiefer und in 70 mm Tiefe zwischen 0.7 g/kg höher bis 0.3 g/kg tiefer.

Ein Grund hierfür könnte eine, bedingt durch die Oberflächenlasur, verringerte Feuchteaufnahme des HRLB_02 Elements sein. Da weniger Feuchte an der Oberfläche aufgenommen wird, wird auch entsprechend weniger Feuchte in die tieferen Bauteilschichten transportiert werden.

Abbildung 247 Temperaturdifferenz des HRLB_01 & HRLB_02 Elements in Bauteiltiefe (eigene Darstellung)



Betrachtet man nun die Differenz der Temperaturen der beiden HRLB Elemente in unterschiedlichen Tiefen, so lässt sich beobachten, dass die Feuchteabweichung sich auch in einer veränderten Temperatur niederschlägt (siehe in der nachfolgenden Grafik).

Aus einer rein thermischen Sicht müsste das HRLB_01 Element aufgrund der höheren Bauteilfeuchte eine höhere Wärmeleitfähigkeit haben als das HRLB_02 Element (zur Erinnerung: Die beiden Elemente unterscheiden sich nur durch die Oberflächenlasur und haben dementsprechend den selben U-Wert). Dies

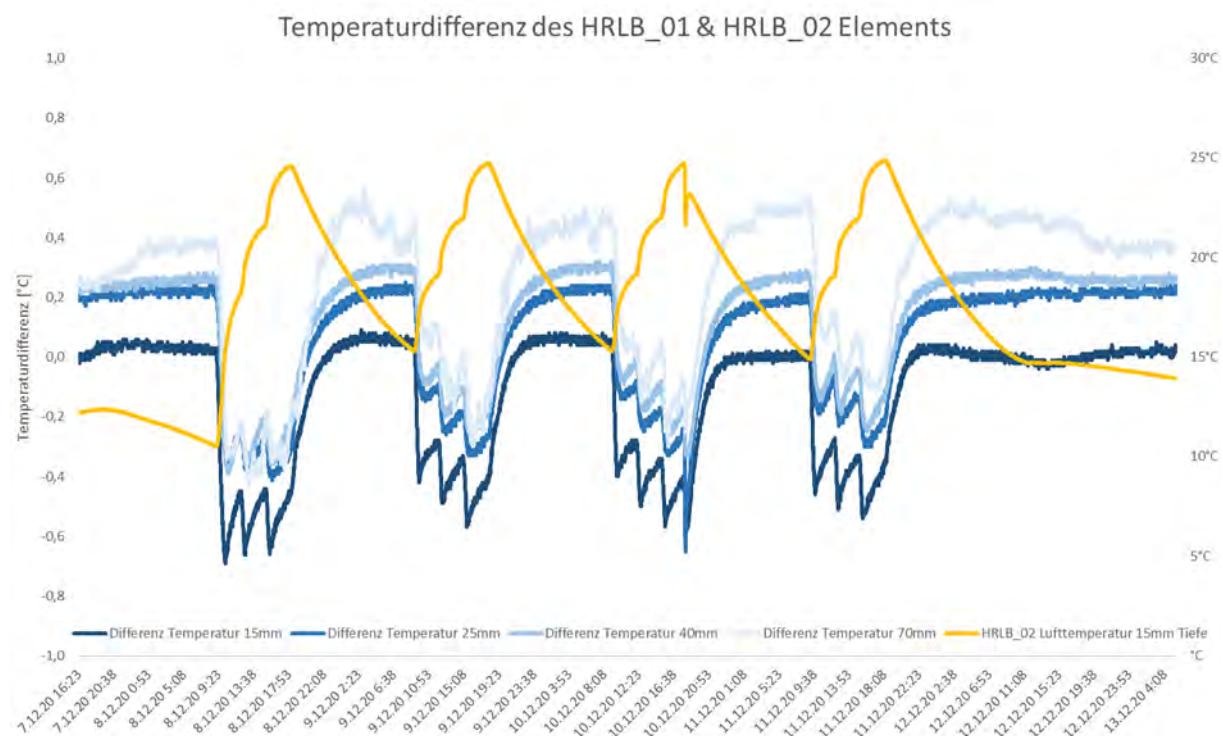
wiederum würde in einem höheren Wärmestrom resultieren und somit im hier betrachteten Winterfall zu gesenkten Temperaturen führen.

Betrachtet man nun aber die nachfolgende Abbildung, so sieht man, dass die Temperaturen zu den Zeitpunkten des Aufheizens (9:00 – 18:00 Uhr), über alle Tiefen hinweg beim HRLB_01 Element höher sind. Hier muss folglich also ein anderes Phänomen dominieren.

Es lässt sich beobachten, dass in den Aufheizphasen die Temperaturen von HRLB_01 < 0.6 °K größer sind und den Rest der Zeit um < 0.6 °K niedriger sind, verglichen mit dem HRLB_02 Element. Ein Blick auf das Feuchteverhalten in 25 und 40 mm Tiefe in der nachfolgenden Abbildung zeigt eine mögliche Erklärung. Während sich in den Aufheizphasen die Differenz der Feuchte vergrößert (HRLB_01 nimmt mehr Feuchte auf als HRLB_02), so ist es in der restlichen Zeit genau anders herum (HRLB_01 gibt mehr Feuchte ab als HRLB_02).

Unter der Annahme, dass Teile dieser Wasseraufnahme / -abgabe kondensieren bzw. verdunsten und hierbei folglich latente Energie frei wird, lassen sich diese Ergebnisse erklären. Bei der Erhitzung & Feuchteaufnahme steigt die Temperatur von HRLB_01, verglichen mit HRLB_02, aufgrund der freiwerdenden Kondensationswärme stärker an. Anders herum sinkt die Temperatur bei der Abkühlung & Feuchteabgabe durch die für die Evaporation stärker ab.

Abbildung 248 Temperaturdifferenz des HRLB_01 & HRLB_02 Elements in Bauteiltiefe (eigene Darstellung)

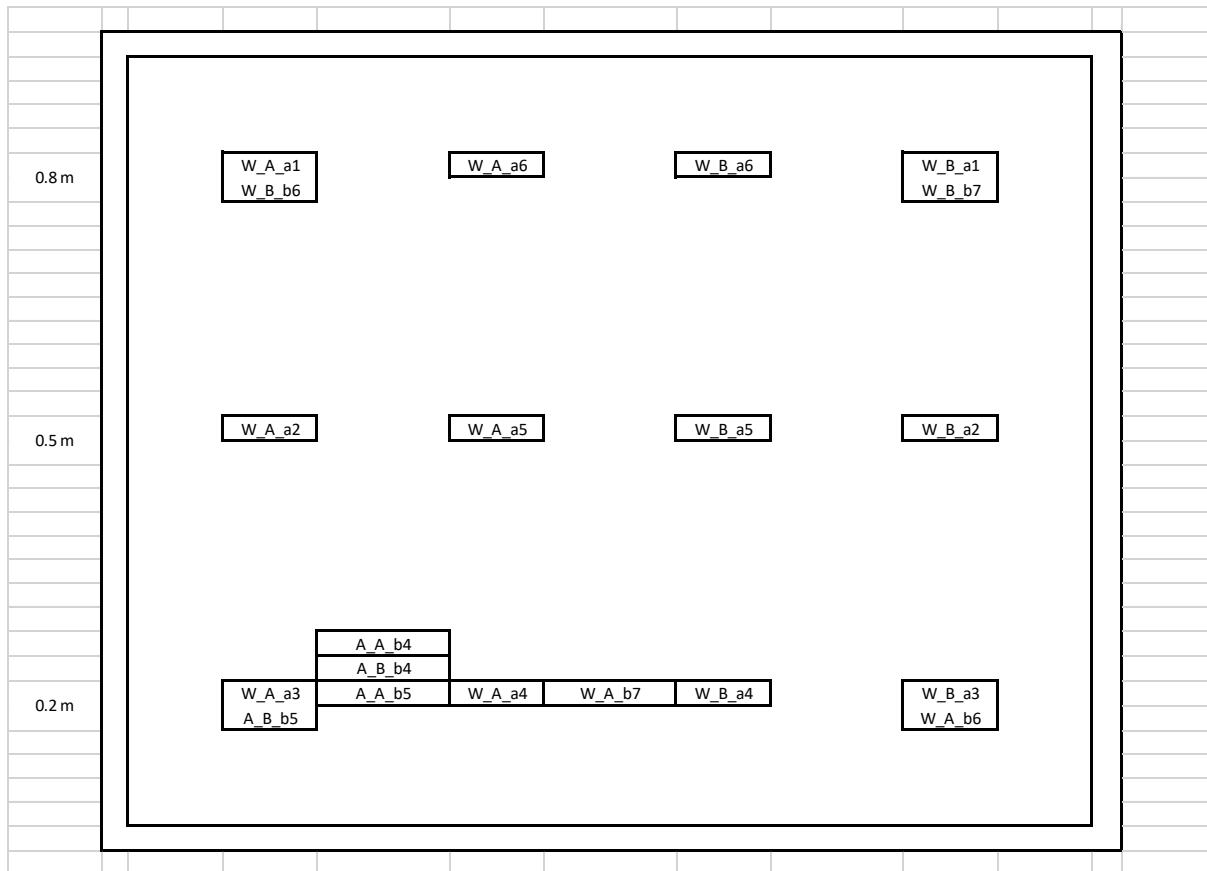


Die sich hier einstellenden Temperaturunterschiede bestätigen die in der Simulation untersuchten Potentiale. Durch eine nichtbehandelte Innenoberfläche lassen sich die hygrothermischen Potentiale eines Bauteils besser ausnutzen und können so durch eine gezielte Konditionierung für ein potentielles Lastmanagement herangezogen werden.

Messreihe - Thermisch aktiviertes Massivholzelement

Wie in der vorherigen Messreihe wurde das TAM ebenfalls mit den Messsensoren ausgestattet. Die Oberflächentemperatursensoren W_A_a1 bis W_A_a6 bzw. W_B_a1 bis W_B_a6 sind rasterartig auf dem TAM angebracht. Die Temperatur- und Feuchtesensoren in 15mm Bauteiltiefe sind jeweils in den Ecken sowie zentral unten angebracht. Darüber hinaus sind zusätzliche Sensoren in 25 mm, 40 mm und 70 mm Tiefe in der linken unteren Ecke in direkter Nähe zum Zulufteingang integriert, um das Temperatur- und Feuchteverhalten in Bauteiltiefe evaluieren zu können.

Abbildung 249 Schematische Übersicht Messsensoren TAM (eigene Darstellung)



Nachfolgend ist erneut der Fahrplan für die Messreihe mit dem thermisch aktivierte Massivholzelement dargestellt. Hierbei wurden wieder die Temperatur, die Feuchte sowie neu hinzugekommen eine Lüftung variiert. Die Lüftung wurde hinzugefügt, da zum Messzeitraum im März 2021 die Temperaturen deutlich höher waren. Basierend auf den großen, internen Lasten und der sehr guten Dämmfunktion des Kubus beliefern sich die Temperaturen im Kubus bereits ohne eine Aktivierung der Heizung auf über 20°C.

Abbildung 250 Fahrplan Messwoche – Thermisch aktiviertes Massivholzelement**Freitag 12.03.2021**

| | | | |
|---------------|----------------------|---------------------|---------|
| Nachtlüftung | 22:00 – 09:00 | | Off |
| | Temperatur & Feuchte | | Lüftung |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | Befeuchter im Kubus | on |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | Befeuchter im Kubus | on |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | Befeuchter im Kubus | on |

Samstag 13.03.2021

| | | | |
|---------------|----------------------|--------|---------|
| Nachtlüftung | 22:00 – 09:00 | | Off |
| | Temperatur & Feuchte | | Lüftung |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | 6 g/kg | on |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | 6 g/kg | on |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | 6 g/kg | on |

Sonntag 14.03.2021

| | | | |
|---------------|----------------------|--------|---------|
| Nachtlüftung | 22:00 – 09:00 | | Off |
| | Temperatur & Feuchte | | Lüftung |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | 8 g/kg | on |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | 8 g/kg | on |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | 8 g/kg | on |

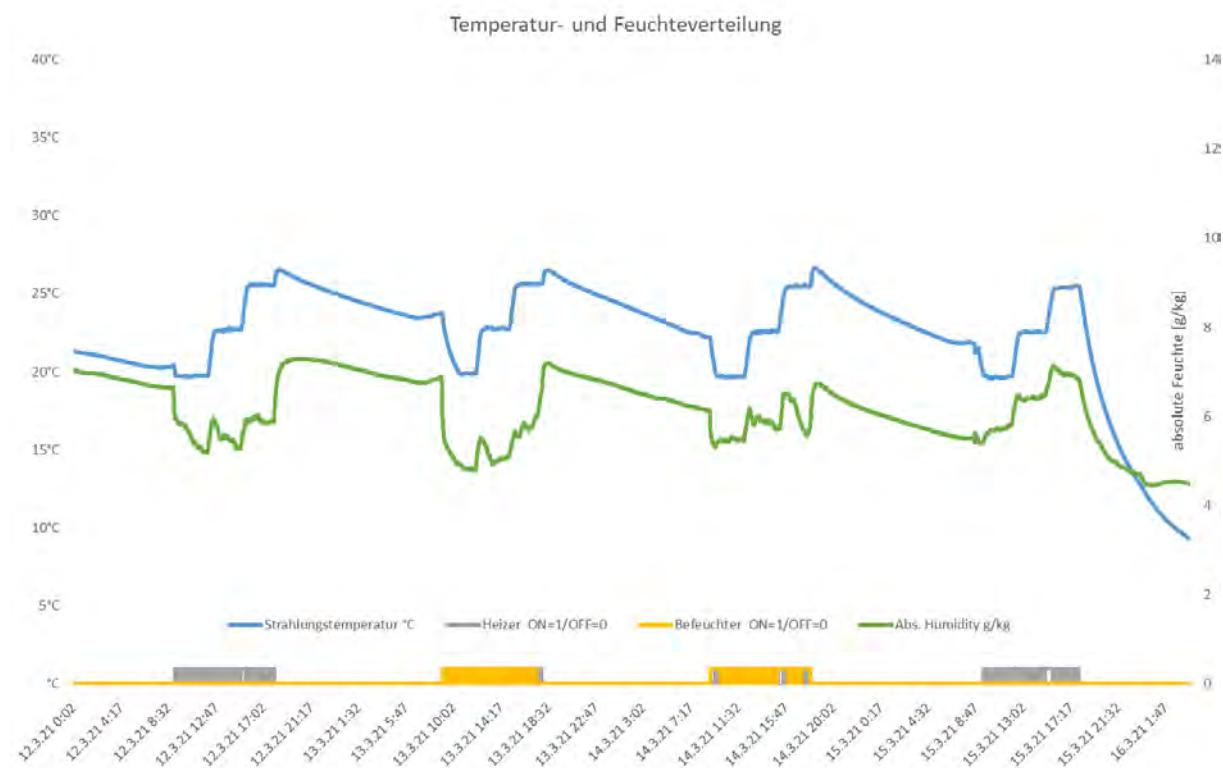
Montag 15.03.2021

| | | | |
|---------------|----------------------|--------------------------|---------|
| Nachtlüftung | 22:00 – 09:00 | | Off |
| | Temperatur & Feuchte | | Lüftung |
| 09:00 - 12:00 | 20 °C | kein Befeuchter im Kubus | on |
| 12:00 - 15:00 | 23 °C | kein Befeuchter im Kubus | on |
| 15:00 - 18:00 | 26 °C | kein Befeuchter im Kubus | on |

Messergebnisse

Nachfolgend werden die Messergebnisse der Messwoche am thermisch aktivierten Massivholzelement graphisch dargestellt und beschrieben. Zunächst sieht man in der folgenden Grafik die absolute Feuchte, die Strahlungstemperatur sowie die Schaltsignale für den Heizer und den Befeuchter dargestellt. Hierbei stellt die blaue Kurve die Strahlungstemperatur dar, wobei zu erkennen ist, dass für die einzelnen Messtage die unterschiedlichen Set-Temperaturen nach einer kurzen Zeit erreicht werden können. Der kurze Abfall der Temperatur ist damit zu begründen, dass durch die Lüftung zunächst der Kubus abgekühlt werden muss, da die Ausgangstemperaturen bereits über den Sollwerten liegen. Parallel hierzu ist zu erkennen, dass die absolute Feuchte zum Zeitpunkt des Heizens absinkt und bei einem Erhöhen der Set-Temperatur leicht ansteigt. Am vierten Messtag, wenn kein Befeuchter im Kubus ist, verläuft der Anstieg am konstantesten. An den andern drei Messtagen sinkt die absolute Feuchte nach kurzer Zeit nach der Änderung der Set-Temperatur wieder ab.

Abbildung 251 Temperatur- und Feuchteverlauf im Kubus der Messreihe TAM (eigene Darstellung)

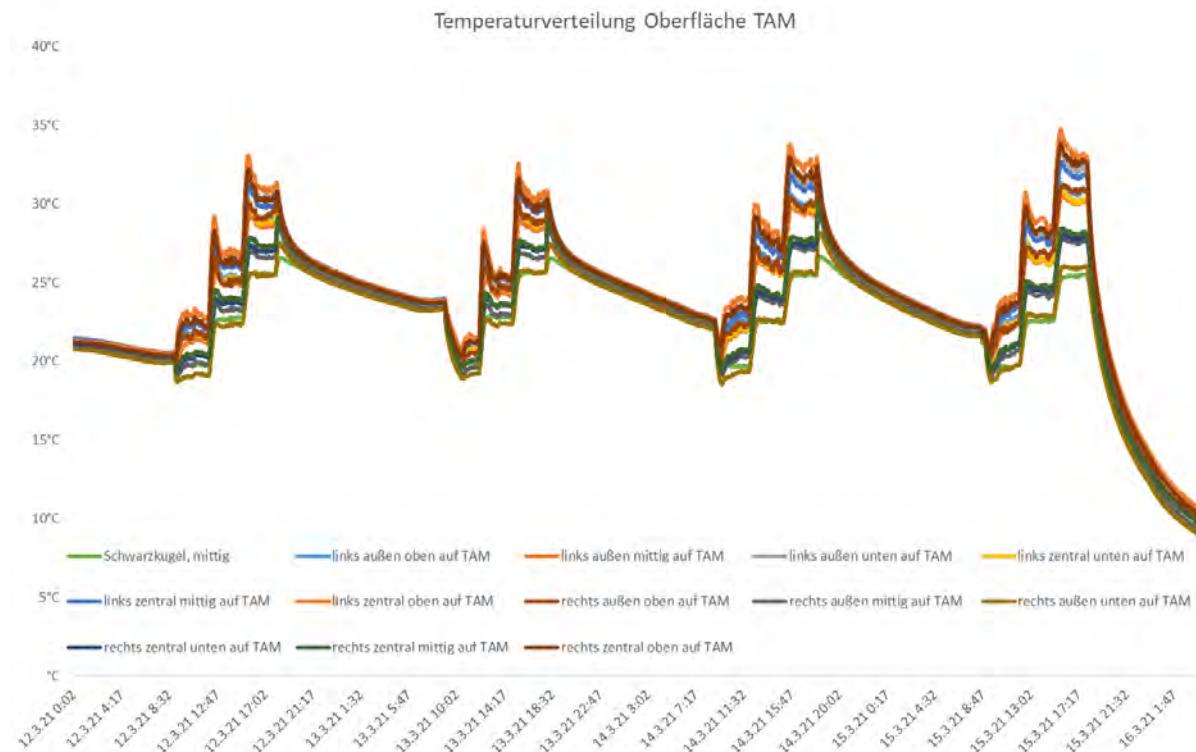


Weiter zeigt die nächste Abbildung die Temperaturverteilung auf der Oberfläche auf dem TAM. Die Sensoren wurden rasterförmig mit einem Abstand von 35cm horizontal und 32 cm vertikal auf der Oberfläche des TAM angeordnet. Darüber hinaus ist in der nachfolgenden Grafik die operative Temperatur mit ihrer Funktion als Zieltemperatur für die Regelung dargestellt.

Zunächst ist zu erkennen, dass die Temperaturen alle ein unterschiedliches Niveau erreichen, aber dennoch alle sich an dem Verlauf der operativen Temperatur orientieren und individuell zwischen 0 und 10°C abweichen. Besonders stark weichen die Temperaturen links außen unten, links zentral oben, links zentral mittig und rechts zentral oben. Diese Sensoren spiegeln, wie bereits im Vorversuch zum TAM auf den Wärmebildern zu erkennen, die heißesten Bereiche der TAM Oberfläche wieder. Besonders an der Zuluft, an den oben gelegenen Bereichen und oben und zentral über der großen Freifläche erwärmt sich die Oberfläche am stärksten. Die Temperaturen links oben, zentral unten sowie zentral rechts erreichen durchaus niedrigere Temperaturen und gleichen sich stärker dem Verlauf der operativen Temperatur an. Weiter ist zu erkennen,

dass nach jedem Messtag, ohne weitere Zufuhr von Wärme, alle Temperaturen sich innerhalb von ca. einer Stunde auf einem gleichmäßigen Niveau einpendeln (maximale Abweichung 1°C) und anschließend konstant, aber langsam (< 1°C pro Stunde) abkühlen. Am letzten Messtag kühlt das Bauteil generell schneller aus, da hier die Belüftung weiterhin aktiviert war und somit ein erhöhter Luftaustausch stattgefunden hat.

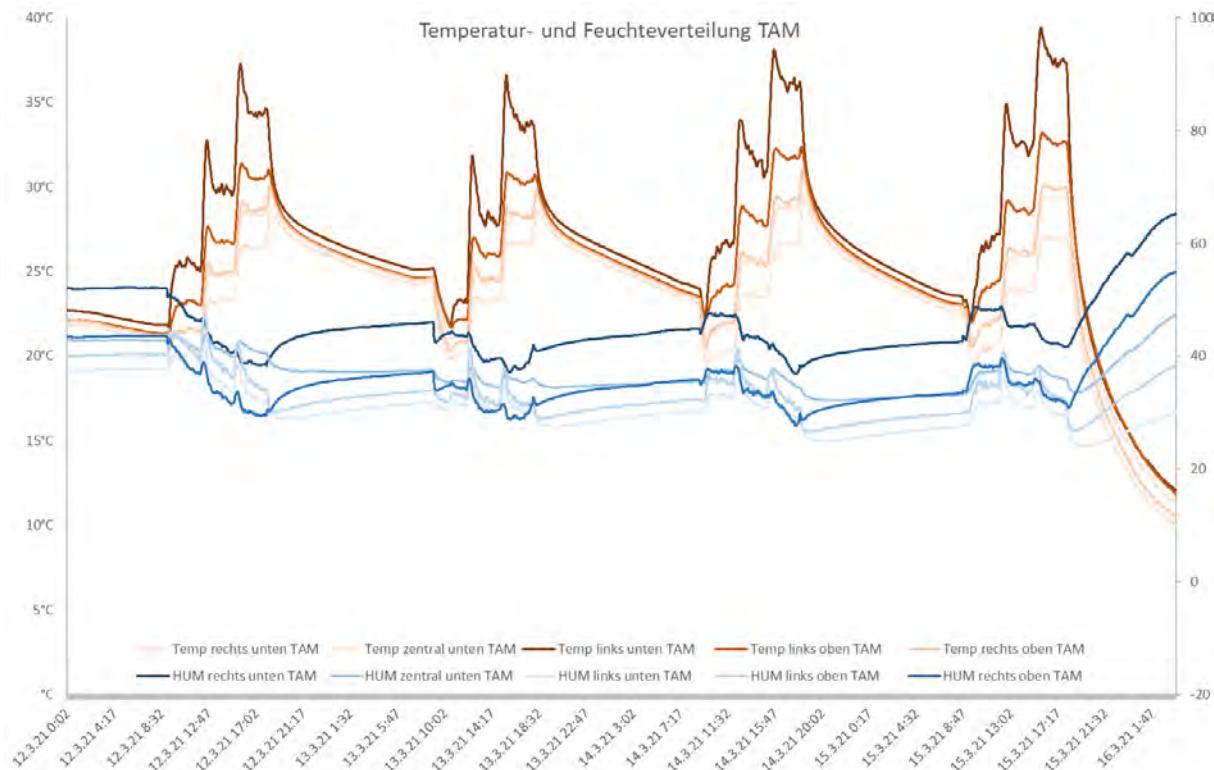
Abbildung 252 : Temperaturverteilung auf der Oberfläche des TAM (eigene Darstellung)



Zusätzlich zu den Oberflächensensoren wurden weitere Sensoren für das Temperatur- und Feuchteverhalten in 10mm Bauteiltiefe am TAM integriert. Diese wurden in allen Ecken sowie mittig an den Außenseiten und mittig unten auf dem TAM angebracht. Hierbei werden die Temperaturverläufe in Rot dargestellt und beziehen sich auf die linke y-Achse des Diagramms, wobei die blauen Kurven die relative Feuchte beschreiben, welche durch die rechte y-Achse definiert wird.

Hierbei zeigt sich, dass die Temperaturen links unten und links oben die höchsten Werte einnehmen, wobei die Sensoren links und zentral unten die geringsten Temperaturverläufe aufweisen. Zusätzlich ist zu beobachten, dass kurz nach dem Erreichen der Sollwerttemperatur die stark darüber liegende Temperatur links unten an der Zuluft abfällt und sich auf einem deutlich niedrigeren Niveau (ca. 3°C weniger) einpendelt. Dies ist auf eine nicht konstante Aktivierung des Heizelements durch die Regelung zurückzuführen.

Die relative Feuchte weist ein deutlich unterschiedlicheres Verhalten für die einzelnen Messpunkte auf. Dennoch weist der Sensor rechts unten auf dem TAM konstant die höchste relative Feuchte auf, die ist auf die geringeren Temperaturen zurückzuführen. Alle anderen Messpunkte weisen ein ähnliches Niveau der relativen Feuchte auf, wobei hier basierend auf unterschiedlich starken Temperaturschwankungen verschiedene einzelne Ausreißer zu verzeichnen sind. Greift man sich die Kurve mit dem Feuchteverlauf für den Messpunkt links unten am TAM, also an der Zuluft des Elements heraus, sind eine Vielzahl an einzelnen Schwankungen zu sehen. Diese sind auf die entsprechenden Temperaturanstiege durch die konstante De- und Aktivierung der beheizten Zuluft zurückzuführen und führen zu Schwankungen in den relativen Feuchten von bis zu 5%. Wechselt das Temperaturniveau im Kubus, verzeichnen alle Messpunkte eine Varianz in der relativen Feuchte von bis zu 10%. Grundsätzlich steigt hier die relative Feuchte kurzzeitig erstmal stark an und sinkt über den Verlauf wieder konstant ab.

Abbildung 253 Temperatur- und Feuchteverteilung des TAM (eigene Darstellung)


Weiterhin wird noch das thermische und hygrische Verhalten in unterschiedlichen Bauteiltiefen im TAM in der nachfolgenden Grafik dargestellt. Die Sensoren wurden in einer Bauteiltiefe von 10, 25, 40 und 70 mm im linken unteren Ende des TAM angebracht, da hier ebenfalls die Zuluft ansetzt. Hierbei ist auf der linken y-Achse wieder die Temperatur in °C dargestellt, an welcher sich die roten Kurven orientieren. Auf der rechten y-Achse werden die relativen Feuchten, durch die blauen Graphen repräsentiert, aufgezeigt. Darüber hinaus wird die Differenz zwischen dem zur Oberfläche am nächsten und am tiefsten liegenden Sensor in -°C für die Temperatur und in -% für die Luftfeuchte dargestellt. Die beiden Differenzen beziehen sich auf die rechte y-Achse.

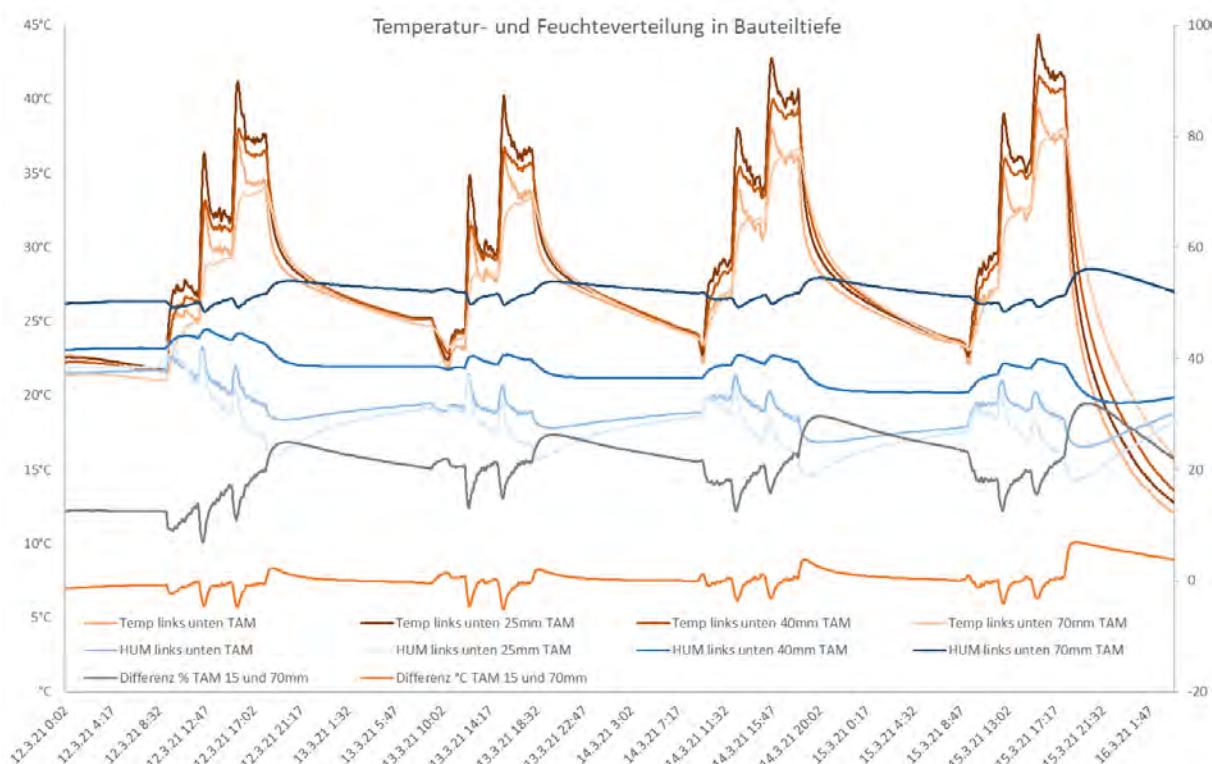
Zunächst ist zu erkennen, dass die Temperatur während der Heizphase bei 25 mm Bauteiltiefe, also ca. auf Höhe der luftgeführten Schicht im Bauteil am größten ist. Die zweithöchste Temperatur weiß zumeist der Sensor bei 40 mm Bauteiltiefe auf. Der Temperatursensor in 70 mm Bauteiltiefe zeigt meistens die niedrigste Temperatur auf und hat zudem den konstantesten Verlauf im Sinne der Fluktuation beim Ein- bzw. Ausschalten der Heizung. Die Temperatur in 10 mm Bauteiltiefe (Sensor: temp links unten TAM) spiegelt das dritthöchste Temperaturniveau wider und orientiert sich am Verlauf der beiden höchsten Temperaturniveaus.

Die relativen Luftfeuchten weisen zunächst einen größeren Unterschied als die Temperaturen auf. Die Luftfeuchte in 70 mm Bauteiltiefe schwankt im Bereich um 50 % relative Feuchte und zeigt während der Heizphase die geringsten Schwankungen. Während der Heizphase weisen die Sensoren in 15 bzw. 25 mm Bauteiltiefe die geringste relative Luftfeuchte auf, was auf die Austrocknung durch die Luft des Heizgerätes zurückzuführen ist. Hierbei zeigt sich, dass der Sensor in 25 mm Tiefe am stärksten auf die Aktivierung des Heizgerätes reagiert. Die Luftfeuchte in 40 mm Bauteiltiefe erreicht ein leicht erhöhtes Niveau (ca. + 10 %) in Bezug auf das Niveau in 15 bzw. 25 mm Bauteiltiefe auf und zeigt bereits ein abgeschwächtes Verhalten im Verlauf in Bezug auf die De- bzw. Aktivierung der Heizung.

Die Abweichung der Temperatur weist numerisch eine Differenz zw. -3 und 5°C auf. Hierbei fällt sie in dem Moment ab, sofern die Heizung einsetzt, bzw. in dem Moment, wenn ein erhöhtes Heiz-Niveau an einem Messtag auftritt. Im Zuge der anhaltenden Beheizung steigt die Abweichung wieder langsam an. Mit Abschluss eines Messtages reduziert sich die Differenz immer weiter, bis kein Unterschied mehr vorhanden ist.

Die Abweichung im Bereich der relativen Feuchte spielt sich zwischen 10 und 35 % ab. Hierbei ist der Verlauf kongruent zum Verlauf der Abweichung der Temperatur. Dies bedeutet, dass die Differenz zwischen dem am tiefsten und dem am nächsten an der Oberfläche liegenden Sensor immer größer wird, je höher die Heiztemperatur angesetzt wird. Dieser Effekt regeneriert sich auch nicht in der Nacht, was am nächsten Messtag zu einer erneuten Vergrößerung der Differenz führt. Somit ist die größte Differenz in Bezug auf die relative Feuchte am letzten Messtag zu verzeichnen. Dennoch sinkt die Differenz kurzzeitig beim Erhöhen der Solltemperatur an den einzelnen Messtagen ab.

Abbildung 254 Temperatur- und Feuchteverteilung in Bauteiltiefe des TAM (eigene Darstellung)



Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

Es zeigt sich allgemein, dass die Beheizung eines Raumes durch die operative Raumtemperatur und das TAM möglich ist. Durch den erhöhten Strahlungsanteil der Wandheizung wird dennoch der Temperaturwert auf der Oberfläche sowie in Bauteiltiefe übertroffen, dennoch kann eine relativ konstante operative Temperatur im Raum gebildet werden. Mit tendenziell einem veränderten A/V-Verhältnis (Heizfläche zu Raumvolumen) können so auch noch detaillierter die thermischen Raumbedingungen eingehalten werden. Darüber hinaus kann durch einen adaptierten Kontrollmechanismus diese Herausforderung mit Sicherheit noch optimiert werden. Zudem ist hier zu erwähnen, dass durch die modifizierte Anordnung der Kanäle (wie im ersten Kapitel beschrieben) der Raum optimiert beheizt werden kann.

Weiter zeigt sich, dass das Konzept der thermischen Masse des thermisch aktivierte Massivholzelements greift und so auch im Fall der Deaktivierung des Heizgerätes das TAM noch ausreichend Wärme an den Raum abstrahlt und den Raum weiter temperiert. Dies führt in der Praxis zu Energieeinsparungen und kann den Holzbau für ein potentielles Lastmanagement interessant machen.

Hierbei ist noch zu vermerken, dass bei dem kleinen Raumvolumen der Messkuben der thermische Komfortbereich (20–26°C) nur schwer zu erreichen ist, da es beim Beheizen sehr zu einer Überschreitung dieser Werte kommt. Dies lässt auf ein überdimensioniertes Heizsystem für das zur Verfügung stehende Volumen

schließen. Mit der Leistung des integrierten Heizelements (TAM) könnte somit auch ein deutlich größerer Raum mit größerem Volumen beheizt werden.

Dennoch lässt sich auch verzeichnen, dass nach der Beheizung des Raums noch sehr viel Wärme/Energie im TAM steckt und nach einem kurzen Abfall der Temperatur (vor allem an der Bauteiloberfläche) die Temperatur im Kern des Elements über einen sehr langen Zeitraum nahezu konstant bleibt und nur sehr langsam abfällt. (<12 h - weniger als 3°C Temperaturabfall). Dies führt zurück zur eingangs gestellten Forschungsfrage und bestätigt die Vermutung, dass durch die erhöhte Masse des Elementes, die Temperatur im Raum noch sehr gut gehalten werden kann. Das lässt sich natürlich auch auf das geringe Raumvolumen zurückführen, dennoch ist es durchaus denkbar, dass auch bei größeren Raumvolumen der thermische Komfort eingehalten werden kann. Somit ist die Forschungsfrage nach der Dauer im Komfortbereich aufgrund des zu geringen Raumvolumens nicht realistisch zu beantworten. Durch weitere Analyse mit einem anderen, größeren Messaufbau und einem gleich groß dimensionierten thermisch aktivierte Massivholzelement würden aber aus Sicht der Autoren sehr vielversprechende Ergebnisse liefern.

Kapitel VI – Planung und Auslegung thermisch aktivierbarer Massivholzelemente für konkrete Einsatzszenarien

Ausarbeitung von Mustersystemlösungen und -details von der Bau- und der Anlagentechnik für die in AP 1 definierten Anforderungen

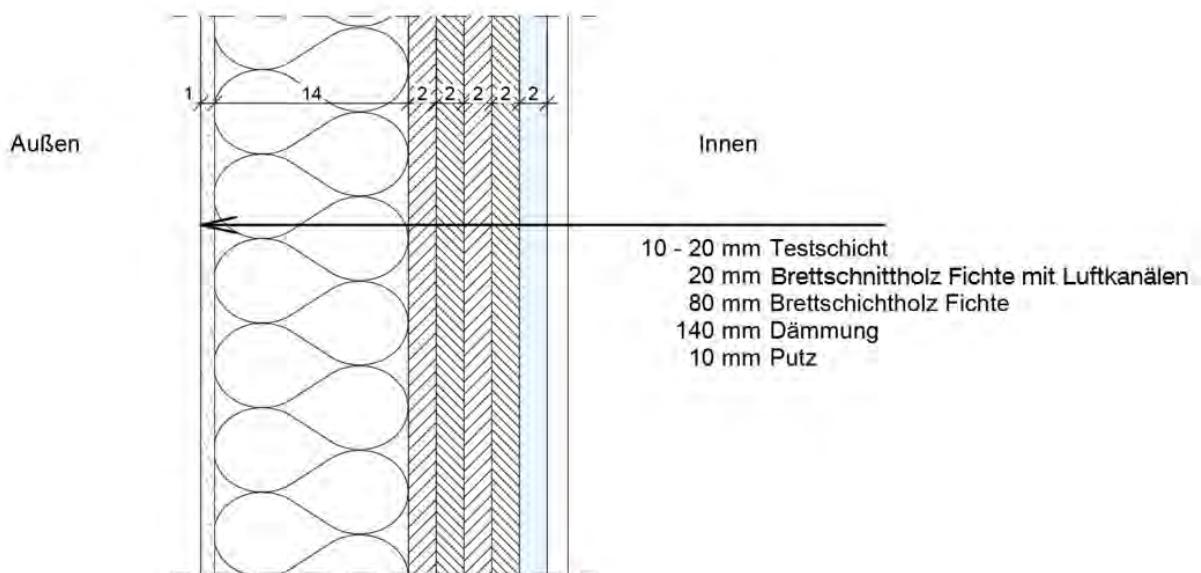
Nils Schumacher

Ausarbeitung von Mustersystemlösungen und -details der Bautechnik für die in Kapitel I definierten Anforderungen

Das thermisch aktivierte Massivholz kombiniert durch seinen Aufbau zwei für ein Bauwerk wesentliche Anforderungen. Zum einen ist es durch seine massiven kreuzverleimten Brettlamellen zum Tragen von Bauwerkslasten geeignet zum anderen besitzt es durch seine Luftkanäle im Inneren die Möglichkeit, mittels temperierter Luft einen Raum hygrothermisch zu konditionieren.

Dies sind jedoch nicht die einzigen Anforderungen, die an einen Wandaufbau im Bauwesen gestellt werden. Anhand des Wandaufbaus, in welchen der Prototypen C integriert wurde, werden die Funktionen der einzelnen Wandaufbauschichten beschrieben und den definierten Anforderungen zugeordnet. Nachfolgend ist der Wandaufbau mit Prototyp C dargestellt.

Abbildung 255 Schnitt durch Wandaufbau mit Prototyp C nach (Pape, 2020)



Fassade

Beim Wandaufbau mit Prototyp C wurde die Außenseite des Aufbaus verputzt. Zuerst wurde der Grundspachtel auf die putzbeschichtbare Holzfaser-Dämmplatte sowie das Armierungsgewebe aufgebracht. Darauf dann der mineralische Oberputz. Abschließend wurde der ausgehärtete Putz mit einer Siliconharz-Fassadenfarbe gestrichen. Dieser Fassadenaufbau dient dem Schutz vor Schlagregen und dem Schutz vor Durchfeuchtung der darunter befindlichen Dämmung.

Da es sich bei einem thermisch aktivierten Brettsperrholz um eine Weiterentwicklung von Brettsperrholz handelt, können sämtliche bzw. die im Holzbau üblichen Fassadenkonstruktionen hergestellt werden. Um ungewollte Wärmebrücken zu vermeiden, wird empfohlen, die Dämmschicht ungestört die Außenseiten der Wandelemente umschließen zu lassen.

Dämmung

Als Dämmung wurde für den Wandaufbau mit Prototyp C eine 140 mm dicke Holzfaserdämmplatte verwendet. Die Dämmung dient als wärmepuffernde Schicht, genau wie bei thermisch nicht aktivierten Wandaufbauten. Das Gebäude muss auch bei ausgeschalteter Bauteilaktivierung den Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden/(13. August 2020) genügen. Bei fehlender Dämmung wäre die Bauteilaktivierung zudem noch den klimatischen Außenbedingungen ausgesetzt, was sehr viel Energie in Form von Wärme- oder Kühlleistung benötigen würde.

Auch bei der Wahl der Dämmung können sämtliche Produkte verwendet werden, die bereits über eine bauordnungsrechtliche Genehmigung für die Verwendung bei Brettsperrholzelementen haben. Lediglich bei der Befestigung der Dämmplatten oder einer eventuell erforderlichen Unterkonstruktion ist darauf zu achten, dass die Befestigungsmittel nicht in die Luftkanalschicht eindringen. In der Baupraxis ermittelt sich die Dämmstoffdicke in Deutschland nach den Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes (Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden/(13. August 2020) bzw. nach dem geforderten Effizienzhausstandard.

TAM ohne Deckschicht

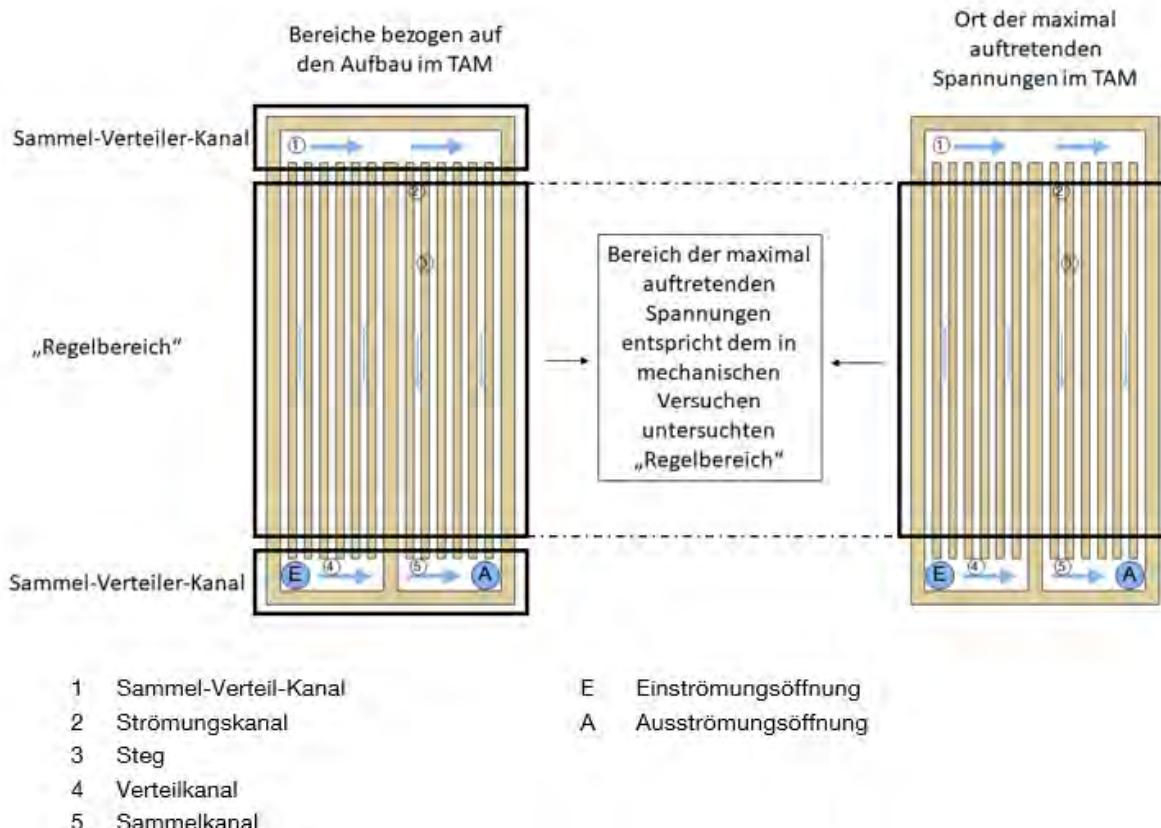
Das thermisch aktivierte Massivholz dient vorrangig der hygrothermischen Konditionierung des Innenraums. Hierzu wurden in einen Brettsperrholzaufbau Luftkanäle in die zweite Bretterschicht bzw. die zweite Bauelementsschicht eingebracht (vgl. Abbildung 255). Durch seinen massiven Aufbau aus kreuzweise verleimten Bretterlagen ist es jedoch auch optimal für die Abtragung von Bauwerkslasten geeignet. Hierzu wurden im Forschungsvorhaben InnoCrossLAM verschiedene TAM-Aufbauten hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Unter anderem auch ein Aufbau ohne Deckschicht aus Holz (Versuchsaufbau M-4, siehe Abbildung 27) (Arnold et al., 2021). Dieser Aufbau ermöglicht es weitere, aus statischer Sicht nicht tragende, Deckschichten auf das TAM aufzubringen und dessen hygrothermische Eigenschaften nochmal zu verändern.

Der Prototyp C besteht aus einem vierstöckigen Brettsperrholz aus Fichte und einer darauf befindlichen Luftkanalschicht, ebenfalls aus Fichte. Der vierstöckige Brettsperrholzaufbau entspricht dabei nicht den im Forschungsvorhaben geplanten Aufbau. Die tatsächliche Ausführung hat sich hier aus dem zur Verfügung stehenden Baumaterial, einem 4-schichtigem Brettsperrholz, ergeben. Somit besitzt der Prototyp C, mit Luftkanalschicht und Deckschicht, insgesamt 6 Bauteilschichten. Trotz der zusätzlichen Holzschicht bleibt der Wandaufbau im angestrebten U-Wert Bereich von rund 0,26 – 0,28 W/m²K.

Bei einer baupraktischen Anwendung muss geklärt werden, ob die tragende Funktion des TAM genutzt werden soll oder ob ein Einbau als nichttragendes Bauelement geplant ist. Je nach mechanischer Anforderung kann dann der Aufbau des TAM geplant werden. Angelehnt an die bisher erteilten Europäisch Technischen Bewertungen soll das ungestörte Brettsperrholz, also ohne die Luftkanalschicht, mindestens drei Bretterlagen besitzen, die bezogen auf die Dicke und Ausrichtung einen symmetrischen Aufbau haben (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2017). Die kreuzweise und symmetrische Anordnung sorgen dafür, dass eine Sperrwirkung entsteht und das Schwinden in Plattenebene 0,01% der Länge pro % Feuchteänderung beträgt (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2017). Sollte das TAM tragend in ein Gebäude eingebracht werden, ist es sinnvoll den Querschnitt mit Luftkanalschicht und evtl. Deckschicht statisch anzusetzen. Hierzu wurden im Forschungsprojekt InnoCrossLAM insgesamt fünf verschiedenen Aufbauten hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, wie Druck, Steifigkeit, Knicken, Schub in Plattenebene und Torsion untersucht (Arnold et al., 2021). Obwohl die mechanischen Versuche an Prüfkörpern durchgeführt wurden, deren Aufbau lediglich dem

„Regelbereich“ des TAM-Aufbaus entsprechen, können die erzielten Ergebnisse auch auf das thermisch aktivierte Massivholz angewandt werden. Dies lässt sich mit dem Aufbau des thermisch aktivierten Massivholzelements begründen, denn am Ort der maximal auftretenden Spannungen aus Schub- bzw. Knickbeanspruchung ist auch der untersuchte „Regelbereich“ vorhanden.

Abbildung 256 Gegenüberstellung von „Regelbereich“ und Ort der maximalen Spannungen, nach (Pape, 2020)



Deckschicht

Die Deckschicht des Prototyp C besteht aus einer 19 mm dicken Dreischichtplatte aus Fichtenholz. Die Deckschicht gibt Wärme bzw. Kälte, die durch die Systemluft an sie abgegeben wird, wieder an die Raumluft ab. Der Wärmeübergang von der Deckschicht an den Raum erfolgt durch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Da sich zwischen Systemluft und Raumluft lediglich die Deckschicht befindet und keine zusätzlichen Bauteilschichten verwendet werden, die den Feuchtetransport von der Systemluft oder der Raumluft auf die Deckschicht verhindern, beeinflussen auch die hygrischen Eigenschaften der jeweiligen Deckschicht das Raumklima.

Um die Eignung als Deckplatte an einem thermisch aktivierten Massivholz zu bestimmen, wurden im Forschungsvorhaben unterschiedliche Deckplatten untersucht. Folgend werden die Materialien der Deckplatten genannt und deren bauphysikalischen, optischen sowie baupraktischen Vor- und Nachteile genannt:

Deckschicht 1: Vollholzplatte (Fichtenholz)

Die Vollholzplatte ist bezogen auf die Produktion die konsequenteste Deckschicht. Sie wird aus dem gleichen Grundmaterial wie das restliche thermisch aktivierte Massivholz - aus Fichte - hergestellt. Somit kann der Einbau der Deckplatte sehr gut in den bereits bestehenden Produktionsablauf eingebaut werden. Auch bezogen auf die Recyclingfähigkeit passt die Platte zu dem Ein-Stoff-Konzept des Bauteilaufbaus. Damit die

Systemluft nicht unkontrolliert aus dem TAM ausdringen kann, müssen die Schmalseiten der Vollholzplatte miteinander verleimt werden.

Deckschicht 2: Dreischichtplatte (Fichtenholz)

Eine Dreischichtplatte als Deckschicht auf einem thermisch aktivierten Massivholz wird, wie die obere Variante ebenfalls dem Ein-Stoff-Konzept zugeordnet. Dadurch, dass die Platte ebenfalls aus drei Holzsichten besteht, die rechtwinklig zueinander verleimt sind, ist das Schwind- und Quellverhalten gegenüber der Vollholzplatte stark reduziert. Das schließt das Auftreten von Rissen quasi komplett aus.

Deckschicht 3: Lehmabauplatte

Die im Forschungsvorhaben untersuchte Lehmabauplatte hat eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Lehmabauplatte}} = 0,353 \text{ W/mK}$ (Hart Keramic AG, 2020) und damit ein fast dreimal so hohen Wert wie Holz, die $\lambda_{\text{Holz}} = 0,13 \text{ W/mK}$ (Hering et al., 2016) beträgt. Zudem kann die Lehmabauplatte schnell Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen und wieder abgeben ($> 40 \text{ g/m}^2$ nach 6 Stunden (Hart Keramic AG, 2020)).

Befestigt wird die Platte mittels Schrauben auf den umlaufenden Rahmen, um das Element und auf die Stege der Luftkanäle (Abbildung 258). Nach der Montage der Platten muss die Oberfläche noch mit einem Oberputz und abschließend mit einem Designputz versehen werden.

Deckschicht 4: Gipskartonplatte

Eine herkömmliche Gipskartonplatte hat eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Gips GKB}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Saint-Gobain Rigips GmbH, HS, 2015) und erreicht damit die Leitfähigkeit von einer Lehmabauplatte nicht. Ein großer baupraktischer Vorteil allerdings ist die gute Verarbeitbarkeit und die einfache Herstellung einer Innenoberfläche. Bei Gipskartonplatten müssen lediglich die Befestigungsmittel und die Fugen verspachtelt werden. Anschließend kann die Platte mit Innenraumfarbe gestrichen werden. Eine schlichte weiße Innenwandoberfläche weist, nach Aussage der Fa. Binderholz GmbH, immer noch den größten Marktanteil auf. Dies begründete die Fa. Binderholz GmbH, im persönlichen Gespräch mit dem Forschungsteam, mit der tendenziell geringeren Nachfrage nach fertigen Sichtoberflächen und einer größeren Nachfrage nach Industrieoberflächen, welche anschließend zum Großteil mit Gipsbauplatten verkleidet werden.

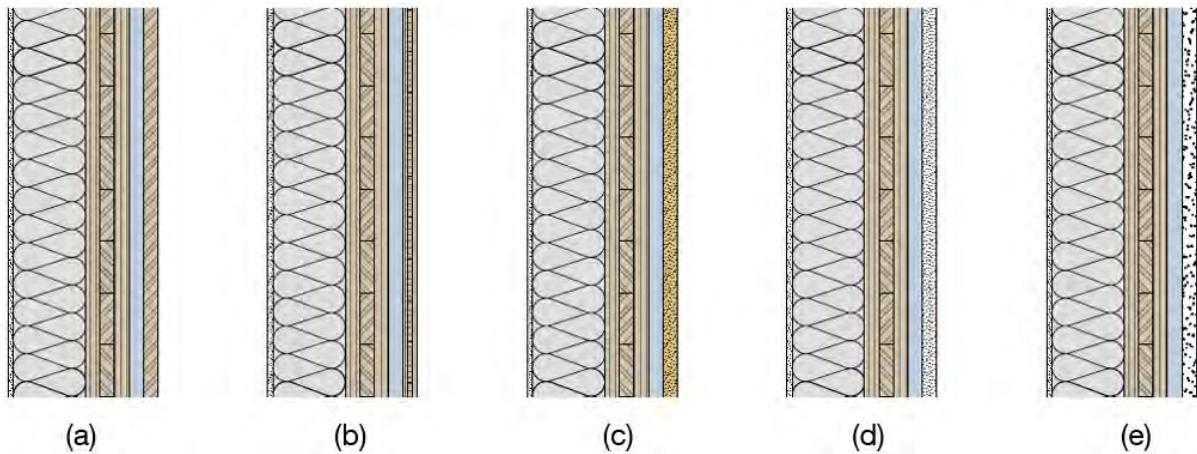
Deckschicht 5: Gipskartonplatte mit Graphitanteil

Bei der Gipskartonplatte mit Graphitanteil handelt es sich um eine graphitmodifizierte Gipsplatte. Durch den Graphitanteil besitzt die Platte gegenüber der Standardplatte eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Gips Graphit}} = 0,52 \text{ W/mK}$ (Saint-Gobain Rigips GmbH, BBU, 2015).

Ausführungstechnisch bestehen bei der Gipsplatte mit Graphitanteil keine Unterschiede zu herkömmlichen Gipskartonplatten.

In Abbildung 257 sind die beschriebenen Aufbauten mit den unterschiedlichen Deckschichten dargestellt.

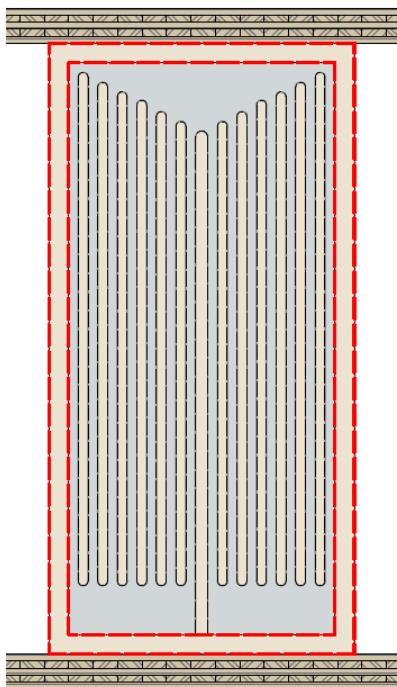
Abbildung 257 TAM-Wandaufbauten mit unterschiedlichen Deckplatten: (a) Vollholzplatte, (b) Dreischichtplatte, (c) Lehmbauplatte, (d) Gipskartonplatte, (e) Gipskartonplatte mit Graphitanteil (eigene Darstellung)



Bezogen auf die Bauteilebene wurden insgesamt fünf unterschiedliche Wandaufbauten beschrieben und die verschiedenen Deckschichten untersucht. Doch nicht nur das Bauteil selbst, sondern auch die Anbindungen bzw. Fügungen an andere Bauteile müssen den konstruktiven sowie biophysikalischen Anforderungen genügen.

Der Anschluss des TAM an weitere Bauteile kann über insgesamt vier Bauteilseiten erfolgen. Wandfuß, Wandkopf und die beiden Wandseiten. Die Luftkanalschicht umgibt allseitig ein konstruktiver „Rahmen“ Abbildung 258. Dieser „Rahmen“ dient unter anderem zur Anbringung von Befestigungsmitteln.

Abbildung 258 Ansicht Kanalschicht TAM. Rot markierter Bereich für Anbringung von Befestigungsmittel (eigene Darstellung)



Bei den An schlüssen kann am Wandkopf noch zwischen einem tragenden und einem nicht tragenden An schluss unterschieden werden. Beim An schluss über die Wandseite wird zwischen einem geraden An schluss

bzw. Wandstoß und einem Anschluss als Bauwerksecke unterschieden. Diese Unterscheidungen sind in Abbildung 259 schematisch dargestellt.

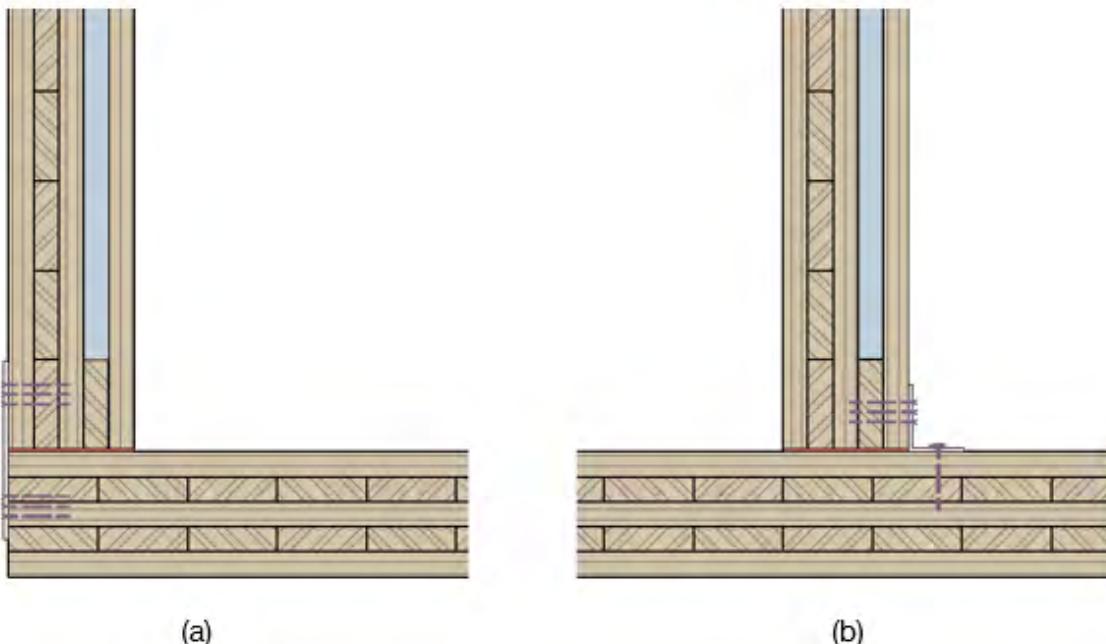
Abbildung 259 Anschlussmöglichkeiten nach Anschlussort eines TAM an weitere Bauteile (eigene Darstellung)

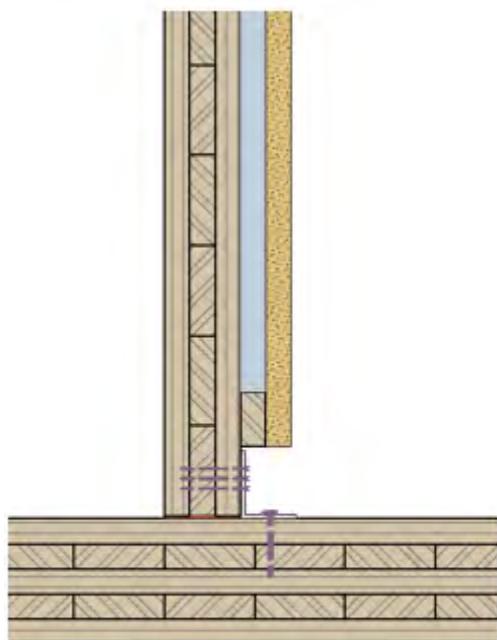


Folgend werden mögliche Bauteilanschlüsse gezeigt und die konstruktiven sowie bauphysikalischen Eigenschaften beschrieben. Bei den dargestellten Abbildungen handelt es sich jedoch um beispielhafte Symbolabbildungen. Sie ersetzen keine fachspezifische bzw. projektspezifische statische und bauphysikalische Berechnung.

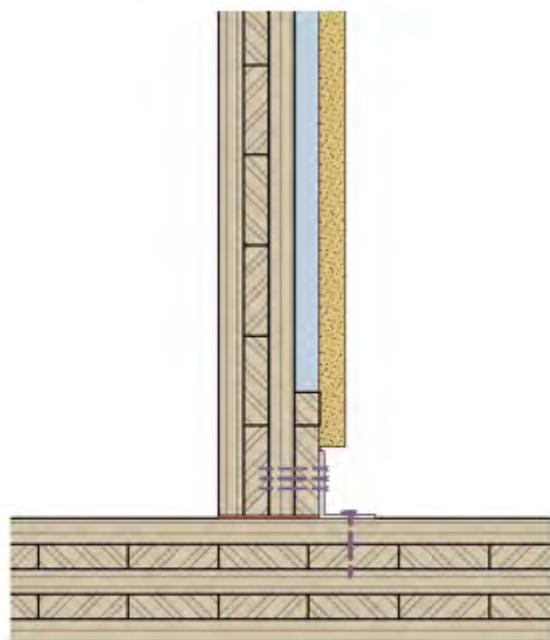
Wandfuß

Abbildung 260 (a) Wandfuß mit Befestigung auf der hygrothermisch nicht aktivierten Oberfläche (HnAO), (b) Wandfuß mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV1 und PV2, (c) Wandfuß mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV3, (d) Wandfuß mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV4, (e) Wandfuß mit Zugankersystem (eigene Darstellung)

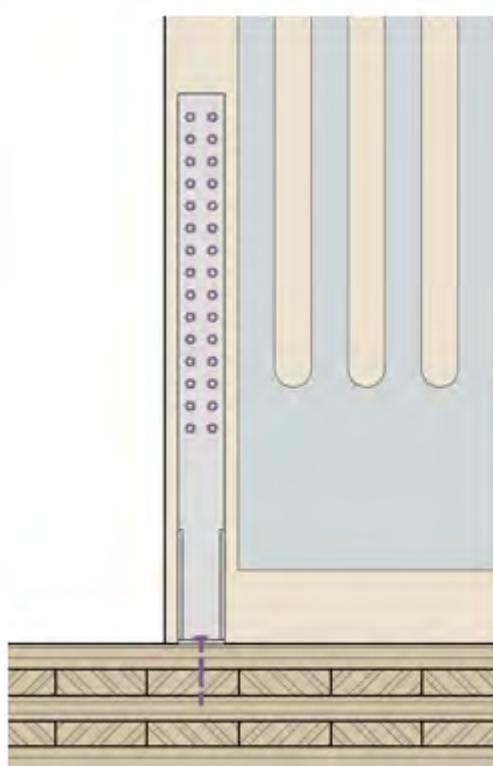




(c)



(d)



(e)

Am Wandfuß kann das TAM über Verbindungsmittel, beispielsweise Stahlwinkel oder Lochbleche, mit der darunterliegenden Decke bzw. Wand verbunden werden. Es gilt jedoch zu unterscheiden, ob es sich um ein TAM mit geklebter/eingefräster Luftkanalschicht und geklebter Deckschicht (PV1 und PV2), oder um ein TAM mit aufgeschraubter Luftkanalschicht und aufgeschraubter Deckschicht (PV3) oder um ein TAM mit geklebter/eingefräster Luftkanalschicht und aufgeschraubter Deckschicht (PV4) handelt. Die

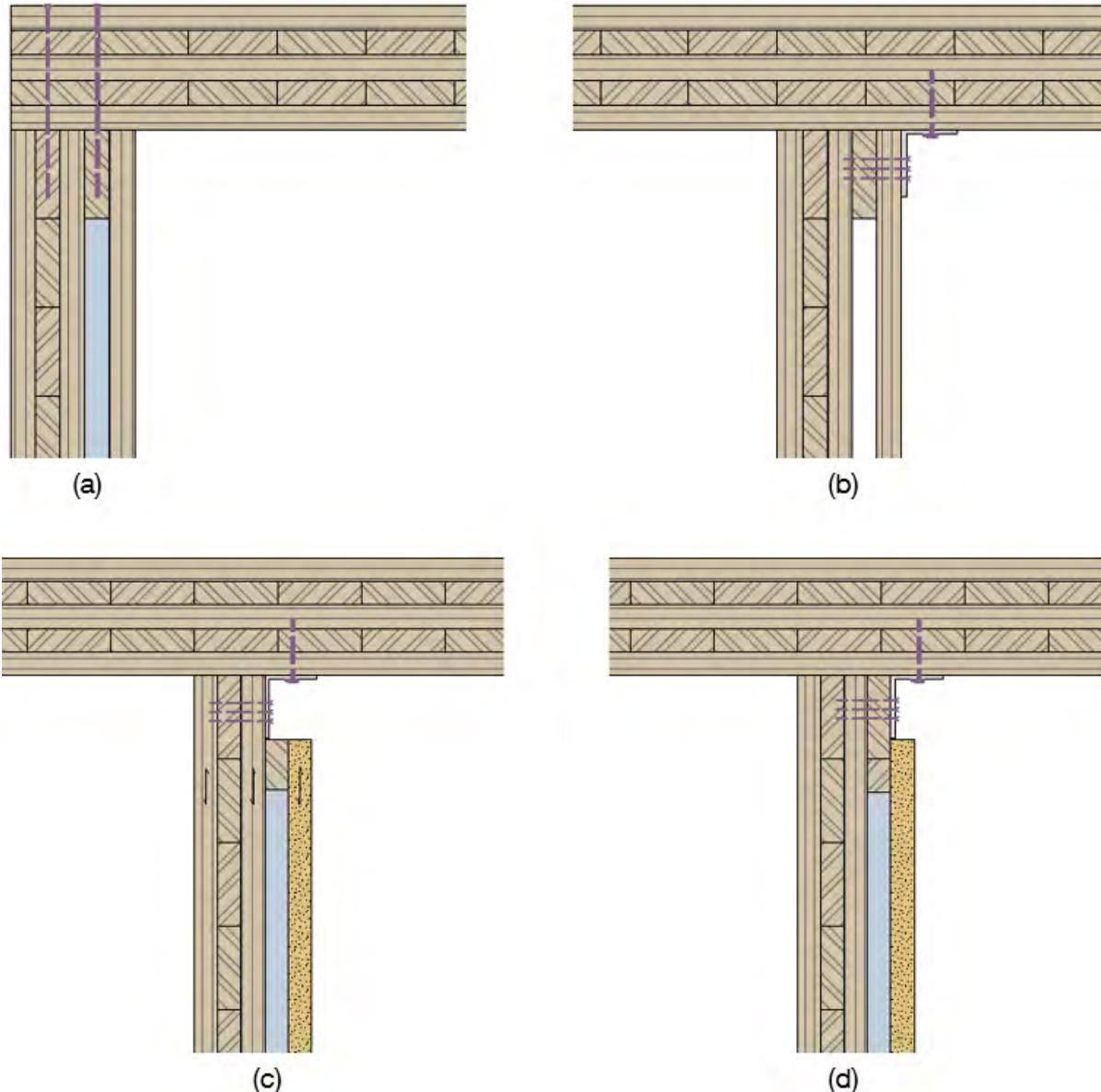
Verbindungsmittel sollten immer an den geklebten Aufbau des TAM befestigt werden. Das gilt sowohl für die hygrothermisch aktive Oberfläche (HAO) als auch für die gegenüberliegende Seite (HnAO). Somit sind keine zusätzlichen Schraubenverbindungen statisch nachzuweisen und die Kräfte werden direkt in das Vollholzprodukt eingeleitet. Es ist darauf zu achten, dass die Verbindungsmittel die Luftkanalschicht nicht durchstoßen und die Randabstände eingehalten werden. Aus diesem Grund sollte der umgebende Rahmen auch vergleichbare Abmessungen zu Rippen, Schwelle und Rähm im Holztafelbau haben.

Im Bauablauf sind Verbindungsmittel am Wandfuß erstmals in der Montage wichtig. Sie verhindern ein Verrutschen der Elemente nach dem Ausrichten. Im fertigen Gebäude können z.B. Stahlwinkelverbindungen horizontale Scherkräfte in Richtung der Bauteilachse sowie rechtwinklig dazu aufnehmen. Um Horizontalkräfte aufnehmen zu können, benötigt es spezielle Zugankersysteme (e) (Rotho Blaas SRL). Diese Systeme zeichnen sich über einen langen Stahlblechschenkel aus, um die Zugkräfte ins Bauteil einzuleiten. Beim TAM ist eine Montage dieser Systeme nur im Eckbereich zwischen Wandfuß und Wandseite möglich. Für die Übertragung von vertikalen Druckkräften werden keine Verbindungsmittel benötigt, da die Kraftübertragung über Kontaktdruck zwischen TAM und dem sich darunter befindenden Bauteil erfolgt.

Die Fassade und die Dämmung werden über die Bauteilfuge zwischen TAM und Decke/Wand geführt. Um den Diffusionswiderstand von innen nach außen sicher zu stellen, sind verformbare Kompressionsbänder und/oder Dichtungsschläuche aus geschlossenporigem Material einzubauen.

Wandkopf, tragend

Abbildung 261 (a) Wandkopf mit Befestigung über die Decke, (b) Wandkopf mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV1 und PV2, (c) Wandkopf mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV3, (d) Wandkopf mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV4 (eigene Darstellung)



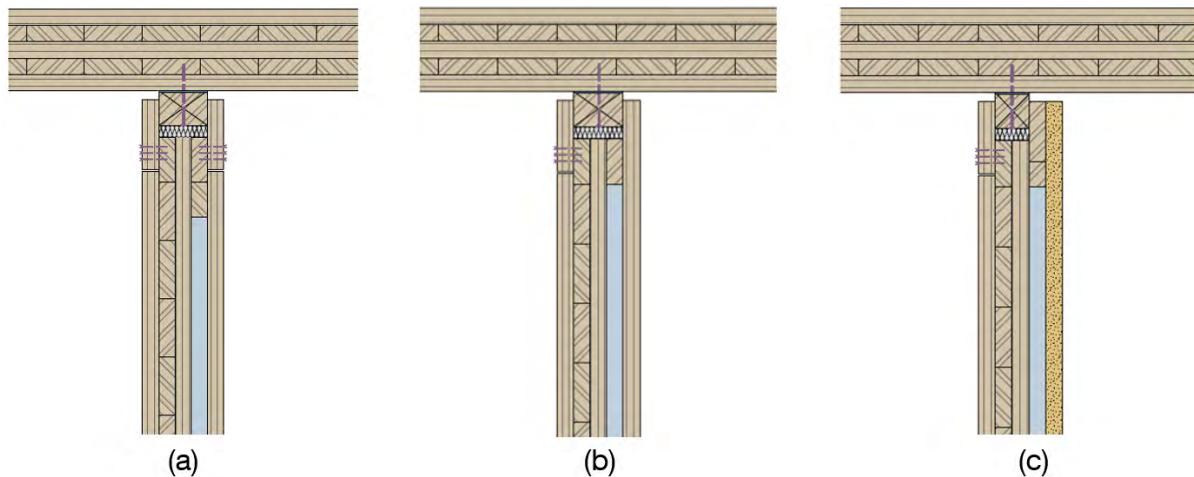
Grundsätzlich können die Anschlüsse des TAM am Wandfuß für den Wandkopf gedanklich gedreht werden und ebenso ausgeführt werden. Am Wandkopf gilt es darauf zu achten, dass eine Fuge zwischen Decke und den eventuell nicht tragenden Aufbauten wie Luftkanalschicht und/oder Deckschicht gibt. Somit wird ein ungewolltes Einleiten von Bauwerkslasten in statisch nichttragende Bauteilschichten vermieden. Zu den An schlüssen über Stahlformteile, wie Stahlwinkel etc., sind auch Anschlüsse mit stiftförmigen Verbindungsmittel, wie Schrauben, möglich. Es ist zu beachten, dass die Verbindungsmittel nicht in das Hirnholz des TAM geschraubt werden, da abhebende Kräfte normativ so nicht eingeleitet werden dürfen. Auch bei Verbindungen mit ausschließlich stabförmigen Verbindungsmitteln darf die Luftkanalschicht nicht beschädigt werden.

Die Verbindungsmittel dienen, ebenso wie am Wandfuß, der Lasteinleitung von horizontalen Scherkräften in Bauteilebene und rechtwinklig dazu. Zudem können Zugankersysteme oder vertikale Schrauben vertikale Zugkräfte aufnehmen. Druckkräfte werden über Kontakt der über dem TAM befindlichen Bauteile in das TAM selbst eingeleitet.

Die wichtigen bauphysikalischen Wandschichten an der hygrothermisch nicht aktivierten Oberfläche (HnAO) sind analog zum Wandfuß auszuführen.

Wandkopf, nicht tragend

Abbildung 262 TAM Anschluss an Decke, nicht tragend (eigene Darstellung)



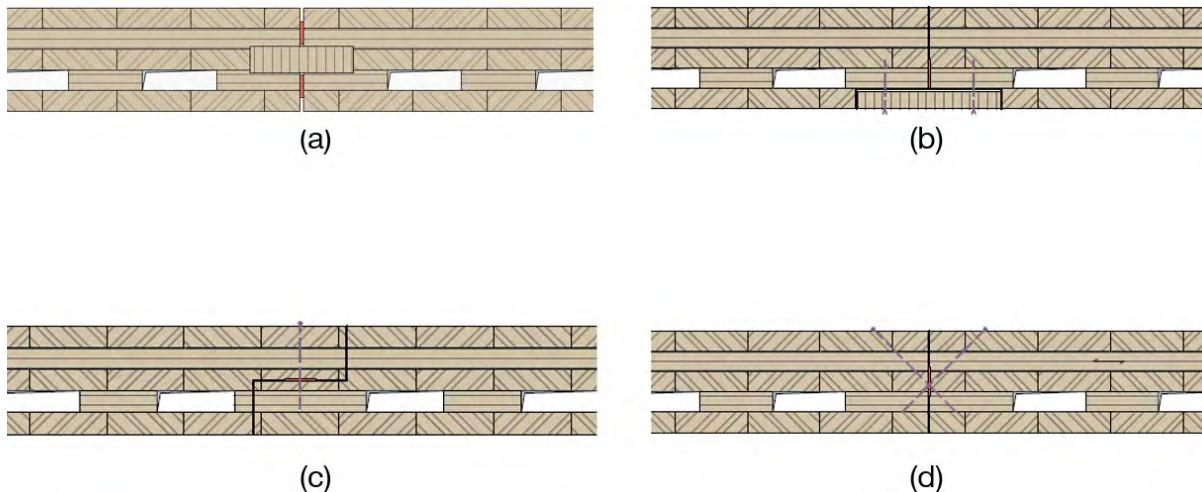
Nicht tragende Anschlüsse am Wandkopf sollen vermeiden, dass durch vertikale Durchbiegung z.B. einer Decke, dass das darunterliegende TAM statisch in vertikaler Richtung beansprucht wird. Horizontal muss das TAM jedoch fixiert sein. Hierfür wird ein Kantholz als Anschlag an die Decke montiert. Direkt unter dem Kantholz folgt beim fertigen Aufbau weiche Dämmwolle die bei Deckendurchbiegung zusammengedrückt werden kann. Der Abstand zwischen TAM und Kantholz ist dabei so groß zu wählen, dass trotz maximaler Durchbiegung sich die beiden Bauteile nicht berühren. Damit eine vertikale Verschiebung möglich ist, darf keine statische Verbindung zwischen Kantholz und TAM ausgeführt werden.

In Variante (a) werden die äußeren Bauteilschichten im Bereich des Wandkopfes ausgespart und während der Montage mit seitlich befestigten Brettern oder Platten wieder verschlossen. Diese Bretter werden mit dem TAM verschraubt. Da die Bretter das Kantholz seitlich umschließen, ist das TAM am Wandkopf horizontal gehalten. Die Ausführung in Variante (b) lässt die Deckplatte aus Holz bis kurz vor der Decke durchlaufen. Mittels eines Z-förmigen Falzes kann das TAM von einer Seite eingeschoben werden. Sobald es oben am Kantholzanschlag ansteht, wird es wie in Variante (a) mit einem seitlichen Brett auf der gegenüberliegenden Seite befestigt. Der große Vorteil der Variante (b) gegenüber Variante (a) liegt darin, dass auf der Bauteileite mit durchlaufender Deckschicht keine Verbindungsmittel sichtbar sind. Variante (c) kommt zur Ausführung, wenn es sich bei der Deckplatte z.B. um eine Lehmplatte oder eine Gipskartonplatte handelt. Also bei sämtlichen Plattenwerkstoffen, die gegenüber Holzplatten oder Holzbrettern keine, oder nur sehr geringe Kräfte über Plattenbiegung aufnehmen können. Hier wird der Anschluss ähnlich wie in Variante (a) beschrieben ausgeführt. Die zweite Bauteilschicht, welche aus Holz besteht, umschließt das Kantholz. Anschließend kann eine Deckschicht aus einem weiteren Baumaterial aufgebracht werden.

Da es sich bei diesen nichttragenden An schlüssen um Innenwandanschlüsse handelt, werden keine Anforderungen an Witterungsschutz und Wärmeschutz gestellt. Über Schalldämm bänder zwischen der Decke und dem Kantholz kann die Körperschallübertragung behindert werden.

Wandseite, gerade Verbindung / Wandstoß

Abbildung 263 (a) Wandstoß mit Fugenbrett innenliegend, (b) Wandstoß mit Fugenbrett außenliegend, (c) Wandstoß mit Stufenfalz, (d) stumpfer Wandstoß (eigene Darstellung)



Bei den geradlinigen Verbindungen von einem TAM an das Nächste gibt es folgende Punkte zu beachten:

- Müssen Bauteilausdehnungen berücksichtigt werden, damit es nicht zu ungewollten Spannungen im Bauteil kommt?
- Müssen Kräfte vom einen Bauteil zum nächsten übertragen werden, da die Bauteile zur Gebäudeaussteifung verwendet werden?

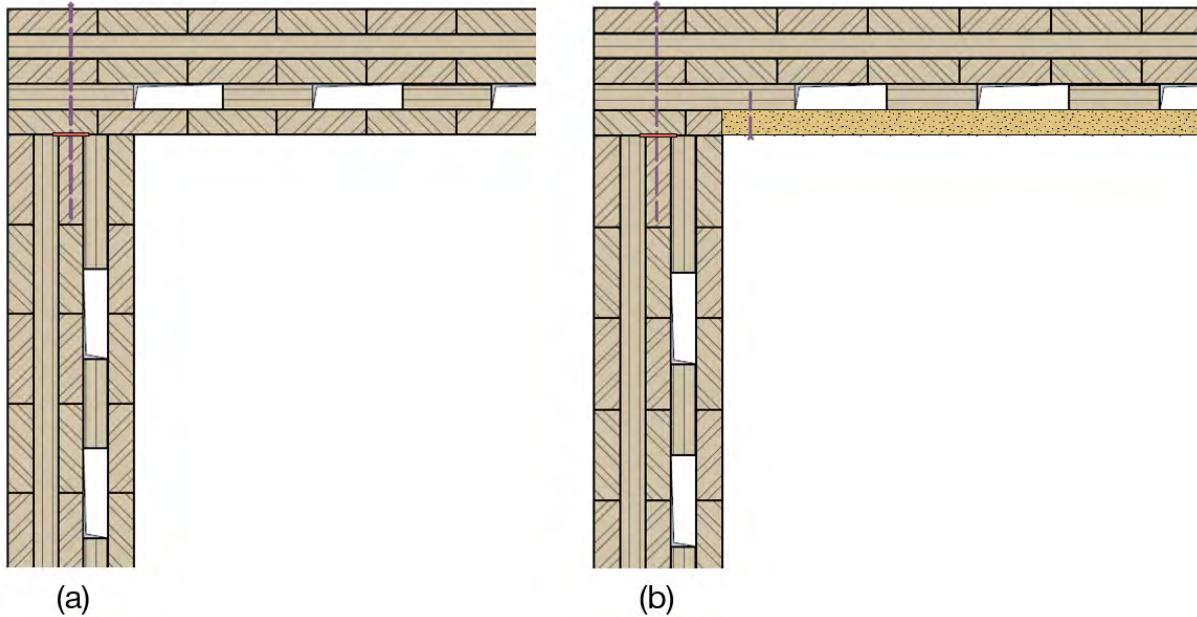
Durch das Fugenbrett in Variante (a) sind die beiden angrenzenden TAM-Elemente rechtwinklig zur Plattenebene miteinander verbunden. Biegungen werden von beiden Bauteilen im gleichen Maße aufgenommen und es entsteht kein Versatz. Weiter ist es möglich, dass an der Fügestelle sich die Bauteile in Plattenebene ungehindert ausdehnen können. Dies gilt allerdings nur für sehr hohe Anforderungen, da Brettsperrholz und wegen des ähnlichen Aufbaus auch das thermisch aktivierte Massivholz, auf Grund der kreuzweise verleimten Bretterlagen sehr geringe Quell- und Schwindmaße besitzen.

Bei einer Übertragung von Scherkräften über die Bauteilfuge zwischen den beiden Bauteilen bieten sich die beiden Varianten (b) und (c) an. Die Kräfte werden vom Bauteil direkt an die Verschraubungen und anschließend an das weiterführende Bauteil weitergegeben. Entgegen der Variante (d) das die Kräfte über ein Fugenbrett an das nächste Bauteil weiterleiten muss.

Um keine sichtbaren Verbindungen auf der hygrothermisch aktivierte Oberfläche (HAO) zu haben müssen die Bauteile auf der hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche (HnAO) verschraubt werden. Bei Außenwandkonstruktionen ist dies der Bereich für die Wärmedämmung. Die Dämmung kann also erst nach der Montage und der Befestigung der TAM-Elemente erfolgen, was sich negativ auf die Vorfertigung auswirkt. Dies ist beim Montageablauf zu berücksichtigen.

Wandseite, Eckverbindung

Abbildung 264 Eckverbindungen von thermisch aktiviertem Massivholz; (a) Verbindung mit geklebter Deckschicht, (b) Verbindung mit geschraubter Deckschicht (eigene Darstellung)



Werden auf Grund von fehlenden statischen Anforderungen keine Verbindungsmitte im Eckbereich von zwei TAMs benötigt, so werden diese mindestens konstruktiv miteinander verbunden. Diese Verbindung (a) kann einfach über eine Schraubenverbindung hergestellt werden. So kann gewährleistet werden, dass das Dichtungsband auch über Jahre hinweg an der richtigen Stelle eingebaut ist. Die Breite des Rahmens um das TAM, welcher zur Befestigung der Verbindungsmitte vorgesehen wird, muss im Eckbereich auf die Breite des anzuschließenden Bauteils angepasst werden, damit das Luftkanalsystem nicht im Eckbereich liegt und von den Verbindungsmitten beschädigt werden kann (Abbildung 264).

Ausführungen von Eckverbindungen bei TAM-Aufbauten mit einer Deckplatte aus z.B. Lehm oder Gips, die aufgeschraubt werden, sind besonders zu beachten. Sollte die Deckplatte im Laufe der Nutzungsdauer ausgetauscht werden müssen, so darf dies nicht den Ausbau des kompletten Bauteils zu Folge haben. Im Eckbereich ist daher der „Rahmen“ für die Befestigung von Verbindungsmitten nochmals größer als die Breite des anzuschließenden Bauteils vorzusehen. So ist es möglich die Deckplatte zu befestigen ohne die Luftkanalschicht zu beschädigen.

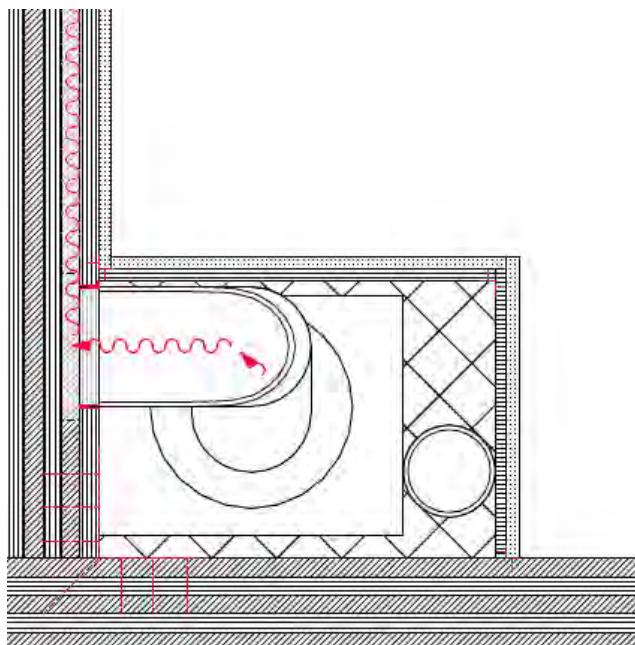
Ausarbeitung von Mustersystemlösungen und -details der Anlagentechnik für die in Kapitel I definierten Anforderungen

Bei der Entwicklung von Musterdetails für die Anbindung der Anlagentechnik an das TAM wird beim Medium Luft bei der Versorgung zwischen zentral, semizentral und dezentral unterschieden. Dabei wird die zentrale und semizentrale Versorgung gleichgesetzt, da sie sich in der baupraktischen Anbindung an das Bauteil nicht unterscheiden. Bei der zentralen und semizentralen Versorgung wird die erhitzte oder gekühlte Luft über Flachkanäle an das TAM angeschlossen. Flachkanäle zeigen hier verbesserte strömungstechnische Eigenschaften (vgl. Kapitel II). Der Flachkanal, mit dem der Prototyp C angeschlossen wurde, hat einen rechteckigen Querschnitt mit 20 x 5 cm. Ein Kanal in dieser Größe kann in einem Bodenaufbau integriert werden, da die Bodenaufbauten im modernen Holzbau mit Schüttung und Trittschalldämmung in der Regel größer 10 cm sind. Da bei einem wassergeführten System nur eine zentrale Versorgung in Frage kommt (siehe Kapitel II), zeigt sich Gleichtes bei der Anbindung an das TAM bei der Verwendung von einem wassergeführten System. Die entsprechenden Rohrleitungen können in diesem Fall ebenfalls in den Bodenaufbau integriert werden.

Bei einer dezentralen Versorgung mit Luft muss zusätzlich zu den Rohrleitungen lokal am TAM eine Technikeinheit direkt vor dem thermisch aktivierten Bauteil integriert werden. Eine solche Einheit ist zum aktuellen Zeitpunkt noch verhältnismäßig groß und sollte somit frühzeitig bei der Planung eines Gebäudes berücksichtigt werden. In den folgenden beiden Abbildungen werden Musterdetails gezeigt, die einen möglichen Einbau dieser Technikeinheit darstellen.

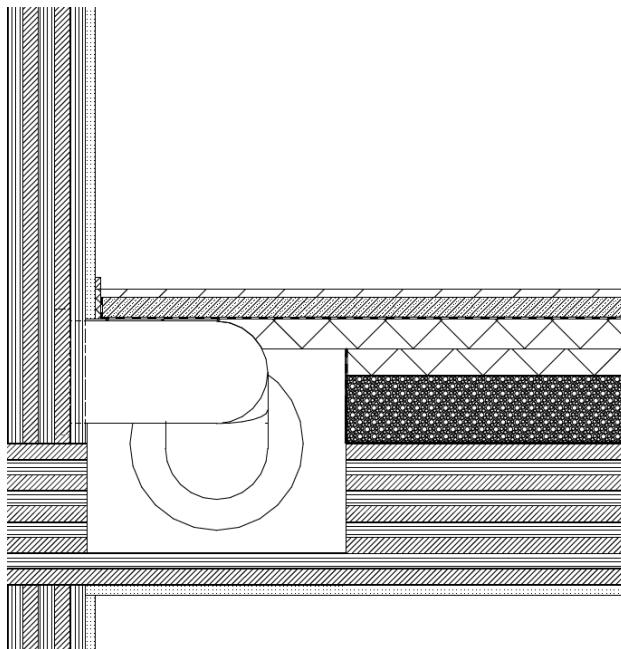
Zunächst wird die Technikeinheit direkt auf die Massivholzdecke montiert. Auf Grund der Größe der Technikeinheit ist eine Integrierung in den Bodenaufbau nur bei besonders hohen Aufbauten möglich. Um die Technikeinheit zu schützen und um die Abwärme der Einheit nicht unkontrolliert in den Raum strömen zu lassen, wird die Einheit gedämmt und anschließend mit Plattenmaterialien für den Innenausbau verkleidet. Bei der Verkleidung ist darauf zu achten, dass Revisionsöffnungen für Wartung und Reparatur vorgesehen werden. Bei größeren Bestellauflagen für die Technikeinheit wird von einer tendenziellen Verkleinerung der Einheit ausgegangen, was eine Einbindung in den Bodenaufbau weiter vereinfacht.

Abbildung 265 Konstruktiver Anschluss der dezentralen Technikeinheit an das TAM auf der Massivholzdecke, nach (Gruzlewski, 2019)



Um die Technikeinheit nicht sichtbar im Bodenaufbau verschwinden zu lassen, muss auf Grund der Größe der Einheit die Decke in diesem Bereich ausgespart werden. Bei dieser Ausführung ist besonders auf die Statik der Decke zu achten. In der folgenden Abbildung ist eine Massivholzdecke dargestellt. Massivholzdecken, wie Brettstapeldecken, spannen einachsig und Massivholzdecken aus Brettschichtholz können auf Grund ihrer kreuzweise verleimten Bretterlagen zweiachsig spannen. Bei jeder Ausführung ist darauf zu achten, dass die Ausführung nicht im Bereich des Auflagers der Decke durchgeführt wird. Die Aussparungen sollen parallel zur Hauptspannrichtung der Decke ausgeführt werden. Im gezeigten Beispiel senkrecht zur Bildebene. Es ist von Vorteil, dass die Decke mit geringerer Höhe unter der Technikeinheit weiterläuft und konstruktiv auf die Wand aufgelagert wird. So können starke Verformungen im Bereich des Anschlusses zwischen Technik und TAM vermieden werden.

Abbildung 266 Anschluss der dezentralen Technikeinheit an das TAM in der Massivholzdecke integriert, nach (Gruzlewski, 2019)



Kapitel VII – Konzepte für Produktion, Montage, Betrieb und Rückbau

Lebenszyklusbetrachtung für die in AP6 erarbeiteten Lösungen, intensiver Austausch mit den beteiligten Unternehmen zu produktions- und montagespezifischen Anforderungen, Erarbeitung von Wartungs- Erneuerungs- und Rückbaukonzepten

Lebenszyklusbetrachtung für die in Kapitel VI erarbeiteten Lösungen

Zsophia Varga, Nils Schumacher

Verwendete Methoden

Ziel der Ökobilanzierung war es, das thermisch aktivierte Massivholzbauteil (TAM) mit verschiedenen Deckschichtplatten und identischer Funktion untereinander zu vergleichen, um ihre Umweltwirkungen zu identifizieren und so das Produkt zu verbessern.

Das TAM bestand aus einer Grundplatte aus Brettsperrholz, in die Lüftungskanäle gefräst waren. An die Grundplatte wurde eine Deckplatte und eine Technikplatte befestigt (Abbildung 164) Die thermisch aktivierte Massivholzbauteile (TAM) unterschieden sich hinsichtlich ihrer Deckplatte, welche aus einer Dreischichtdeckplatte aus Holz, einer Lehmplatte oder einer Gipsplatte bestanden. Der Vergleich mit der Lehmplatte hat nicht stattgefunden, da in GaBi ts (thinkstep AG, 2020) keine Daten zur Modellierung, auf Grund des fehlenden Lehmputzes, zur Verfügung standen. Durch den Anschluss der TGA an die Technikplatte, wurde erwärme bzw. gekühlte Luft, je nachdem ob ein Heiz- oder Kühlleffekt erwünscht war, linksseitig in das Bauteil gebracht, welches durch die Lüftungskanäle der Wand zirkuliert und anschließend rechtseitig aus der Wand geleitet wurde. Insgesamt war die TAM 2,9 m hoch, 1,25 m breit und 95 mm dick. Sowohl die Technikplatte, als auch die Deckplatte waren 15mm dick, die Grundplatte 80mm. Die Deckplatte hatte eine Höhe von 2,6 m. Abbildung 267 ist der Aufbau der TAM, Abbildung 268 die Maße der Grundplatte und Abbildung 269 die der Technikplatte zu entnehmen.

Abbildung 267 Explosionszeichnung TAM (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.60)

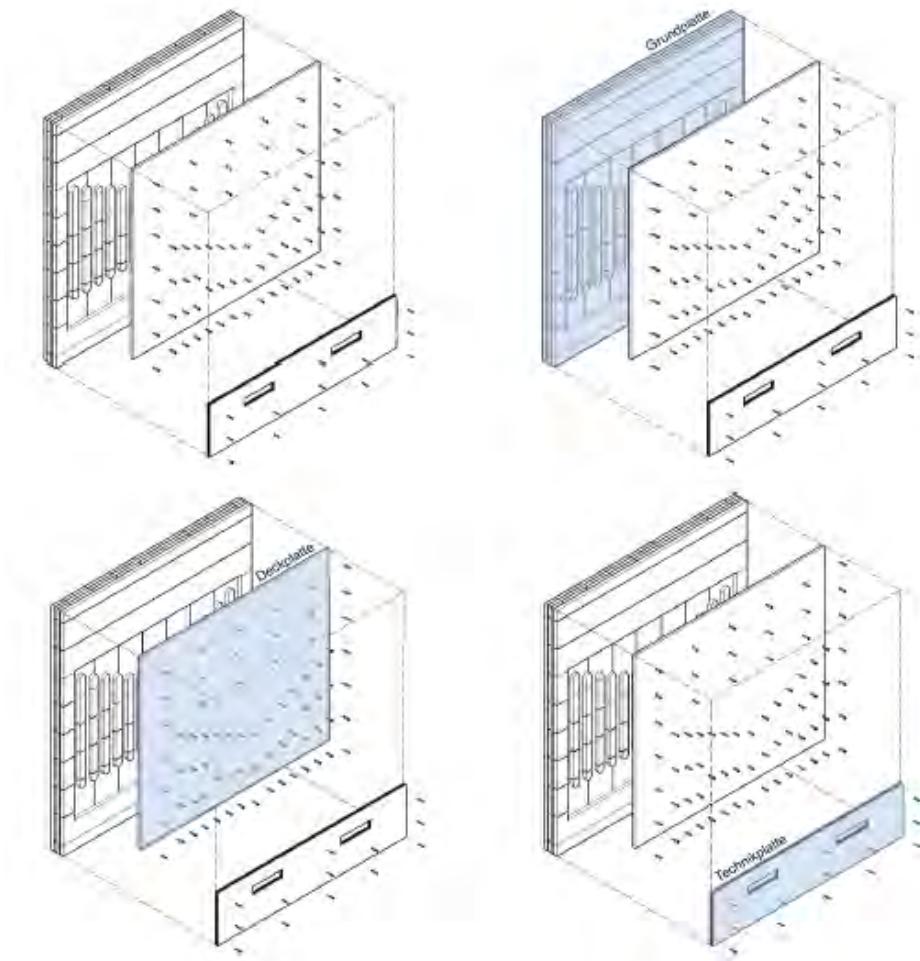


Abbildung 268 Vermaßung der Belüftungskanäle der Grundplatte (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.61)

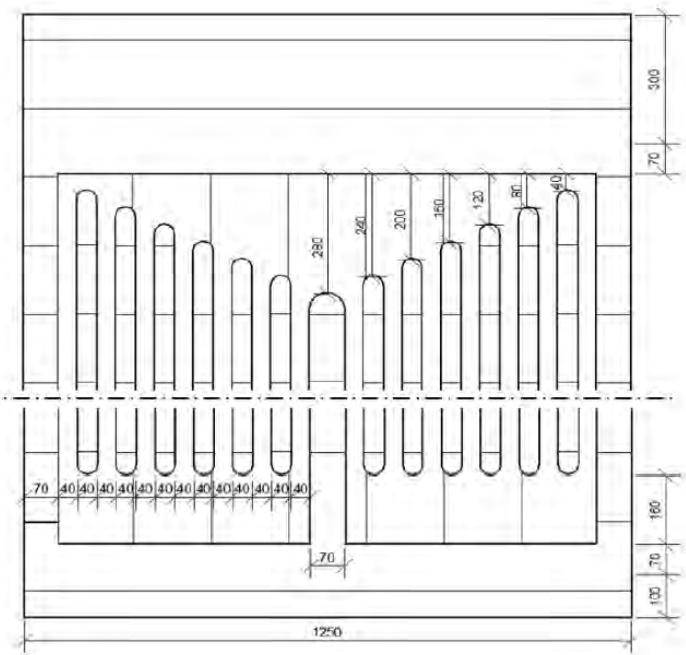
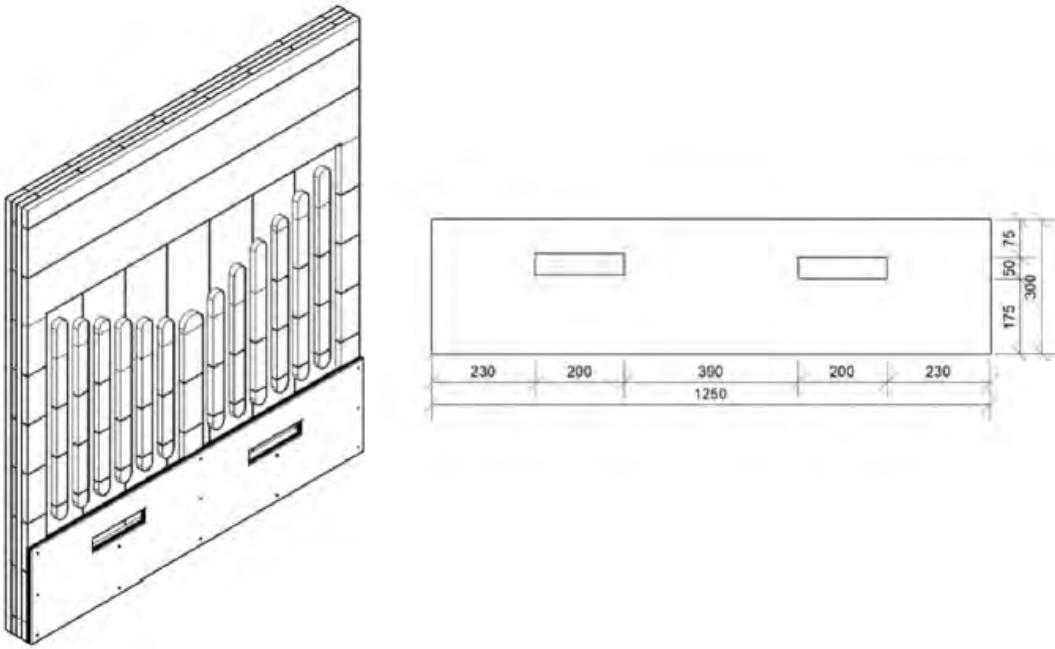


Abbildung 269 Vermaßung der Belüftungskanäle der Technikplatte (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.61)



Es wurde eine Ökobilanz der drei verschiedenen TAM-Bauteile mit demselben Ziel- und Untersuchungsrahmen (Herstellung (A1-A3), Bauteilmontage (A5) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C2-C4)) erstellt. Die Phase C2 stellte dabei die Phase des Transportes zum Recyclinghof bzw. Deponie dar. Modul C3 beschrieb die Auswirkungen der Abfallbehandlung und Modul C4 der Abfallbeseitigung. Für die Energierückgewinnung wurden Materialien mit einer Effizienzrate von mehr als 60% betrachtet.

Außerdem wurde noch außerhalb der Lebenszyklusphasen das Modul D hinsichtlich Gutschrift und Belastungen betrachtet, die sich durch die energetische Rückgewinnung oder stoffliche Weiterverwendung der Baustoffe ergeben würden. (NABau, 2020). Für das Material Holz des TAM-Bauteil fand nach DIN EN 16485:2014-07 ebenfalls die DIN EN 15804:2020-03, sowie für die anderen Materialien Anwendung. (NABau, 2014)

In Abbildung 270 sind die betrachteten Lebenszyklusphasen blau hervorgehoben. Die Ökobilanzierung wurde Anhand der Masterarbeit von Florian Böhm durchgeführt (Böhm, 2021).

Abbildung 270 Festlegung von Lebenszyklusmodulen (Böhm, 2021; in Anlehnung an DIN EN 15804:2020-03, S.17)

| LEBENSZYKLUSPHASEN | | | | | | | | | | | | | | | ERGÄNZENDE INFORMATIONEN AUSSENHALB DES LEBENSZYKLUS | | | | |
|------------------------|-----------|--------------------|-----------|----------------|---------|----------------|-----------|--------|--------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|-----------|------------------|--|---|--|--|--|
| HERSTELLUNG | | | BAU | | NUTZUNG | | | | | ENTSORGUNG | | | | | GUTSCHRIFTEN UND BELASTUNGEN | | | | |
| MODULE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | D | | | |
| ROHSTOFFBEREITSTELLUNG | TRANSPORT | BAUTEILHERSTELLUNG | TRANSPORT | BAUTEILMONTAGE | NUTZUNG | INSTANDHALTUNG | REPARATUR | ERSATZ | UMBAU / ERNEUERUNG | ENERGIEEINSATZ IM BETRIEB | WASSEREINSATZ IM BETRIEB | RÜCKBAU / ABRISSE | TRANSPORT | ABFALLBEHANDLUNG | DEPONIERUNG | WIEDERVERWENDUNGS-, RÜCKGEWINNUNGS-, RECYCLINGPOTENZIAL | | | |

Die funktionelle Einheit war ein TAM- Wandelement der Bauteilhöhe 2,9 m. Die Massenermittlung erfolgte in Anlehnung an die Masterarbeit von Lena Pape. Die notwendigen einzelnen Fertigungsschritte des Bauteils wurden anschließend mit den Hilfs- und Betriebsmitteln der Maschinen, wenn keine händische Anfertigung erfolgte, verknüpft. Diese waren der Stromverbrauch der Vakuumpresse und der Fräse (A3), sowie der Treibstoffbedarf der Transportmittel (A2). Für die Transportdistanzen wurden die gemittelten Entfernung der jeweiligen Produktionsstandorte der Materialien angenommen. Der Treibstoffbedarf stieg mit der zu transportierenden Masse sowie dem Transportweg an.

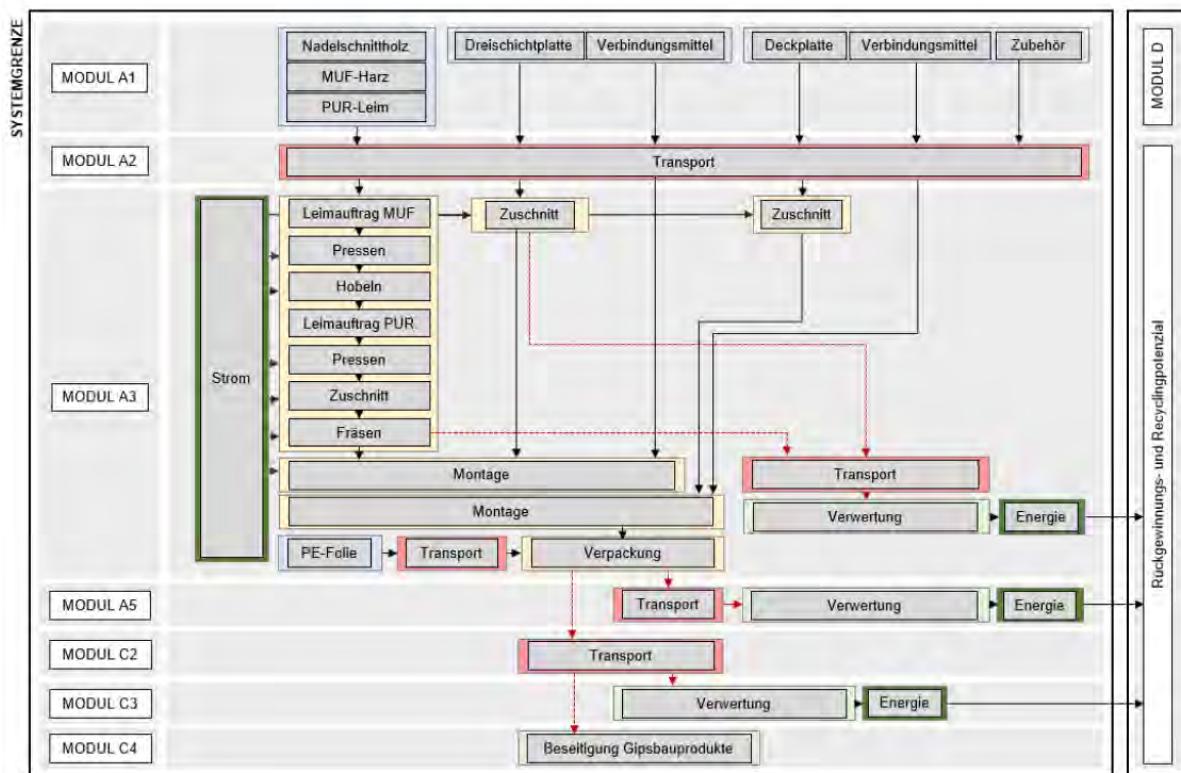
Die Entsorgung der Abfälle, die während der Herstellung des Bauteils anfielen, wurden in Phase (A3) berücksichtigt. Die Phase (A5) beinhaltete nur die Entsorgung der für den Transport des Bauteils notwendige Folie. (NABau, 2020)

Bei der Entsorgungsphase (C2) wurde der Transport zum Recyclinghof oder der Deponie berücksichtigt. (C3) enthielt die Phase der thermischen Abfallbehandlung, (C4) hingegen die Beseitigung auf der Deponie. In Phase (D) wurden der potentielle Nutzen und die möglichen Lasten, die durch die thermische Verwertung oder Weitertverwertung der Baumaterialien entstanden, aufgezeigt. Dabei wurde angenommen, dass der durch die thermische Verwertung erzeugte elektrische Strom, der Strommix Deutschland und die Prozesswärme, den zuvor notwendigen Erdgas ersetzt. Holzspäne, die während der Produktion anfielen, wurden vollständig der thermischen Verwertung zugeführt.

Bei der Abfallbehandlung des Holzes wurde eine thermische Verwertung angenommen. Nach der Kreislaufwirtschaft Bau wurden im Jahr 2018 4,7 % der Gipsabfälle recycelt, 44,9 % in Deponien und im Bergbau stofflich weiterverwertet und 50,4 % endgültig deponiert (Bundesverband Baustoffe Steine und Erden e.V., 2018). Da in Gabi ts kein Datensatz zur Modellierung der Gipsplatte in Phase D vorhanden war, wurde eine vollständige Deponierung der Gipsplatte vorausgesetzt.

Für alle Verbindungsmittel wurde in Modul D eine Gutschrift zur Verwendung als Sekundärrohstoff angenommen.

Abbildung 271 Systemfließbild TAM (Böhm, 2021)



Das Systembild des thermisch aktivierte Bauteils ist Abbildung 271 zu entnehmen. Die für die Ökobilanzierung erforderliche Modellierung des TAM erfolgte mit Hilfe der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts (thinkstep AG, 2020) und der Datenbank My Database EN (thinkstep AG, 2020)

In Anlehnung an DIN EN 15804:2020-03 und den Vorgaben zur Anfertigung einer EPD wurde der Input an Ressourcen hinsichtlich Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar), sowie Output bezogenen Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial, in das Süßwasser gelangende Nährstoffanteile (EP-Süßwasser), Versauerungspotenzial (AP), troposphärisches Ozonbildungspotenzial (POCP) untersucht. Die restlichen Vorgaben hinsichtlich der Betrachtung von Umweltwirkungen wurden zum Vergleich der Bauteilvarianten vernachlässigt.

Folgende Normen wurden bei der Untersuchung verwendet: DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02, DIN EN ISO 14025:2011-10, DIN EN 15804:2014-07 und DIN EN 16485:2014-07.

Definition Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel- und Untersuchungsrahmen mit Systembeschreibung

- Untersuchung eines thermisch aktiviertes Brettsperholzelementes (Dicke 9,5cm) der Bauteilhöhe 2,9m, versehen mit einer Technikplatte und zwei verschiedenen Deckplattenvarianten aus Gips und einer Dreischichtplatte,
- Ziel war die zwei verschiedenen Varianten untereinander zu vergleichen und eine Aussage über sie anhand ihrer Umweltwirkungen treffen zu können
- Errechneter Primärenergieaufwand, Treibhauspotenzial (GWP), Eutrophierungspotenzial, in das Süßwasser gelangende Nährstoffanteile (EP-Süßwasser), Versauerungspotenzial (AP), troposphärisches Ozonbildungspotenzial (POCP) hinsichtlich Herstellung (A1-A3), Bauteilmontage (A5) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C2-C4) sowie Gutschrift und Belastungen (D) außerhalb der Lebenszyklusphasen
- Die im Rohstoff gespeicherten Primärenergien wurden anhand der Heizwerte der Materialien ermittelt (Zehfuß, 2020; Rüter und Diederichs, 2012)

Sachbilanz und Inventar

Sachbilanzdaten Kurzfassung

- Input an Materialmengen sowie der Maschinenleistungen bezogen auf jeweils ein TAM der Bauteilhöhe 2,9m als wesentliche Basisgröße für die Bauteilbetrachtung
- Massenermittlung erfolgte auf Grundlage der Masterarbeit von Lena Pape
- Bei der Erstellung wurden die EPD-Datenblätter verschiedener Hersteller als Orientierungshilfen hergenommen
- Zusammenfassung der Phasen A1-3 (Herstellung), A5 (Bauteilmontage) und C2-4 (Entsorgung)
- Methode: DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02, DIN EN ISO 14025:2011-10, DIN EN 15804:2020-03 und DIN EN 16485:2014-07

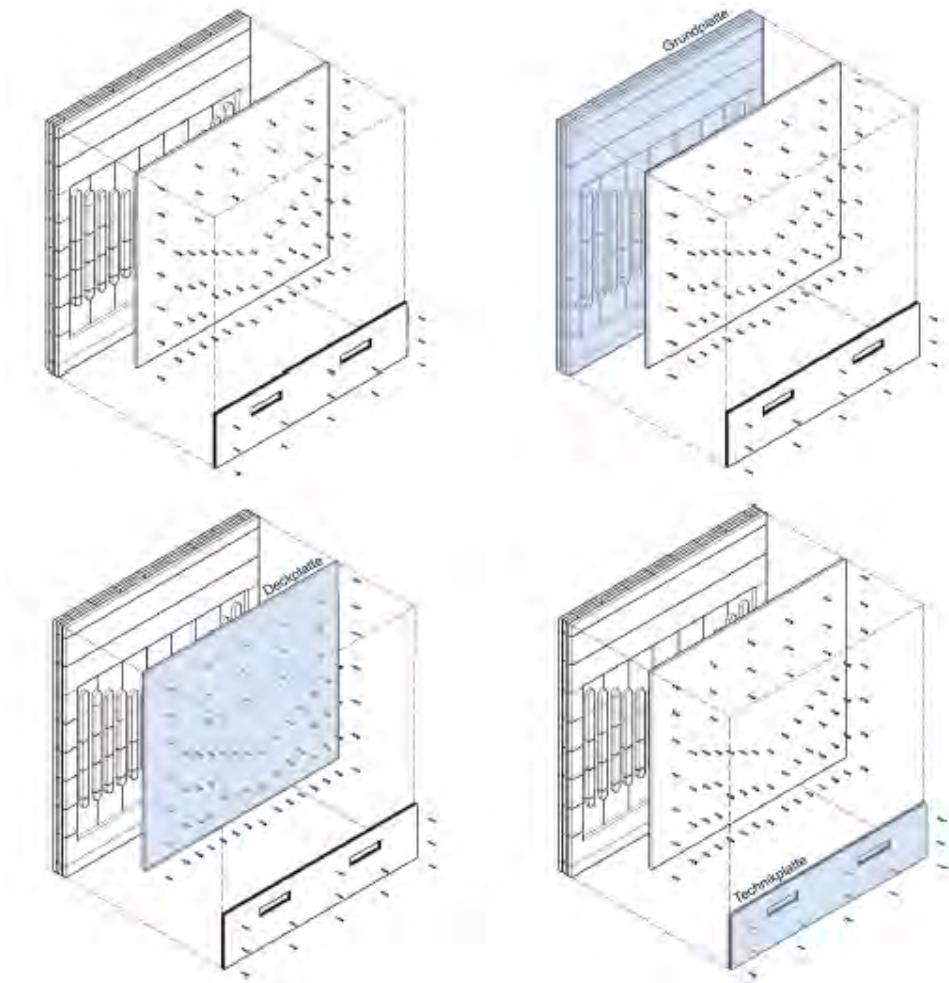
Der Aufbau des thermisch aktivierten Massivholzbauteils ist der Explosionszeichnung in Abbildung 272 zu entnehmen. Dieser bestand aus einer Grundplatte, einer Brettsperholzplatte mit eingefrästen Lüftungskanälen, einer Deckplatte sowie einer Technikplatte aus einer Dreischichtplatte. Bei der Deckplatte wurden zwei verschiedene Materialien miteinander verglichen, eine Gipsplatte und eine Dreischichtplatte.

Für die Herstellung der Grundplatte diente als Referenz u.a. die EPD der Firma Binderholz (Umwelt-Produktdeklaration. binderholz Brettsperholz BBS - binderholz X-LAM BBS - binderholz Cross Laminated Timber CLT BBS, 2019). Für die Ermittlung der energetischen Aufwendung für den Zuschnitt der Technikplatte, wurde die Plattenbearbeitungsmaschine PBA-Industry der Firma Hans Hundegger AG (Hans Hundegger AG) herangezogen.

Für die Herstellung Montage der Dreischichtdeckplatte wurde sich an der Technikplatte orientiert. Bei der Gipsplatte diente die EPD des Herstellers Saint-Gobain Rigips (Saint-Gobain Rigips, 2021)(Saint-Gobain Rigips GmbH, 2021)(Saint-Gobain Rigips GmbH, 2021)(Saint-Gobain Rigips GmbH, 2021)(Saint-Gobain Rigips GmbH,

2021)(Saint-Gobain Rigips GmbH, 2021)(Saint-Gobain Rigips GmbH, 2021)(Saint-Gobain Rigips GmbH, 2021) als Referenz.

Abbildung 272 Explosionszeichnung TAM (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.60)

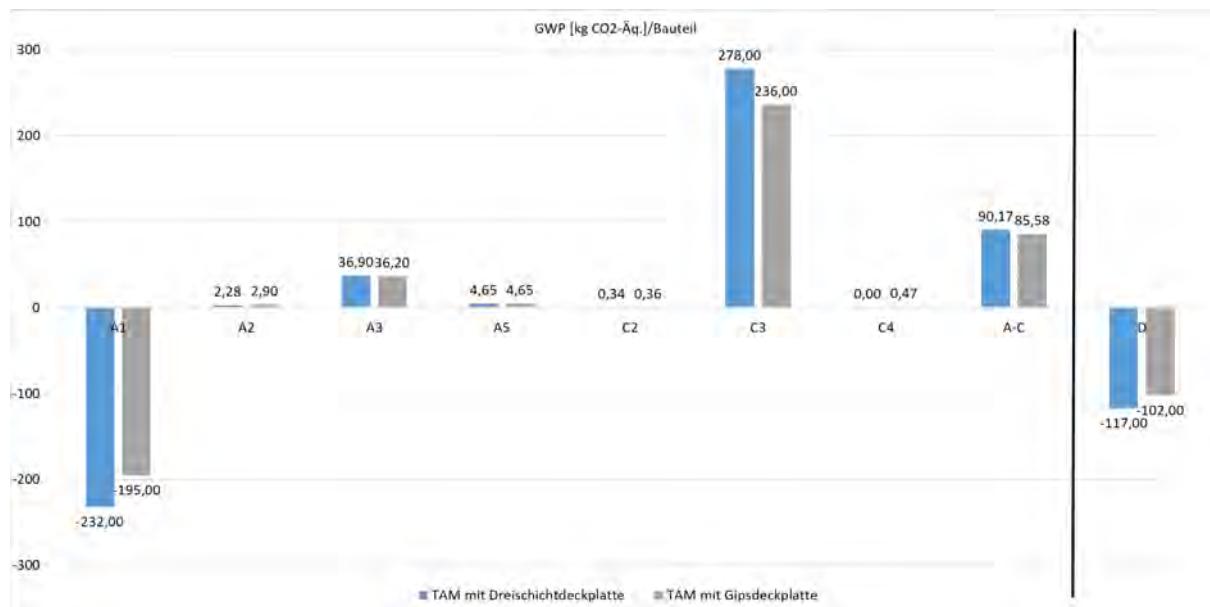


Wirkungsabschätzung

Im Folgenden wurden nach Norm *DIN EN 15804:2020-03* für EPD verpflichtenden Wirkungsindikatoren miteinander verglichen: gesamte Primärenergie erneuerbar (PERT), gesamte Primärenergie nicht erneuerbar (PENRT), Treibhauspotenzial (GWP), Eutrophierungspotenzial, in das Süßwasser gelangende Nährstoffanteile (EP-Süßwasser), Versauerungspotenzial (AP), troposphärisches Ozonbildungspotenzial (POCP) hinsichtlich Herstellung (A1-A3), Bauteilmontage (A5) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C2-C4) sowie Gutschrift und Belastungen (D) außerhalb der Lebenszyklusphasen.

Treibhauspotential (GWP)

Abbildung 273 Treibhauspotential TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (Darstellung nach Böhm, 2021)



Beim Vergleich des Treibhauspotentials (Abbildung 273) erzielte die TAM Dreischichtdeckplatte in den Modulen A1, A3 und C3 einen höheren Wert als die TAM Gipsdeckplatte und überstieg Letztere im gesamten Lebenszyklus (Modul A-C) um 5,4%.

In Modul A3, der Bauteilherstellung, wurden durch das Fräsen der Luftkanäle anfallenden Holzspäne sowie der Verschnitt der Technikplatte entsorgt. Der restliche Unterschied zwischen den beiden Varianten ist auf das Zuschneiden der Deckplatte zurückzuführen. Diese erfolgte bei der Gipsplatte händisch, bei der Dreischichtplatte maschinell, wodurch der höhere GWP-Wert entstanden ist.

Modul A5 konnte der Entsorgung der zum Transport benötigten Folie zugeschrieben werden, weshalb der GWP-Wert bei beiden Deckplattenvarianten gleich groß ist. Um herauszufinden, welche Bestandteile der TAM-Varianten einen großen Einfluss auf das Treibhauspotential hatten, wurde das GWP des Moduls A1, der Rohstoffversorgung untersucht (Tabelle 19 und Tabelle 20).

Tabelle 19: GWP Modul A1 TAM 2,9m Dreischichtdeckplatte (Darstellung nach Böhm, 2021)

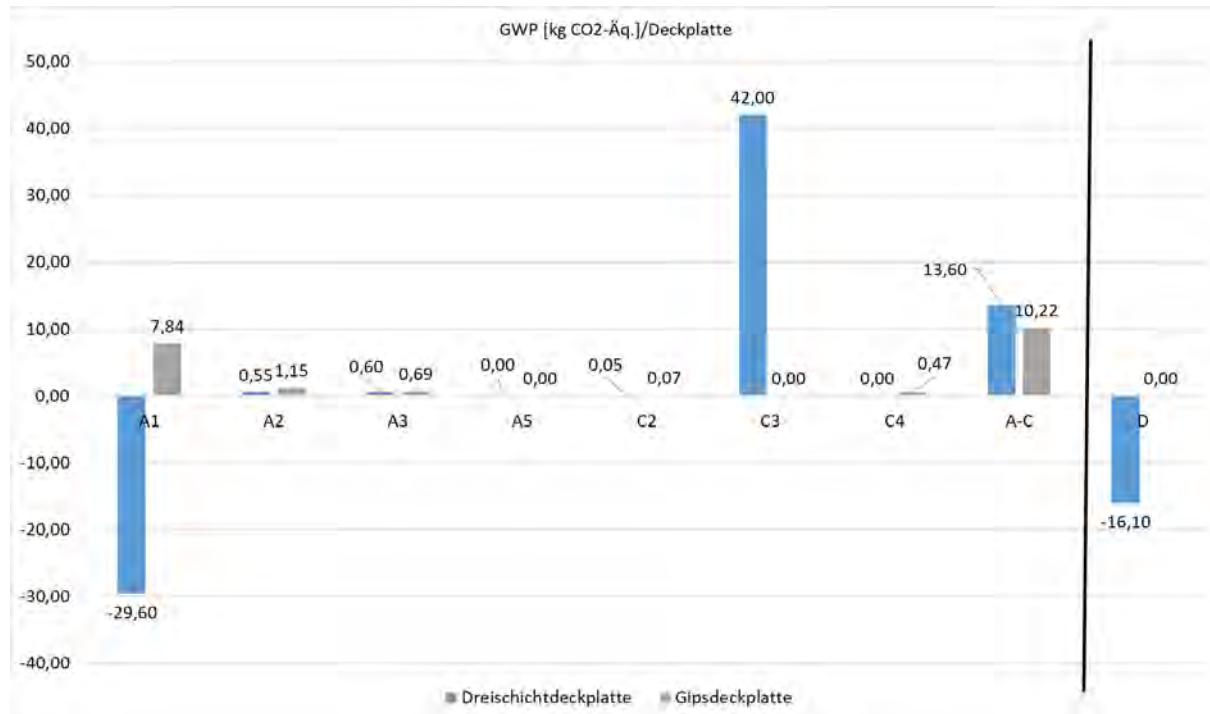
| TAM 2,9m Dreischichtdeckplatte | | | |
|---|---------------------|--------------------|-----|
| Gesamt: -232 [kg CO2-Äq.] | GWP [kg CO2-Äq.] | relativer Einfluss | [%] |
| Prozess | | | |
| Fichtenholz | -2,05E+02 | 81,7% | |
| Dreischichtplatte (Deckplatte) | -3,31E+01 | 13,2% | |
| Dreischichtplatte (Technikplatte) | -3,82E+00 | 1,5% | |
| Stahl 316 | 1,76E+00 | 0,7% | |
| Polyisocyanat | 4,57E+00 | 1,8% | |
| Sonstiges | 3,17E+00 | 1,3% | |

Tabelle 20 GWP Modul A1 TAM 2,9m Gipsdeckplatte (Darstellung nach Böhm, 2021)

| TAM 2,9m Gipsdeckplatte | | | |
|--------------------------------------|---------------------|--------------------|-----|
| Gesamt: -195[kg CO2-Äq.] | GWP [kg CO2-Äq.] | relativer Einfluss | [%] |
| Prozess | | | |
| Fichtenholz | -2,05E+02 | 91,9% | |
| Dreischichtplatte (Technikplatte) | -3,82E+00 | 2,0% | |
| Stahlschrauben galvanisiert | 9,67E-01 | 0,5% | |
| Polyisocyanat | 4,57E+00 | 2,3% | |
| Gipsplatte | 6,79E+00 | 3,5% | |
| Sonstiges | 1,43E+00 | 0,7% | |

Bei beiden Varianten wurden die Materialien, die den größten Einfluss auf das Treibhauspotential hatten, farblich hervorgehoben. Diesen waren die Grund-, Technik- und Deckplatte. Da sich sowohl die TAM Gips- als auch die TAM-Dreischichtdeckplatte hinsichtlich ihrer Deckplatte größtenteils unterschieden, wird im Folgenden näher auf den GWP -Wert dieser eingegangen. (Abbildung 274)

Abbildung 274 Treibhauspotenzial Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D, nur Deckschichtplatten (Darstellung nach Böhm, 2021)

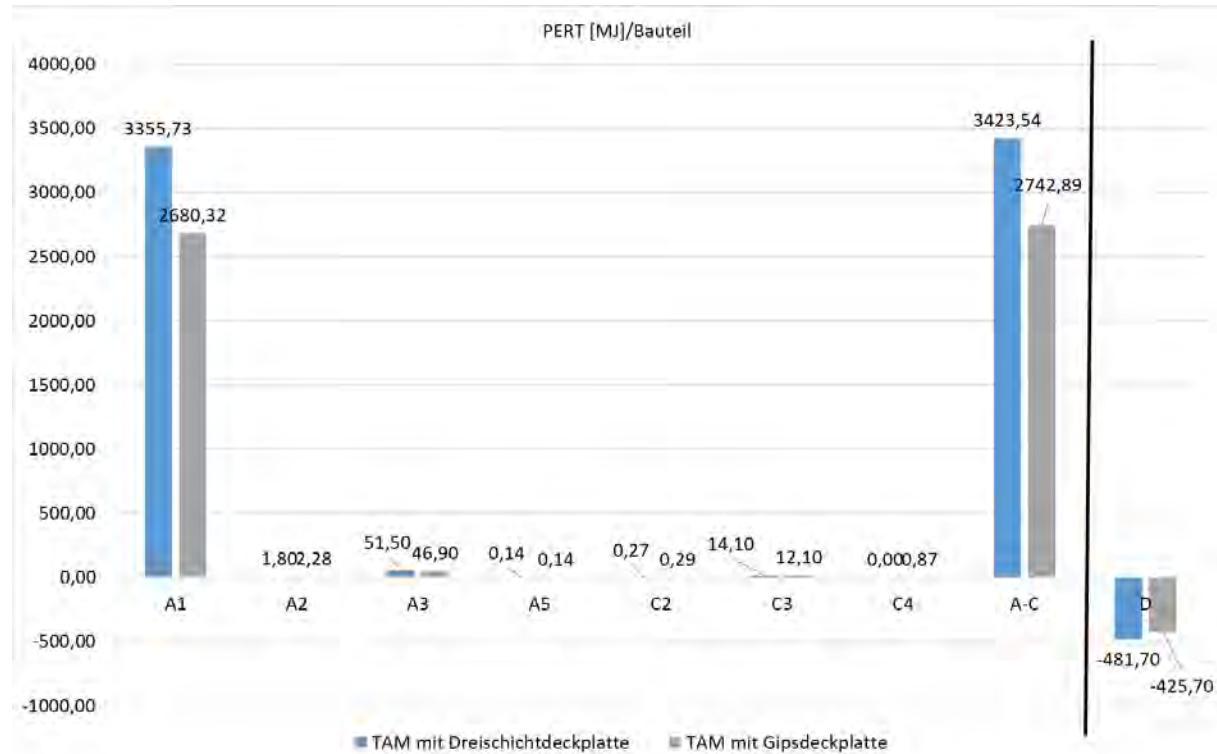


Der negative GWP-Wert der Dreischichtdeckplatte im Modul A1 war auf die CO₂-Bindung beim Wachstum des Holzes zurückzuführen. Auf Grund von unterschiedlichem Gewicht und der Annahme verschiedener Transportdistanzen überstieg im Modul A2 (Transport) das Treibhauspotential der Gipsdeckplatte, die das der Dreischichtdeckplatte um mehr als das doppelte. Die Transportdistanzen waren bei der Dreischichtdeckplatte (23,01 kg) nach (Diederichs & Rüter, 2012) im Mittel 396 km. Bei der Gipsplatte (32,5 kg) wurden die mittleren Transportentfernungen der Produktionsstätte der Firma Rigips (Saint-Gobain Rigips GmbH, 2021) mit 585 km angenommen.

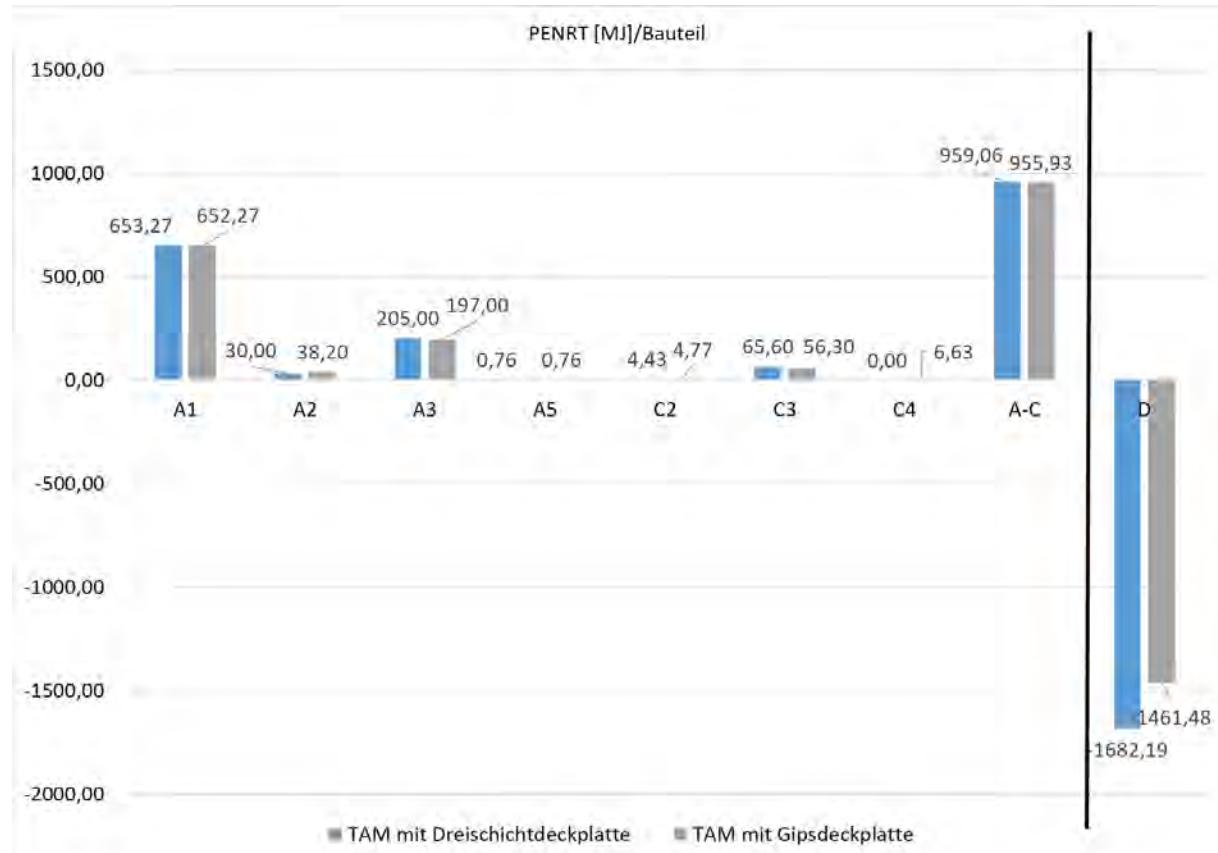
In Modul C2, dem Transport zum Recyclinghof, überstieg der GWP- Wert der Dreischichtdeckplatte, den der Gipsplatte um 5,9 %. Der Unterschied wurde auf das höhere Gewicht der Gipsplatte zurückgeführt. Die Transportentfernungen zum Recyclinghof wurden bei beiden Platten mit 20 km angenommen. In Modul C3 fand die Abfallbehandlung statt, wobei die Dreischichtdeckplatte thermisch verwertet, Gipsdeckplatte in Modul C4 deponiert wurde.

Insgesamt erzielte die Dreischichtdeckplatte einen um 33,1 % höheren GWP-Wert (Modul A-C), als die Gipsdeckplatte. Der Wert war dem erhöhten Anteil an GWP bei der Herstellung und Abfallbehandlung der Deckschichtplatte geschuldet (Modul A1, A3 und C3). CO₂ wurde bei der Rohstoffbereitstellung (Modul A1) im negativen Wertebereich gespeichert und wurde auf Grund der Bindung des biogenen Kohlenstoffes in Modul C3 wieder ausgewiesen. Zusätzlich kam das Treibhauspotentials aus Herstellung und Abfallbehandlung der Deckschichtplatte hinzu. Die Gipsplatte wurde in Modul C4 deponiert.

Die Werteverhältnisse machten sich auch in den Primärenergien erneuerbar und nicht erneuerbar bemerkbar (Abbildung 275 - Abbildung 276):

Gesamteinsatz erneuerbarer Primärenergie (PERT)**Abbildung 275 Gesamteinsatz erneuerbarer Primärenergie (energetische + stoffliche Nutzung) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (eigene Darstellung)**

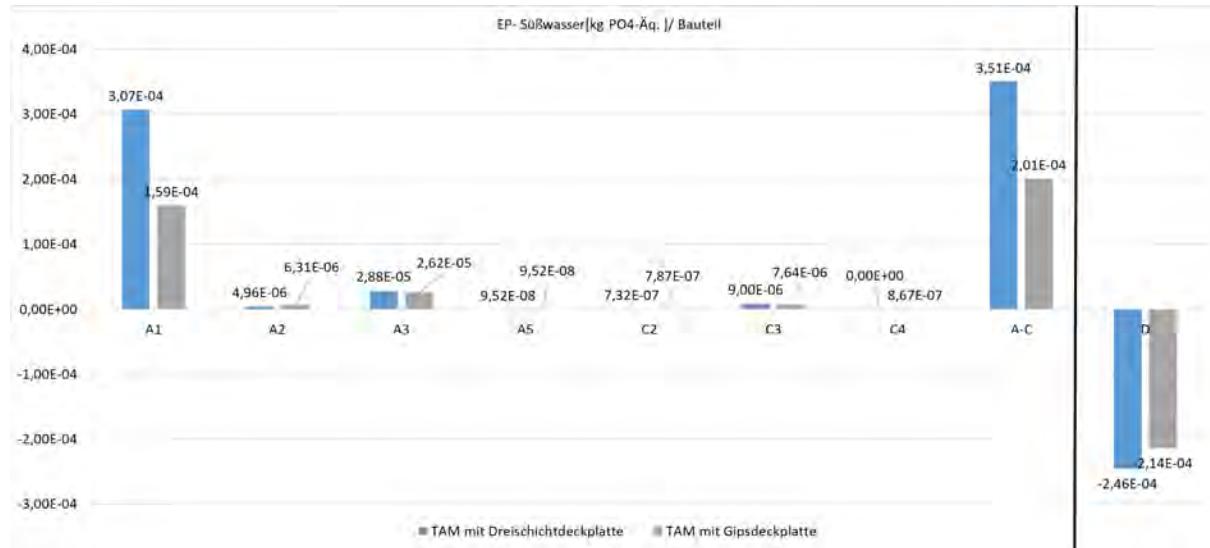
Der Großteil an erneuerbaren Primärenergien war der Rohstoffbereitstellung in A1, der in Holz gespeicherten erneuerbaren Energien, zuzuschreiben. Ein kleiner Anteil wurde bei der Entsorgung der Holzspäne in Phase A3 vorgefunden. Im Bereich der erneuerbaren Energien gesamt überstieg die Dreischichtdeckplatte (A-C) die Werte der Gipsdeckplatte um 24,8 %.

Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (PENRT)**Abbildung 276 Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (energetische + stoffliche Nutzung) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (eigene Darstellung)**

Der Großteil an nicht erneuerbaren Primärenergien wurde in der Rohstoffbereitstellung A1 ausgewiesen. Im Bereich der nicht erneuerbaren Energien gesamt überstieg die Dreischichtdeckplatte (A-C) die Werte der Gipsdeckplatte um 0,3 %.

Eutrophierungspotenzial, Süßwasser (EP-Süßwasser)

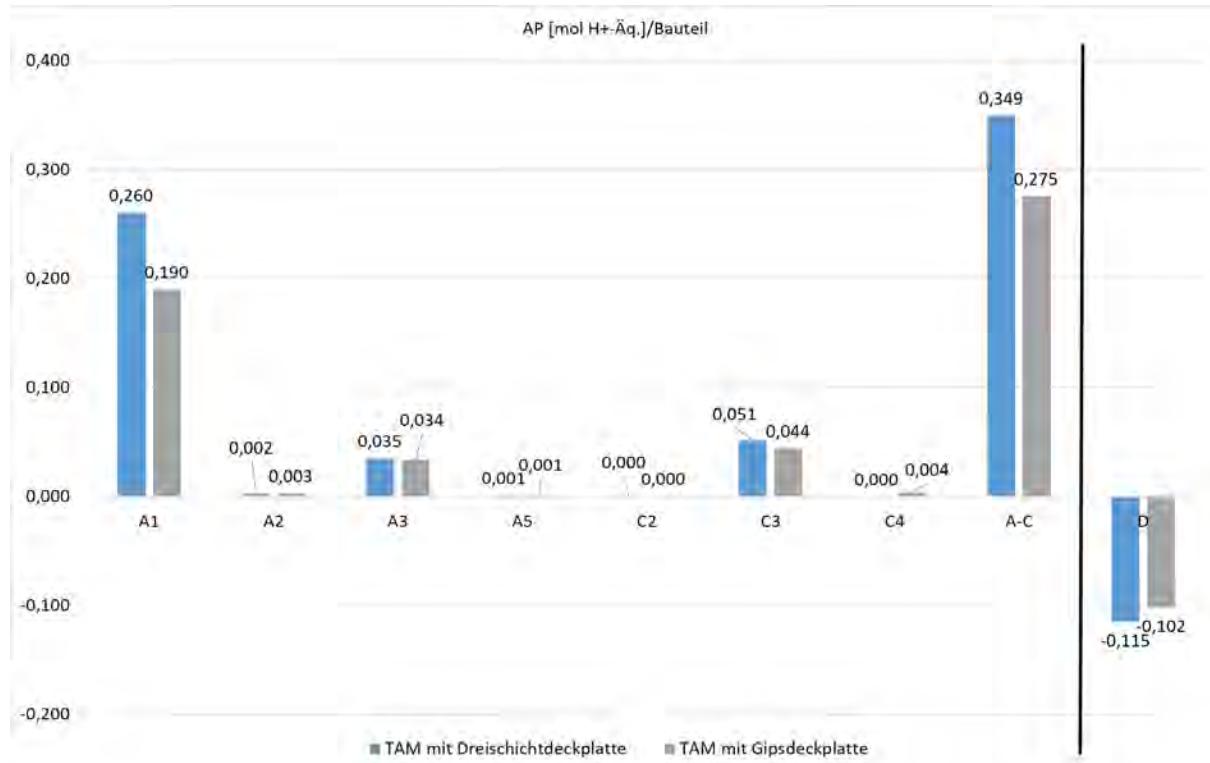
Abbildung 277 Eutrophierungspotenzial, in das Süßwasser gelangende Nährstoffanteile (EP-Süßwasser) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (Darstellung nach Böhm, 2021)



Im Bereich des Eutrophierungspotentials im ersetzen Süßwasser überstiegen die Werte der Dreischichtdeckplattenviante die der Gipsvariante um 74 %. Das Eutrophierungspotentials gibt die Überdüngung des Süßwassers an. Da die Dreischichtvariante zu einem größeren Anteil aus Holz bestand, war dieser Wirkungsindikator für diese Variante höher. Diese machte sich auch im Modul A3 bei der thermischen Verwertung der Holzspäne bemerkbar. Die Unterschiede in A3 sind auf die Verarbeitung der Platten, wie auch schon bei den anderen Wirkungskategorien und dem dafür benötigten Strom zurückzuführen. Das Versauerungspotential der Dreischichtdeckplatte überstieg den Wert der Gipsplatte um 9,9 %. Dies ist auf das natürliche Wachstum des Holzes und der damit verbundenen Überdüngung der Böden zurückzuführen.

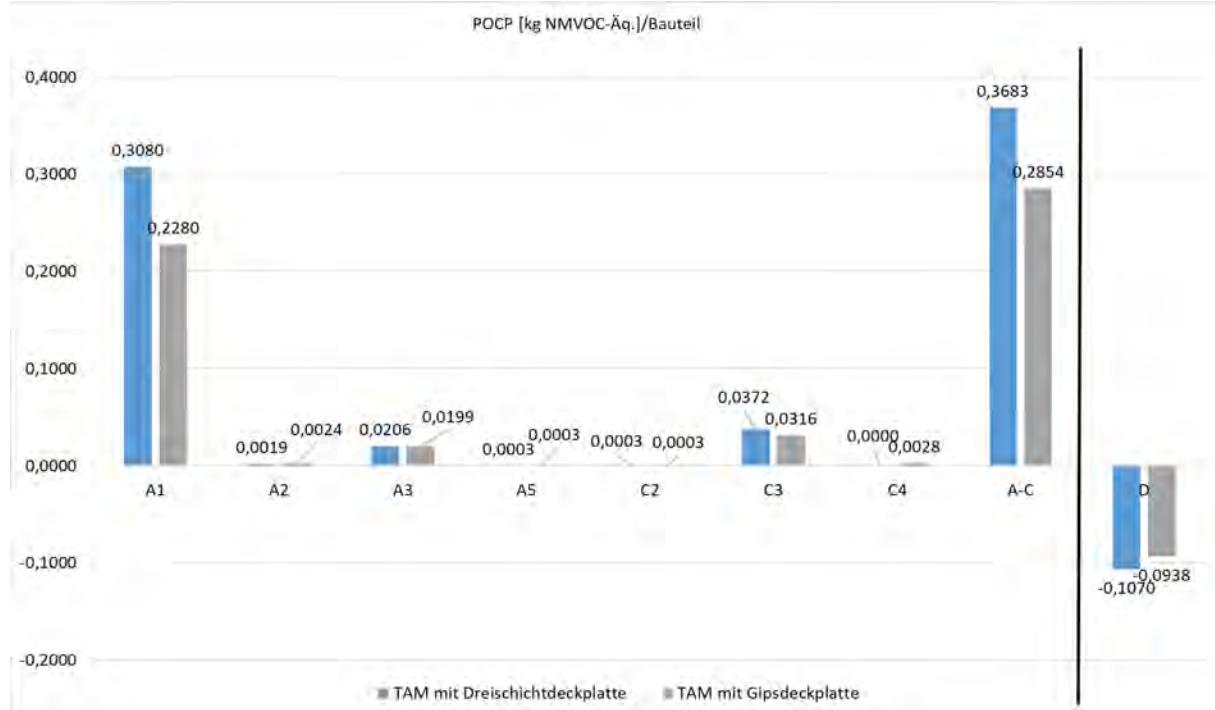
Versauerungspotenzial, (AP)

Abbildung 278 Versauerungspotenzial, (AP, en: Acidification Potential), TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (Darstellung nach Böhm, 2021)



Das Versauerungspotenzial gibt die Versauerung der Böden an. Diese wird durch den sog. „sauenen Regen“ verursacht, welches durch die Umwandlung von Stickoxiden sowie Schwefeldioxid in Säuren in der Luft entsteht. Stickoxiden und Schwefeldioxid werden bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle oder Öl freigesetzt (Khouli et al., 2014). In Modul A1, der Rohstoffbereitstellung verursachte die Dreischichtvariante mit einem höheren Holzanteil einen um 26,9 % höheren Wert als die Gipsvariante. Beide Deckschichtplattenvarianten unterschieden sich bei der Herstellung in Modul A3 lediglich beim Zuschnitt der Platten, wonach die Dreischichtdeckplatte elektrischen Strom benötigte. Der zu Modellierung verwendete Strommix bezog seine Energie zu 42,2 % aus der Stein- und Braunkohleindustrie. Nach dem Umweltbundesamt entsteht zum Großteil Schwefeldioxid durch die Verbrennung von Kohle (Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, 2020), weshalb die Dreischichtdeckplatte in Modul A3 einen höheren Wert aufwies.

Da in Modul C4 nur die Gipsplatte deponiert wurde, wies die Dreischichtdeckplatte hier keinen Wert aus.

Troposphärisches Ozonbildungspotenzial (POCP)**Abbildung 279 Troposphärisches Ozonbildungspotenzial (POCP, en: Photochemical Ozone Creation Potential) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (eigene Darstellung)**

Beim Ozonbildungspotenzial überstieg die Dreischichtdeckplattenvariante die Gipsvariante um 29 %. POCP ist ein Indikator für „Sommersmog“, welches durch die Reaktion von Stickoxiden oder Kohlenwasserstoffen mit Sonnenlicht entsteht. Die aggressiven Schadstoffe haben eine giftige Wirkung auf die Atemluft (Khouli et al., 2014). Wie auch beim Versauerungspotential zuvor, war das Auftreten der Stickoxide auf die Verbrennung von Kohle zurückzuführen.

Modul D

Es sei explizit darauf hingewiesen, dass Modul D sich nicht mehr in der Betrachtung der Lebenszyklusphasen befindet. Nach DIN EN 15804:2020-03 werden in Modul D die Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze angegeben. Diese können Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und/ oder Recyclingpotentiale sein. Im vorliegenden Beispiel wurde angenommen, dass die gesamte, verbaute Altholzmasse der thermischen Verwertung mit Vernachlässigung der Aufbereitungsprozesse zugeführt wurde. Dadurch wurde elektrische und thermische Energie erzeugt, die dem Modul D positiv angerechnet werden konnten. Bei dem verwendeten Datensatz der thermischen Verwertung „DE: Wood (natural) in waste incineration plant ts“ lag der Wirkungsgrad der Wasserdampferzeugung bei 82 %, der Nettowirkungsgrad der Müllverbrennungsanlage bei 38%. Der Energierückgewinnungsprozess bestand zu 28% aus elektrischer und zu 72% aus thermischer Energie.

Es wurde angenommen, dass der Verschnitt der Technikplatte und die Frässpäne der Grundplatte in der Herstellungsphase, die PE-Folie in der Montagephase und die Technik- und Deckplatte als Altholz am Ende ihres Lebenszyklus thermisch verwertet wurden. Der Stahlschrott der Verbindungsmitte wurde als Sekundärstoff dem Modul D gutgeschrieben.

Abbildung 178 und 179 sind die Gutschriften der Dreischichtdeckplatten- und Gipsdeckplattenvariante zu entnehmen.

Der Dreischichtdeckplattenvariante konnte 0,484 kg Stahl, 886,008 MJ Erdgas, sowie 105,007 kWh Strom gutgeschrieben werden. Wohingegen die Gipsdeckplattenvariante im Bereich des Rückgewinnungs- und Recyclingpotentials 0,326 kg Stahl, 766,488 MJ Erdgas und 90,984 kWh Strom aufwies. Der Unterschied war auf die Deckplatte zurückzuführen. Die Gipsvariante wurde in Modul C4 deponiert, wohingegen die Dreischichtplatte aus Modul C3 nach der Aufbereitung thermisch verwertet und Modul D gutgeschrieben wurde.

Abbildung 280 Bildschirmfoto zur Bilanzierung des Moduls D des Bauteils TAM 2,9 m Dreischichtdeckplatte in der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts (thinkstep AG, 2020), (nach Böhm, 2021)

TAM 2,9m - Dreischichtdeckplatte - Modul D

GaBi Prozess-Plan: Mass [kg]
Es werden die Namens- Basis-Prozesse angezeigt.

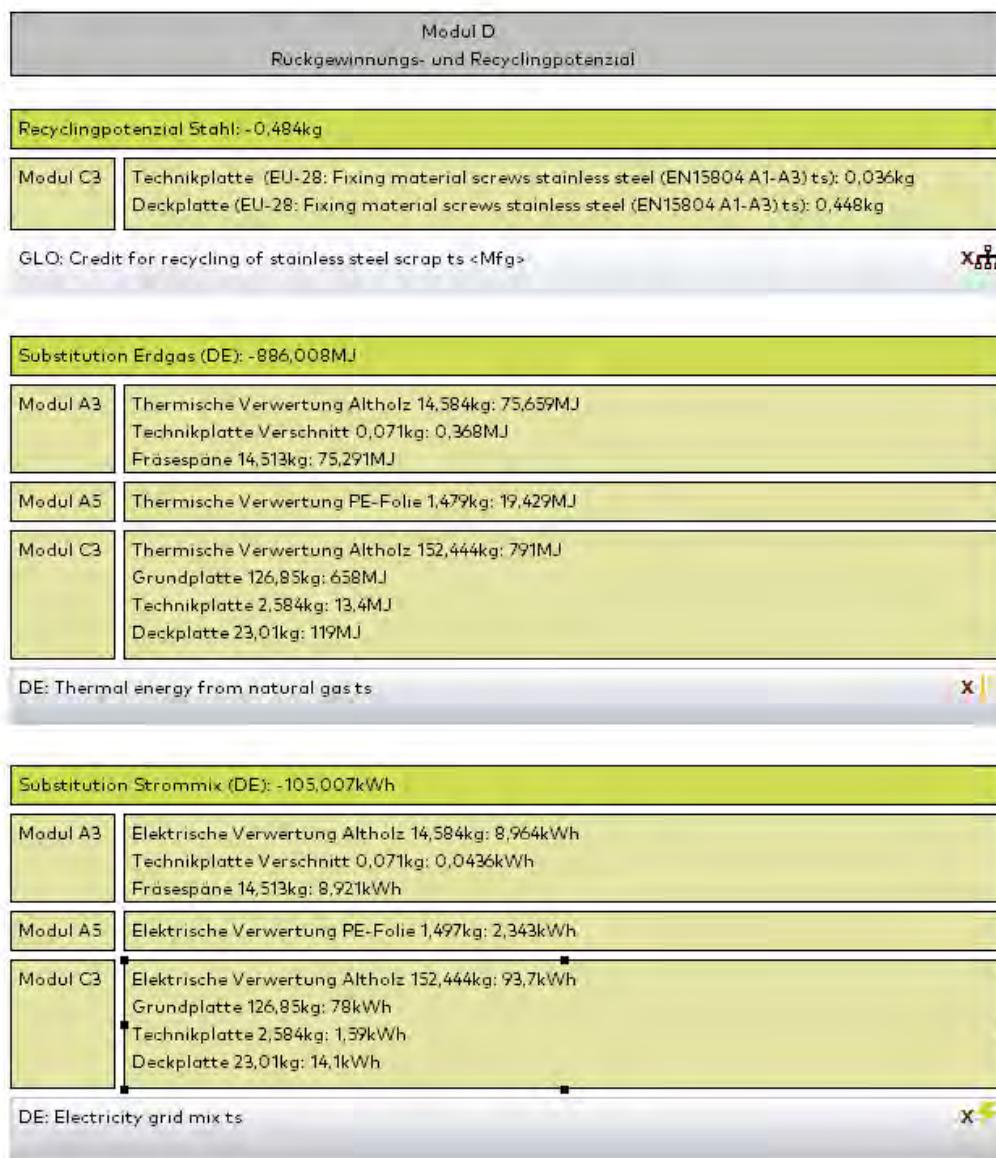


Abbildung 281 Bildschirmfoto zur Bilanzierung des Moduls D des Bauteils TAM 2,9 m Gipsdeckplatte in der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts (thinkstep AG, 2020), (nach Böhm, 2021)

TAM 2,9m - Gipsdeckplatte - Modul D

GaBi Prozess-Plan: Mass [kg]
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.



Fazit

Bei Vergleich des TAM- Bauteils hinsichtlich verschiedener Wirkungsindikatoren hat das TAM-Bauteil mit der Gipsdeckplatte in allen Kategorien besser abgeschnitten als das TAM-Bauteil mit der Dreischichtdeckplatte.

Wobei anzumerken ist, dass eine Deponierung von Gipsabfall (Modul C4) einen großen Eingriff in die Umwelt darstellt. Eine positive Anrechnung des Holzes fand in Modul D als thermische Verwertung statt.

Intensiver Austausch mit den beteiligten Unternehmen zu produktions- und montagespezifischen Anforderungen

Nina Flexeder, Nils Schumacher, Christian Hepf

Binderholz Bausysteme GmbH

Fachlicher Austausch bei Kick-Off Besprechung sowie weiteren Abstimmungsterminen per Telefon.

18.04.2019: Fahrt nach Kösching mit zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern und einer studentischen Hilfskraft. Instandsetzung von Bauteilen und Messtechnik in den Forschungskubus auf dem Parkplatz des Werksgeländes.

24.05.2019: Fahrt nach Kösching mit einem wissenschaftlichen Mitarbeiter und einer studentischen Hilfskraft. Instandsetzung von bestehender Messtechnik in den Forschungskubus auf dem Parkplatz des Werksgeländes.

29.01.2020: Fahrt zum Brettsperrholzwerk der Binderholz Bausysteme GmbH in Unternberg, Österreich mit acht Studierenden und fünf wissenschaftlichen Mitarbeitern. Anschließend Fahrt zum Bürogebäude TimberBrain, dessen Außenwand ausschließlich aus Brettsperrholz (ohne zusätzliche Dämmung und Fassade) besteht. An beiden Standorten wurden jeweils Expertendiskussionen mit dem Leiter der Brettsperrholzproduktion sowie dem Leiter der Planungsabteilung geführt.

Lieferung von Brettsperrholzproben zum Bau der Fassadentestelemente BSP_01 – 03.

07.07.2020: Fahrt nach Kösching mit zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern und einer Studentischen Hilfskraft. Einbau von Messtechnik in den Forschungskubus auf dem Parkplatz des Werksgeländes. Anschließende Diskussion mit dem Team der Forschungs- und Entwicklungsabteilung zum Thema „Produktionstechnische Anforderungen bei der Herstellung eines thermisch aktivierten Massivholzelements“.

06.08.2020: Fahrt nach Kösching mit einem wissenschaftlichen Mitarbeiter und einer Studentischen Hilfskraft. Einbau von Messtechnik in den Forschungskubus auf dem Parkplatz des Werksgeländes.

Fachlicher Austausch via Telefon und Telefonkonferenz zu Möglichkeiten der Produktion eines thermisch aktivierten Brettsperrholzes mit den vorhanden produktionstechnischen Anlagen der Binderholz Bausysteme GmbH.

Einrichtung und Instandhaltung des Fernzugriffs auf die Mess- und Regelungstechnik via Remoteverbindung durch Unterstützung aus der IT-Abteilung der Firma Binderholz Bausysteme GmbH.

Unterstützung der Master's Thesis „Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte und Temperatur auf den daran gekoppelten Wärmestrom in Massivholzbauteilen“ mit Materialproben.

Steico SE

Fachlicher Austausch bei Kick-Off Besprechung sowie weiteren Abstimmungsterminen per Telefon.

Lieferung zahlreicher Baustoffe für den Umbau der Testkuben auf der Solarstation sowie den Bau der Fassadentestelemente und Mithilfe beim Bau der Rahmen für die Fassadentestelemente.

Mithilfe der Steico SE beim fachgerechten Aufbringen und Verputzen der Holzfaserdämmplatten auf die geplanten Wandaufbauten. Anschließend wurden die Wandaufbauten in die Kuben auf der Solarstation auf dem Hauptgebäude der TUM eingebbracht und ihr hygrothermisches Verhalten unter realen klimatischen Einflüssen untersucht.

Unterstützung der Master's Thesis „Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygroskopisch aktiven Baustoffen“ mit Materialproben.

Fachgruppe Hintermauerziegel des Bundesverbands der Deutschen Ziegelindustrie e.V.

Fachlicher Austausch zu Beginn des Forschungsprojekts

Bauunternehmung Hermann Gärtner

Mithilfe der Bauunternehmung Hermann Gärtner beim fachgerechten Aufbringen und Verputzen der LehmBauplatten und des Lehmbauputzes auf die geplanten Wandelemente. Anschließend wurden die Wandaufbauten in die Kuben auf der Solarstation auf dem Hauptgebäude der TUM eingebracht und ihr hygrothermisches Verhalten unter realen klimatischen Einflüssen untersucht.

Unterstützung der Master's Thesis „Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygroskopisch aktiven Baustoffen“ mit Materialproben.

LEHM TON ERDE Baukunst GmbH

Fachlicher Austausch bei Kick-Off Besprechung sowie weiteren Abstimmungsterminen per Telefon/Videokonferenz.

Unterstützung der Master's Thesis „Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygroskopisch aktiven Baustoffen“ mit Materialproben.

Fachliche Unterstützung bei der Betreuung einer Master's Thesis zum Thema: „Das Potential der hygrothermischen Masse zur Reduzierung der Wandstärke einer mehrschaligen Außenwand aus Stampf- und Leichtlehm.“

Roswag Architekten

Fachlicher Austausch bei Kick-Off Besprechung sowie weiteren Abstimmungsterminen per Telefon/Videokonferenz.

Kapitel VIII – Dokumentation und Verbreitung der Ergebnisse

Publizieren von Artikel und Veröffentlichungen, Vorstellung auf Kongressen und Kolloquien

Veröffentlichungen und Präsentationen während der Projektlaufzeit

Nina Flexeder, Nils Schumacher

| | |
|------------------|--|
| 25.04.2019 | Kick-Off Veranstaltung PhyTAB, Technische Universität München |
| 04. – 05.06.2019 | Teilnahme an den 12. Projektetagen der Bauforschung von Zukunft Bau mit Präsentation und anschließender Fachdiskussion |
| 02.03.2020 | PhyTAB: Zwischenbericht |
| 29.06.2020 | Teilnahme an den 13. Projektetagen der Bauforschung von Zukunft Bau Vorstellung des Projekts in einem Online-Video (vimeo.com/510352077) vorab und Präsentation der Zwischenergebnisse in der Onlinekonferenz mit anschließender Fachdiskussion |
| 2022 | PhyTAB: Publikation des Endberichts |

Verbreitung der Ergebnisse in Publikationen und Konferenzbeiträgen

Nina Flexeder

Publikation der Forschungsdaten über den Medienserver der Technischen Universität München

| | |
|------|---|
| 2022 | Publikation der im Rahmen von Kapitel IV entwickelten Sensorgeometrie zur primären Oberflächentemperaturmessung. Titel: |
|------|---|

Flexeder, N. (2022). *Geometry data of a sensor mount for surface temperature measurements*. Technische Universität München.
doi: 10.14459/2022mp1651103.

| | |
|------|---|
| 2022 | Publikation der im Rahmen von Kapitel IV entwickelten Sensorgeometrie zur sekundären Feuchtemessung im Bauteilquerschnitt. Titel: |
|------|---|

Flexeder, N. (2022). *Geometry data of a sensor envelope for the hygrometric method to determine material moisture content*. Technische Universität München.
doi: 10.14459/2022mp1651104.

**Tagungsbeitrag beim Doktorandenkolloquium Holzbau „Forschung und Praxis“, Universität Stuttgart,
Institut für Konstruktion und Entwurf**

- 24.10.2021 Einreichung des Abstracts
 Das Thema wurde von der Jury für die Einreichung eines Beitrags (Full Paper) im Tagungsbuch sowie für einen Vortrag empfohlen.
- 17.01.2022 Einreichung des Full Papers, Titel:
 Flexeder, N. (2022, 10.03.2022). *Institutionäre Holzfeuchtebestimmung – Verschiedene Anwendungsszenarien mit Bezug zum thermischen Bauteilverhalten*. Doktorandenkolloquium Holzbau „Forschung und Praxis“, Stuttgart.
- 10.03.2022 Vortrag im Zeitslot „Bauphysik + Brandschutz“ (N. Flexeder)

Konferenzbeitrag auf der Fachtagung BauSIM 2022, Weimar

Organisation: Bauhaus Universität Weimar; IBPSA-Germany and Austria - International Building Performance Simulation Association German Speaking Chapter

Messung von Sorptionswärme in Labor- und Feldversuchen im Vergleich mit hygrothermischen Simulationen
 Stichworte: Sorptionsenthalpie, Hygrothermik, Messtechnik, Experiment, Materialoberfläche

www.bausim2022.de

- 15.11.2021 Einreichung des Abstracts
 Zur Sicherstellung der wissenschaftlichen Qualität der Beiträge wurden die Abstracts im Peer-Review-Verfahren (double blind) begutachtet. Das Thema wurde von der Jury für die Einreichung eines Full Papers sowie eines Vortrags empfohlen.
- 15.03.2022 Einreichung des Full Papers zum nochmaligen Reer-Review (double blind),
 Titel:
 Flexeder, N.; Nouman, A.; Hepf, C. (2022). *Measurement of sorption heat in laboratory and field tests in comparison with hygrothermal simulations*. In: *Proceedings of the Ibpsa BauSIM 2022*.
- 31.05.2022 Finale Einreichung des überarbeiteten Full Papers (sechs Seiten, englisch)
20. – 22.09.2022 Teilnahme an der Konferenz in Weimar (Präsenz geplant)
- 21.09.2022 geplante Präsentation im Konferenzvortrag im Zeitslot C „Innovative Messmethoden - Validierung und Anwendung II“ (N. Flexeder)

Vortrag bei der Fachtagung „PhD Colloquium on Timber Engineering Research“, ETH Zürich, Institute for Structural Engineering

- 29.08.2022 Vortrag zum Thema „Transient Wood Moisture Analysis“ im 1. Zeitslot (N. Flexeder)

Konferenzbeitrag auf der wissenschaftlichen Konferenz SHATIS 2022, Prag, Tschechien

International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures

Organisation: The Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Czech Academy of Sciences (ITAM);
University Centre for Energy Efficient Buildings CTU in Prague (UCEEB)

Vergleich zweier Methoden zum Holzfeuchtemonitoring in Brettsperrholzaußewänden

Stichworte: Holzfeuchte, Monitoring, hygrometrische Methode, Feldexperimente, Brettsperrholz

<https://shatis22.itam.cas.cz>

| | |
|------------|--|
| 15.04.2022 | Einreichung des Abstracts Zur Sicherstellung der wissenschaftlichen Qualität der Beiträge wurden die Abstracts im Peer-Review-Verfahren (double blind) begutachtet. Das Thema wurde von der Jury für die Einreichung eines Full Papers empfohlen. |
| 31.05.2022 | Einreichung des Full Papers zum nochmaligen Reer-Review (double blind), Titel: <i>Flexeder, N.; Schenk, M.; Aondio, A. (2022). Moisture Monitoring Techniques for the Protection of Timber Structures. In: Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures SHATIS 2022.</i> |
| 13.08.2022 | Finale Einreichung des überarbeiteten Full Papers (sechs Seiten, englisch) |

Kapitel IX – Ausblick

Christian Hepf, Nils Schumacher, Nina Flexeder

Für die messtechnischen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes PhyTAB wurde ein umfangreiches Monitoringkonzept erarbeitet, dessen einzelne Bestandteile auch für nachfolgende Forschungsprojekte erfolgreich adaptiert werden konnten und nun weiter verwendet werden. Um die Potentiale der initial in diesem Projekt entwickelten Messkomponenten weiter zu verfolgen, wird eine gezielte Weiterentwicklung für das in-situ Monitoring von Feuchtegradienten in Bauteilen, insbesondere Holzfeuchte, empfohlen.

Durch die hygrothermischen Simulationen und Messungen im Kubus konnten die Potentiale einer hygrothermischen Konditionierung im sommerlichen Wärmeschutz dargestellt werden. Ob eine Temperaturverringerung von 1 K auch in physischen Räumen und Gebäuden erreicht werden kann, soll in zukünftigen Forschungsprojekten untersucht werden. Da sowohl bei dem Holzrahmen- als auch Holzmassivbau das Bauteil mit Lehmoberfläche die größten Potentiale aufzeigte, sollte der Fokus auf Bauteilen mit Lehminnenoberfläche liegen.

Dabei sollten zusätzlich folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Hygrische Konditionierung in das Bauteil verschieben, da Befeuchtung nur an Bauteiloberfläche benötigt wird und nicht im gesamten Raum → Weiterentwicklung von TAM zu hygrothermisch aktiviertem Bauteil (HTAM)
- Konditionierung, soweit möglich mit Passivmaßnahmen
 - ➔ Befeuchtung in HTAM durch Zerstäuber
 - ➔ Keine energieintensive mechanische Entfeuchtung, nur raumseitige Verdunstung entlang natürlicher Gradienten der relativen Luftfeuchte
- Die Randbedingungen müssen insbesondere in Hinblick auf die Vermeidung zu hoher Holzfeuchten bei der Konditionierung beachtet und das Konzept entsprechend angepasst werden.
- Das Verhältnis von Raumvolumen und Bauteilgröße sollte optimiert werden.
- Interne Lasten sollen bereits bei der Planung von Feldexperimenten aus den Kuben entfernt werden und extern angebracht werden, um potentielle Störeffekte zu minimieren.
- Zusätzlich sollte die gebäudetechnische Anbindung an das modifizierte TAM überdacht werden und bestenfalls ebenso extern installiert werden, um weitere Störeffekte zu minimieren und das volle Potential des TAM analysieren zu können.

Unter Beachtung der MHolzBauRL (Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise - MHolzBauRL - Fassung Oktober 2020) ist es möglich, dass das thermisch aktivierte Massivholz in baulichen Anlagen eingesetzt werden kann. In weiteren Untersuchungen gilt es herauszufinden, wie groß der Anteil an Holzoberflächen in einem Raum, bezogen auf die jeweilige brandschutztechnische Voraussetzung, sein darf.

Um das thermisch aktivierte Massivholz anlagentechnisch an die Versorgungstechnik zu integrieren, ist aktuell noch ein großer Planungsaufwand nötig, da die Größe der verwendeten Anlagentechnik dies erfordert. Zukünftig könnte hier platzsparendere Technik verwendet werden, welche es noch zu entwickeln gilt. Diese Technik könnte in einem herkömmlichen Bodenaufbau von ca. 100 mm Höhe integriert werden.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Flexeder, Nina (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)
Schumacher, Nils (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)
Hepf, Christian (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)
Nouman, Ahmad (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)
Briels, David (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)
Varga, Zsophia (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)
Kamml, Michael (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)
Paulik, Johannes (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)
Übelhör, Valentin (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Winter, Stefan (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Projektleitung)
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Auer, Thomas (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)

Projektpartner

Binderholz GmbH; Zillertalstrasse 39, A-6263 Fügen
Ansprechpartner: Christof Richter

Steico SE; Otto-Lilienthal-Ring 30, 85622 Feldkirchen
Ansprechpartner: Martin Rummel

Fachgruppe Hintermauerziegel des Bundesverbands der Deutschen Ziegelindustrie e.V.;
Reinhardtstraße 12 – 16, 10117 Berlin

Bauunternehmung Hermann Gärtner; Abraham Megerle Str.1, 83512 Wasserburg am Inn
Ansprechpartner: Max Gärtner

LEHM TON ERDE Baukunst GmbH; Quadernstraße7, A-6824 Schlins
Ansprechpartner: Martin Rauch

Roswag Architekten; Schlesische Str. 26, 10997 Berlin
Ansprechpartner: Eike Roswag-Klinge

Weitere Förderer

Firma KnieglTec

TinkerForge GmbH

VARIOTEC GmbH & Co. KG

Kraemer & Kraus Wärmetechnik GmbH

Electro Mation GmbH

Bürkert GmbH & Co. KG

MF Automation GmbH

Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann

Brüggemann Kisseler Ingenieure, 49497 Mettingen

Kurzbiographien



Nina Flexeder, M. Sc.

Nina Flexeder hat Architektur und Energieeffizientes und Nachhaltiges Bauen an der TU München und an der GaTech, Atlanta GA; USA, studiert. Vor ihrer Tätigkeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion war sie in verschiedenen Architekturbüros und im Projektmanagement in München und New Orleans tätig. Seit 2018 forscht und lehrt sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich des hygrothermischen Baustoffverhaltens, insbesondere zur Bestimmung des Holzfeuchtegehalts.



Nils Schumacher, M. Sc.

Nils Schumacher ist seit 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Nils Schumacher ist gelernter Zimmerer und hat 2015 seinen Masterabschluss im Bauingenieurwesen an der TUM absolviert. Vor seiner Tätigkeit am Lehrstuhl war Nils Schumacher vier Jahre Projektleiter in der Tragwerksplanung.



Christian Hepf, M. Sc.

Christian Hepf hat sein Masterstudium 2018 an der TUM absolviert und ist seit seinem Abschluss wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen. In dieser Zeit hat Christian Hepf bereits an mehreren Forschungsprojekten mitgearbeitet, wobei er sich hier zumeist auf dynamische Gebäudemessungen sowie auf thermodynamische Simulation fokussiert hat. Seit dem Jahr 2019 arbeitet er zudem an seiner Promotion und ist zusätzlich in der Lehre und der Organisation des Lehrstuhles tätig.



Ahmad Nouman, M. Sc.

Ahmad Nouman ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen und ist spezialisiert auf die Entwicklung und Umsetzung von Mess-, Steuer- und Regelungskonzepten. Durch seinen Hintergrund, dem Studium für Elektrotechnik und der anschließenden Spezialisierung auf Clima Design, bringt er die nötigen Fertigkeiten für die interdisziplinären Aufgabenstellungen mit.



David Briels, M. Sc.

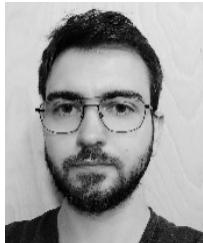
David Briels ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen. Neben dem Abschluss als B. Sc. Bauingenieur (TUM) hat David Briels den M. Sc. Energieeffizientes und nachhaltiges Bauen an der TUM absolviert. Aktuell promoviert er im Bereich Funktionsintegration in additiv gefertigte Bauteile.

**Zsophia Varga, M. Sc.**

Zsophia Varga ist seit 2019 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion tätig. Ihren Masterabschluss als Bauingenieurin hat sie 2016 an der TUM absolviert. Vor ihrer Tätigkeit am Lehrstuhl arbeitete sie als Nachhaltigkeitsberaterin und Ingenieurin.

**Michael Kamml, B. Sc.**

Michael Kamml ist seit 2019 studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Er ist gelernter Elektroniker und staatlich geprüfter Elektrotechniker. Michael Kamml hat 2018 seinen Bachelorabschluss als Umweltingenieur an der TUM absolviert und aktuell schließt er sein Masterstudium im Bereich "Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen" ab.

**Johannes Paulik, B. Sc.**

Johannes Paulik ist seit 2019 studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Johannes Paulik ist gelernter Schreiner und studiert derzeit Lehramt für berufliche Schulen in den Fächern Bautechnik, sowie Politik und Gesellschaft.

**Valentin Übelhör, B. Sc.**

Valentin Übelhör ist seit 2020 studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen. Er ist aktuell in seinem vierten Mastersemester Bauingenieurwesen an der TU München mit Fokus auf Bauphysik, Baukonstruktion und Computation in Engineering.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter (Projektleiter)

Stefan Winter ist seit 2003 Ordinarius für Holzbau und Baukonstruktion an der TU München. Stefan Winter ist Prüfingenieur für Baustatik für die Fachrichtung Holzbau in Bayern. Seit 2012 ist Stefan Winter Vorsitzender des Normenausschusses Bau Fachbereich 04 »Holzbau«, Mitglied im Beirat des Normenausschusses Bau im DIN sowie seit 2014 Vorsitzender des europäischen Normenausschusses CEN TC 250/SC 5 Eurocode 5 – Holzbau – Bemessung und Ausführung.



Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Thomas Auer ist seit 2014 Ordinarius für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der TU München. Lehr- und Forschungstätigkeit im Bereich der ganzheitlichen und robusten Gebäudeoptimierung. Fachliche Schwerpunkte sind dabei ein energieoptimiertes und klimagerechtes Bauen, Aufenthaltsqualität sowie ganzheitliche Konzepte für Gebäude, Stadt und Raumklima.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- AHLBORN Mess-und Regelungstechnik GmbH, Dr. Birgit Seitz & Dipl. Ing. (FH) Christian Schmidt. (2020). *ALMEMO®Handbuch Für alle ALMEMO®Messgeräte und Sensoren.*
- Arnold, M., Dietsch, P. & Winter, S. (2021). Mechanical Properties of Innovative Multifunctional Cross Laminated Timber. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 20/21*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.14459/2021md1608914>
- Auer, T. & Nagler, F. (2017). *Edition Detail: Bd. 2. Zukunftsfähiger Schulbau: 12 Schulen im Vergleich Erste Auflage*. Hg. v. Djahanschah. S., München: DETAIL - Business Information GmbH (Edition Detail, 2).
- AVIA Semiconductor. *HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*. <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1836471/0/0/1/hx711.html>
- Binderholz GmbH und Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH (Hrsg.). *Massivholzhandbuch 2.0*. https://www.binderholz.com/fileadmin/user_upload/books/de/massivholzhandbuch_2/90/index.html (zuletzt geprüft am: 22.07.2022)
- Böswirth, L. & Bschorer, S. (2014). *Technische Strömungslehre*. Springer Verlag.
- Brüninghoff, H. & Dietsch, P. (Hrsg.). (2010). *Berichte aus dem Bauwesen. Assessment of timber structures: COST action E55 modelling of the performance of timber structures ; [is the result of a task group meeting, held in September 2009 at the Chair for Timber Structures and Building Construction, Technische Universität München]*. Shaker-Verl.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Hintergrundpapier Energieeffizienz. (2016). „Efficiency first“ – *Energieeffizienz als zentrale Säule der Energiewende: Überblick über Ausrichtung, Maßnahmen und Programme der Energieeffizienzpolitik*. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/H/hintergrundpapier-energieeffizienz.html> (zuletzt aufgerufen am: 22.07.2022)
- Burkhardt, W., Kraus, R. & Ziegler, F. J. (2006). *Projektierung von Warmwasserheizungen*. 7., überarb., erw. u. aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Collet, F. & Pretot, S. (2014). Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. *Building and Environment*, 82, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.018>
- Dupleix, A., van Nguyen, T., Vahtikari, K. & Hughes, M. (2018). The anisotropic temperature rise on wood surfaces during adsorption measured by thermal imaging. *Wood Science and Technology*, 52(1), 167–180. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0968-8>
- EastRising Technology Co., L. (2012). *ER-OLED013-1 Series OLED Display Datasheet*. https://www.buydisplay.com/download/manual/ER-OLED013-1_Series_Datasheet.pdf
- Eckermann, W. & Ziegert, C. (2006). Auswirkungen von Lehmstaubstoffen auf die Raumluftfeuchte.
- Engel, T. & Lechner, M. (2020). Baurechtskonformes Planen und Bauen mit Holz - Verwendbarkeitsnachweise und technische Regeln für den Brandfall im Holzbau. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.14459/2020MD1543153>
- Fischer, H.-M., Freymuth, H., Homann, M., Häupl, P., Jenisch, R., Richter, E. & Stohrer, M. (2008). *Lehrbuch der Bauphysik*. Vieweg+Teubner.
- Flexeder, N. (2022a). *Geometry data of a sensor envelope for the hygrometric method to determine material moisture content*. Technische Universität München. doi: 10.14459/2022mp1651104.

- Flexeder, N. (2022b). *Geometry data of a sensor mount for surface temperature measurements*. Technische Universität München. doi: 10.14459/2022mp1651103.
- FLIR Systems, I. (2016). *Radiometric Longwave Infrared (LWIR) Camera Module*.
https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/FLIR_Lepton_Data_Brief.pdf
- Fortuin, G. (2003). *Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz* [Dissertation]. Universität Hamburg, Hamburg.
- Hausladen, G. & Auer, T. (2014). *Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme - Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden*. Endbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2920).
- Glück, B. (1999). *Thermische Bauteilaktivierung Bauteilheizung und Bauteilkühlung*. Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung.
- greenTEG AG. (2018). *AMP 2100 - User Manual*. greenTEG AG.
- Grynnning, S., Goia, F., Rognvik, E. & Time, B. (2013). Possibilities for characterization of a PCM window system using large scale measurements. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(1), 56–64.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.09.003>
- Hameury, S. & Lundström, T. (2004). Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings*, 36(3), 281–292.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.003>
- Hart Keramic AG (Hrsg.). (2020). *Lemix-Datenblatt*. 95706 Schirnding.
- Hauser, G., Helm, S. & Otto, F. (1991). *Beeinflussung des hygrischen und thermischen Raumklimas durch Wand- und Deckenbekleidungen aus Holz bzw. Holzwerkstoffen*. Hg. v. Baufachinformation. Fraunhofer IRB Verlag. Kassel (Bauforschung, Band T 2428).
- Heraeus Nexensos GmbH. (2019). *M 222, Platinum Temperature Sensor according to DIN EN 60751*.
https://www.heraeus.com/media/media/hne/datasheets/m_sensors/en_10/m_222_e.pdf
- Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M. (2016). *Physik für Ingenieure*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-49355-7>
- Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J.-K. (2018). *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource*. Edition Detail. Detail Business Information GmbH. <http://shop.detail.de/de/atlas-recycling.html>
- IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. (2019). *EPD-binderholz-Brettsperrholz-BBS_19-03-2024*.
- Ineichen, M. (2020). *Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygroskopisch aktiven Baustoffen: Messmethoden, Kennlinienerstellung und Validierung zur feuchte- und zeitabhängigen Wasserdampfaufnahme und -abgabe ausgewählter Baustoffe* [Masterthesis, publiziert über die Technische Universität München], dauerhaft abrufbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/1611619>.
- InnoCrossLAM. *Forschungsvorhaben: InnoCrossLAM*. ZAG Slovenian National Building and Civil Engineering Institute. <http://innocrosslam.zag.si/>
- Janssen, H. & Roels, S. (2009). Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures. *Energy and Buildings*, 41(4), 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.007>
- Jungwirth, J. (2014). *Lastmanagement in Gebäuden: Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden*.
- Kalz, D. & Koenigsdorff, R. (2016). Nichtwohngebäude effizient heizen + kühlen: Erfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Wärmepumpen. *Informationsdienst, BINE, (Themeninfo II/2016)*.

- Khouli, S. e., John, V., Zeumer, M. & Hartmann, F. (2014). *Nachhaltig konstruieren: Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl; Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren* (1. Aufl.). de Gruyter.
<https://doi.org/10.11129/detail.9783955532185>
- Kornadt, O., Carrigan, S., Schöndube, T., Winter, S., Mindrup, K., Knieriemen, G. (2019): *Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3129).
- Kraemer & Kraus Waermetechnik GmbH. *Elektro-Raumheizgeräte Das Komplettprogramm fuer Industrie und Gewerbe*. <https://www.kraemer-kraus.de/download/elektro-raumheizgeraete-2021.pdf>, zuletzt geprüft am 20.05.2021.
- Kraniotis, D., Nore, K., Brückner, C. & Nyrud, A. Q. (2015). Thermography measurements and latent heat documentation of Norwegian spruce (*Picea abies*) exposed to dynamic indoor climate. *Journal of Wood Science*, 62 (2), S. 203–209. DOI: 10.1007/s10086-015-1528-1.
- Krischer, O. & Kast, W. (1978). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. 3., neubearb. Aufl., Springer Verlag, Berlin.
- Künzel, H. M. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtenttransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten* [Dissertation], Universität Stuttgart.
- Künzel, H. M. (1997). Raumluftverhältnisse in Wohnräumen: IBP-Mitteilung 314, 24. Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- Künzel, H. M., Holm, A., Sedlbauer, K., Antretter, F., Ellinger, M. & Vesely, J. (2006b). Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. *Bauforschung für die Praxis* (75), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. *Holzbau Ergänzungsmodul*. Holzbau Ergänzungsmodul, Technische Universität München.
- Li, Y., Fazio, P. & Rao, J. (2012). An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room. *Building and Environment*, 47, 205–216.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.021>
- Lite-On Technology Corp. / Optoelectronics. *LTR-329ALS-01 Digital Ambient Light Sensor*.
https://www.mouser.com/datasheet/2/239/Lite-On_LTR-329ALS-01%20DS_ver1.1-348647.pdf
- Lustig-Rössler, U. (1992). *Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Lehm als Baustoff* [Dissertation]. Gesamthochschule Kassel.
- Maxim Integrated Products Inc. (2012). *MAX31865 RTD-to-Digital Converter*.
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>
- Medisana AG. *Luftbefeuchter AH 660*. <https://cdn.bueromarkt-ag.de/downloads/produktdatenblaetter/60067.pdf>
- Meinlschmidt, P., Mauruschat, D. & Briesemeister, R. (2016). Altholzsituation in Europa und Deutschland. *Chemie Ingenieur Technik*, 88(4), 475–482. <https://doi.org/10.1002/cite.201500023>
- Mestek, P., Werther, N. & Winter, S. (2016). Planen und Bauen mit Brettsperrholz: R04_T06_F01_. *Informationsdienst Holz*(Reihe 4, Teil 6, Folge 1), 1–36.
- Mestek, P. & Winter, S. (2011). *Berechnung und Bemessung von Brettsperrholz – ein Überblick*. 4. Europäischer Kongress für energieeffizientes Bauen mit Holz 2011,
- Mets, T. de, Tilmans, A. & Loncour, X. (2017). Hygrothermal assessment of internal insulation systems of brick walls through numerical simulation and full-scale laboratory testing. In Geving S. & Time B. (Hrsg.) (S. 753–758). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.022>

- Microchip Technology Inc. (2012). *MCP3911 3.3V Two-Channel Analog Front End*.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP3911-3.3V-Two-Channel-Analog-Front-End-DS20002286D.pdf>
- Mindrup, K. (2019). *Raumklimatisierung durch thermisch aktivierte Massivholzelemente: Konzeptentwicklung, Leistungsbetrachtung und Ableitung von Auslegungswerkzeugen* [Dissertation]. Technische Universität München.
- Molter, P. (2016). *Technikintegration in offenen Fassadensystemen* [Dissertation]. Technische Universität München.
- Musterbauordnung - MBO - Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 27.09.2019.
- Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise - MHolzBauRL - Fassung Oktober 2020.
- Niemz, P. & Sonderegger, W. U. (2017). *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe : mit zahlreichen Bildern und Tabellen*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. Online verfügbar unter <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446445260>.
- Nikuradse, J. Strömungsgesetze in rauen Rohren. In *VDI-Forschungsheft 361* (Ausgabe B Bans 4).
- Nore, K. (2016, 16. Juni). *Hygrothermal mass - potential improvement of indoor climate using building materials*. Wood Forum Building Nordic, Alto.
- Nore, K., Nyrud, A. Q., Kraniotis, D., Skulberg, K. R., Englund, F. & Aurlien, T. (2017). Moisture buffering, energy potential and volatile compound emissions of wood exposed to indoor environments. *Science and Technology for the Built Environment*, 23, 512–521.
- NXP Semiconductors N.V. (2021). *PCF85263A Tiny Real-Time Clock/calendar with alarm function, battery switch-over, time stamp input, and I2C-bus*. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF85263A.pdf>
- Osanyintola, O. F., Talukdar, P. & Simonson, C. J. (2006). Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture buffering capacity of spruce plywood. *Energy and Buildings*, 38(10), 1283–1292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.024>
- Otto, F. (1995). *Einfluss von Sorptionsvorgängen auf die Raumluftfeuchte* [Dissertation]. Gesamthochschule Kassel.
- Pfafferott, J., Kalz, D. & Koenigsdorff, R. (2015). *Bauteilaktivierung. Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen*. Fraunhofer-IRB-Verl.
- Phymeas GbR. *Phymeas Heat Flux Sensors with temperature sensor (PT 100 Kl. A DIN IEC 751)*.
https://www.phymeas.de/?page_id=2&lang=en
- Rode, C., Peuhkuri, R. H., Hansen, K. K., Time, B. & Svennberg, K. (2005). NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials. *AIVC 26th conference: Ventilation in relation to the energy performance of buildings. Air Infiltration and Ventilation*, 47–52.
- Rode, C., Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K. & Arvidsson, J. (2005). *Moisture Buffering of Building Materials*. Hg. v. norden Nordisk InnovationsCenter. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark (Report BYG-DTU R-126, Proj.Nr.: 04023).
- Rotho Blaas SRL (Hrsg.). *WZU Zuganker*.
<https://www.rothoblaas.de/produkte/verbindungstechnik/holzbauverbinder/standard-winkelverbinder/wzu>
- Saint-Gobain Rigips GmbH. (2021). *Verarbeitungsrichtlinien Trockenbau. Anleitung für das Fachhandwerk*.

- Saint-Gobain Rigips GmbH, BBU (Hrsg.). (2015, 30. Juni). *Produktdatenblatt - Rigips Climafit 10*.
- Saint-Gobain Rigips GmbH, HS (Hrsg.). (2015, 8. Juli). *Produktdatenblatt - Rigips Bauplatte RB 12,5*.
- Schild, K. & Willems, W. M. (2013). *Wärmeschutz*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-02571-7>
- Schmidt, S. & Gertis, K. (2015). Zur Ermittlung der Sorptionsenthalpie von Baustoffen. *Bauphysik* 37 (2), S. 71–80. DOI: 10.1002/bapi.201510009.
- Schnider, T., Niemz, P., Steiger, B. & Arx, U. von (2011). Untersuchungen zum Versagen von Klebfugen unter klimatischer Langzeitbeanspruchung. *Bauphysik*, 33(1), 27–32.
<https://doi.org/10.1002/bapi.201110003>
- Seifert, J. H. (1970). *Untersuchungen über Sorption und Quellung von Holz und Holzwerkstoffen* [Dissertation]. München, Technische Hochschule, Fakultät für Maschinen und Elektrotechnik.
- Skaar, C. (1972). *Water in wood*. New York, NY: Syracuse Univ. Pr (Syracuse wood science series, 4).
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2020). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen*.
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.html>
- STMicroelectronics. (2016). *LPS22HB MEMS nano pressure sensor: 260-1260 hPa absolute digital output barometer*. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00140895.pdf>
- Texas Instruments Inc. (2015). *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1623761841515&ref_url=https%253A%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FHDC1080
- thinkstep AG. (2020). *GaBirts* (Version Version 9.2.1.68) [Computer software].
- Umweltbundesamt Dessau-Roßlau. (2020). *Emissionen von Wärmekraftwerken und anderen Verbrennungsanlagen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie>, zuletzt geprüft am 20.05.2021.
- van Belleghem, M. , Steeman, M, Willockx, A., Janssens, A & de Paepe, M. (2011). Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials. *Building and Environment*, 46(4), 884–898.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.018>
- van Belleghem, M., Steeman, M, de Paepe, M. & Janssens, A. Design of a test chamber for the investigation of moisture transport in air flows and porous materials.
- Volhard, F. & Röhlen, U. (2002). *Lehmabau Regeln*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-96899-9>
- Weichert, L. (1963). Untersuchungen über das Sorptions- und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Preßvollholz bei Temperaturen zwischen 20°C und 100°C. *Eur. J. Wood Prod.* 21 (8), S. 290–300. DOI: 10.1007/BF02610962.
- Winkler, M., Nore, K. & Antretter, F. (2014). Impact of the moisture buffering effect of wooden materials on energy demand and comfort conditions. *NSB 2014*, Paper no. 60, S. 483 – 491.
- Woods, J. & Winkler, J. (2018). Effective moisture penetration depth model for residential buildings: Sensitivity analysis and guidance on model inputs. *Energy and Buildings*, 165, 216–232.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.040>
- Xiamen Jinxinrong Electronics Co., Ltd. *KS15 Solid State Relay*.
<http://www.relttech.de/mediapool/143/1439080/data/Datenbaetter/Jinxinrong/KS15.pdf>
- XiDi Technology. (2015). *YHDC Split core current transformer*.
https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf

Zanke, U. (2013). *Hydraulik für den Wasserbau*. Springer Verlag.

Ziegert, C. (2004). *In Balance - Das Feuchtesorptionsvermögen von Lehmstaubstoffen*. CLAYTEC e. K., Ausgabe 1.

Verzeichnis der zitierten Gesetze, Verordnungen, Normen, Europäischen Technischen Bewertungen (ETA) und Richtlinien

Bundesgesetzblatt BGBl. Jahrgang 2006, Teil I, Nr. 24, ausgegeben zu Bonn am 22. Mai 2006,
Beleihungswertermittlungsverordnung – BelWertV. Anlage 2 (zu §12 Abs. 2), S.1183.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamtes für Justiz (2020).
Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz
(Altholzverordnung - AltholzV), 1–16.

Deutsches Institut für Bautechnik. (2017, 2. Juni). *ETA-06/0009 Europäisch Technische Bewertung: Massives plattenförmiges Holzbauelement zur Verwendung als tragendes Bauteil in Bauwerken*.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Mai 1998). *DIN 4102-1:1998-05; Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Teil 1: Baustoffe ; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Dezember 2010a). *DIN EN 1995-1-1:2010-12; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Dezember 2010b). *DIN EN 1995-1-2:2010-12; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Februar 2013). *DIN 4108-2:2013-02; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Dezember 2013). *DIN EN ISO 12571:2013-12; Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygrokopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2013); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2013*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Juli 2014). *DIN EN 15804:2014-07; Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (September 2015). *DIN 4172:2015-09; Maßordnung im Hochbau*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Mai 2017). *DIN EN ISO 12572:2017-05; Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prügefäß (ISO 12572:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Januar 2018). *DIN 4109-1:2018-01; Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Januar 2018). *DIN EN ISO 12570:2018-07; Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur (ISO 12570:2000 + Amd 1:2013 + Amd 2:2018); Deutsche Fassung EN ISO 12570:2000 + A1:2013 + A2:2018*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

- DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Dezember 2018). *DIN 18947:2018-12; Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (März 2020). *DIN EN 15804:2020-03; Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) (Oktober 2011). *DIN EN ISO 14025:2011-10; Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) (Februar 2021). *DIN EN ISO 14040:2021-02; Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) (Februar 2021). *DIN EN ISO 14044:2021-02; Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM), DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Juni 2012). *DIN 4074-1:2012-06; Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadel schnitt holz*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM), DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Juli 2014). *DIN EN 16485:2014-07; Rund- und Schnittholz -Umweltproduktdeklarationen - Produktkategorieregel für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen; Deutsche Fassung EN 16485:2014*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM), DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Juni 2019). *DIN 68800-1:2019-06; Holzschutz – Teil 1: Allgemeines*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN-Normenausschuss Baulicher Wärmeschutz im Hochbau, DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Oktober 2018). *DIN 4108-3:2018-10; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (DKE) (Mai 2009). *DIN EN 60751:2009-05; Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC 60751:2008); Deutsche Fassung EN 60751:2008*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Gebäudeenergiegesetz - GEG, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37 (13. August 2020).
- Österreichisches Institut für Bautechnik. (2017, 20. Februar). *ETA-14/0349 Europäische Technische Bewertung: Massive plattenförmige Holzbauelemente für tragende Bauteile in Bauwerken*.
- Österreichisches Institut für Bautechnik. (2020, 6. April). *ETA-14/0349 Europäische Technische Bewertung: Massive plattenförmige Holzbauelemente für tragende Bauteile in Bauwerken*.

Verzeichnis der zitierten unveröffentlichten Abschlussarbeiten

Die Abschlussarbeiten sind bei den betreuenden Lehrstühlen der Technischen Universität München archiviert und können bei Interesse jederzeit gerne angefragt werden.

Eckel, S. (2021). *Untersuchung der Sandkornrauigkeit ks von unterschiedlichen Holzoberflächen und Holzwerkstoffen* [nicht veröffentlichte Masterthesis]. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Emmel, A.-C. (2017). *Untersuchung ausgewählter Anwendungsszenarien thermisch aktiver Massivholzelemente* [nicht veröffentlichte Masterthesis]. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Ertl, A. (2019). *Strömungsoptimierung von Kanalsystemen thermisch aktiver Massivholzwände* [nicht veröffentlichte Masterthesis]. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Ettenhuber, D. (2020). *Thermisch aktivierte Massivholzelemente: Systementwicklung und -vergleich energetischer Integrationsmöglichkeiten in der Gebäudetechnik* [nicht veröffentlichte Masterthesis]. Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München.

Fochler, D. (2021). *Verformungsverhalten von thermisch aktiviertem Brettsperrholz unter nutzungsbedingten Feuchtigkeitsänderungen* [nicht veröffentlichte Masterthesis]. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Gruzlewski, M. (2019). *Potenziale der baupraktischen Verwendung von thermisch aktivierte Massivholzbauteilen* [nicht veröffentlichte Bachelorthesis]. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Pape, L. (2020). *Weiterentwicklung thermisch aktiver Massivholzelemente anhand eines Prototyps* [nicht veröffentlichte Masterthesis]. Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1 Deckplatte auf Massivholzelement mit gefrästen Kanälen, (Pape, 2020) | 9 |
| Abbildung 2 Schema eines luftführenden thermisch aktivierten Massivholzelements (Mindrup, 2019) | 13 |
| Abbildung 3 Position der hygrothermisch aktiven Oberfläche und der hygrothermisch nicht aktiven Oberfläche auf dem TAM (eigene Darstellung) | 15 |
| Abbildung 4 Übersicht regenerativer Energieträger | 19 |
| Abbildung 5 Integration wassergeführte, thermische Aktivierung in Massivholzelement, nach Mindrup (Mindrup, 2019) | 20 |
| Abbildung 6 Außenwand – Massivholzbau, Sichtqualität (Binderholz GmbH) | 23 |
| Abbildung 7 Trennwand – Massivholzbau, Sichtqualität (Binderholz GmbH) | 24 |
| Abbildung 8 Zustandsänderungen der Raumluft an der thermisch aktivierten Oberfläche; Rot: Heizbetrieb; Blau: Kühlbetrieb für 1,013 bar (Mindrup, 2019) | 25 |
| Abbildung 9 Prognostizierte minimale und maximale Holzausgleichsfeuchte im Heiz- und im Kühlbetrieb; Sorptionsisothermendiagramm aus: (Niemz & Sonderegger, 2017); (Mindrup, 2019) | 26 |
| Abbildung 10 Exemplarischer Aufbau eines thermisch aktivierten Massivholzes, nach (Pape, 2020) | 27 |
| Abbildung 11 Herstellungsprozess von Brettsperholz; nach (Mestek et al., 2016) | 28 |
| Abbildung 12 Produktionsvarianten für thermisch aktivierte Massivholzelemente (eigene Darstellung) | 29 |
| Abbildung 13 Zwischenprodukt: Brettsperholzgrundprodukt mit aufgeklebter Kanalschicht (eigene Darstellung) | 29 |
| Abbildung 14 (a) Ansicht hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche, (b) Bereich für Befestigungsmittel (eigene Darstellung) | 32 |
| Abbildung 15 (a) Ansicht Luftkanalschicht ohne Deckschicht, (b) „Rahmen“ für Befestigungsmittel auf der hygrothermisch aktiven Oberfläche (HAO) (eigene Darstellung) | 33 |
| Abbildung 16 Aufbau einer Holzrahmenbauwand, nach (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion) | 34 |
| Abbildung 17 Lasteinleitungsgeometrie bei Brettsperholz (ETA-06/0009, 2017) | 40 |
| Abbildung 18 Knotensystem, bei dem die überdeckende Schicht der Luftkanäle unterschiedliche Dicken aufweist (Emmel, 2017) | 41 |
| Abbildung 19 Abweichungen der spezifischen Leistung (pro m ² aktivierter Fläche) von dem Bauteilaufbau mit 40 mm Überdeckung der Luftkanäle, nach (Emmel, 2017) | 42 |
| Abbildung 20 (a) Schnittdarstellung Prototyp A, (b) Schnittdarstellung Prototyp B, jeweils nach (Mindrup, 2019) | 43 |
| Abbildung 21 (a) Strömungsweggeometrie Prototyp A und B, nach (Mindrup, 2019), (b) Strömungslinienvizualisierung der Geometrie von Prototyp A und B, nach (Ertl, 2019) | 44 |
| Abbildung 22 Optimiertes Theoriesystem der Kanalschicht im TAM (Ertl, 2019) | 45 |
| Abbildung 23 Luftkanalschicht des Prototyps C (links), Einström- und Ausströmöffnung (rechts) (eigene Darstellung) | 45 |
| Abbildung 24 Temperaturverteilung bei mittiger Anordnung der Einström- und Ausströmöffnung über dem unteren horizontalen Kanal (eigene Darstellung) | 46 |
| Abbildung 25 Versatz der Einströmöffnung um 6cm nach außen (eigene Darstellung) | 47 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 26 Prototyp B mit Vollholzplatte als Deckschicht (Mindrup, 2019) | 49 |
| Abbildung 27 Versuchskörperaufbauten (Arnold et al., 2021) | 49 |
| Abbildung 28 Prototyp C mit Dreischichtplatte als Deckschicht (PhyTAB) (eigene Darstellung) | 49 |
| Abbildung 29 Verteilung der Temperatur auf dem TAM | 50 |
| Abbildung 30 Temperaturverteilung auf TAM – Aufheizphase (eigene Darstellung) | 51 |
| Abbildung 31 Temperaturverteilung auf TAM – Abkühlphase (eigene Darstellung) | 52 |
| Abbildung 32 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Sandkornrauigkeit k_s (Eckel, 2021) | 57 |
| Abbildung 33 Graphische Darstellung der ermittelten Sandkornrauigkeit aus den Messergebnissen (Eckel, 2021) | 58 |
| Abbildung 34 Turbulente Rohrströmung „hydraulisch glatt“ in einem Rohr (Böswirth & Bschorer, 2014) | 59 |
| Abbildung 35 Konzept - Zentrale Anbindung eines luftgeführten Systems an Gebäudetechnik (vgl. Ettenhuber, 2020) | 61 |
| Abbildung 36 Anlagenkonfiguration zentrale Verteilung eines luftgeführten Systems + Legende Energieverteilung (Ettenhuber, 2020) | 62 |
| Abbildung 37 Konzept - Semizentrale Anbindung eines luftgeführten Systems an Gebäudetechnik (Ettenhuber, 2020) | 63 |
| Abbildung 38 Anlagenkonfiguration semizentrale Verteilung eines luftgeführten Systems + Legende Energieverteilung (Ettenhuber, 2020) | 64 |
| Abbildung 39 Konzept - dezentrale Anbindung eines luftgeführten Systems an Gebäudetechnik (Ettenhuber, 2020) | 65 |
| Abbildung 40 Anlagenkonfiguration dezentrale Verteilung eines luftgeführten Systems + Legende Energieverteilung (Ettenhuber, 2020) | 66 |
| Abbildung 41 Konzept - Anbindung Vor- und Rücklauf an TAM (Ettenhuber, 2020) | 67 |
| Abbildung 42 Konzept - Zentrale Anbindung eines wassergeführten Systems an Gebäudetechnik (Ettenhuber, 2020) | 68 |
| Abbildung 43 Anlagenkonfiguration zentrale Verteilung eines wassergeführten Systems + Legende Energieverteilung (Ettenhuber, 2020) | 69 |
| Abbildung 44 Kalt + feucht. | 71 |
| Abbildung 45 Warm + trocken. | 71 |
| Abbildung 46 Kalt + trocken. | 71 |
| Abbildung 47 Warm + feucht. | 71 |
| Abbildung 48 Sorptionsisotherme Typ II | 73 |
| Abbildung 49 Zusammensetzung der Adsorptionsenthalpie nach (Schmidt & Gertis, 2015) | 74 |
| Abbildung 50 Bindungsenthalpie h_B von Holz nach (Fortuin, 2003) | 75 |
| Abbildung 51 Adsorptionsenthalpie von Holz in Abhängigkeit des Wassergehalts | 76 |
| Abbildung 52 Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit, Messmethode #B (Ineichen, 2020) | 82 |
| Abbildung 53 Bestimmung der Feuchtepufferwirkung, Messmethode #C (Ineichen, 2020) | 83 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 54 Versuchsaufbau zur Messung von Temperaturunterschieden durch Sorptionsenthalpie im Doppelversuch, Messmethode #D | 83 |
| Abbildung 55 Messablauf bei der Bestimmung der Sorptionsisotherme, Messmethode #E (Ineichen, 2020) | 84 |
| Abbildung 56 gemessene Werte der Sorptionsisotherme für Baustoff #2 | 91 |
| Abbildung 57 resultierende Sorptionsisotherme, inklusive Hysterese für Baustoff #2 | 91 |
| Abbildung 58 Sorptionsisothermen für Lehmmörtelputze: eigene Messwerte und Literaturwerte | 92 |
| Abbildung 59 Vergleich der Sorptionsisothermen: Lehmmörtelputze | 92 |
| Abbildung 60 Vergleich der Sorptionsisothermen für Lehmbauplatten | 93 |
| Abbildung 61 Vergleich aller untersuchter Baustoffgruppen im Bereich 30 % - 75 % relative Luftfeuchte | 94 |
| Abbildung 62 Oberflächentemperaturänderung g und Integral G infolge von Desorption nach einem isothermen Abfall der relativen Umgebungsluftfeuchte | 98 |
| Abbildung 63 Ablaufschema der Validierung der Simulation mithilfe der Daten aus einem Doppelversuch im Labor | 99 |
| Abbildung 64 Vergleich von Gipsfaserplatte (#4) und Gipsfaserplatte verputzt (#4 + #14) | 103 |
| Abbildung 65 Vergleich: Gipskartonplatte (#3) und verputzte Lehmbauplatte (#5 + #14) | 104 |
| Abbildung 66 Vergleich: Brettsperrholz (#9) und Gipskartonplatte (#3) | 105 |
| Abbildung 67 Gegenüberstellung einer Lehmbauplatte mit Lehmputz (#5 + #14) und Holzdämmplatte mit Lehmputz (#13 + #14) | 105 |
| Abbildung 68 Weiterentwicklung einer Brettsperrholzwand mittels thermischer Aktivierung und/oder verschiedener Decklagen | 106 |
| Abbildung 69 Simulationsergebnisse für die Basisvariante 1 nach einer einmaligen isothermen Luftbefeuchtung innenseitig (rechts). Der Wandaufbau entspricht dem Fassadentestelement BSP_01, sowie den Außenwänden des Testkubus in Kösching (vgl. Kapitel V). | 107 |
| Abbildung 70 Simulationsergebnisse für die Variante 2b nach einer einmaligen isothermen Luftbefeuchtung innenseitig (rechts). Der Wandaufbau entspricht der Basisvariante 1 mit einer zusätzlichen Lehmputzschicht. | 107 |
| Abbildung 71 Simulationsergebnisse für die Variante 2a nach einer einmaligen isothermen Luftbefeuchtung innenseitig (rechts), jedoch noch ohne thermische Aktivierung. Der Wandaufbau entspricht dem TAM aus Kapitel V. | 108 |
| Abbildung 72 Vergleich der Oberflächenerwärmung durch Enthalpiefreisetzung infolge eines isothermen Luftfeuchtesprungs von 50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte | 108 |
| Abbildung 73 Simulationsergebnisse für die Variante 2a bei der Erwärmung der eingefrästen Luftsicht mit 47 Watt pro m ² Elementfläche für eine Dauer von 60 Minuten (von t = 0 h bis t = 1 h). Das aus dem Innenraum (rechts) anliegende Klima war mit 23 °C und 50 % konstant. | 110 |
| Abbildung 74 Simulationsergebnisse für die Variante 2a bei der Erwärmung der eingefrästen Luftsicht mit 47 Watt pro m ² Elementfläche für eine Dauer von 60 Minuten (von t = 0 h bis t = 1 h), kombiniert mit einem einmaligen Feuchtesprung im Innenraum (rechts) von 50 % zu 80 % relativer Luftfeuchte zum Zeitpunkt t = 0 h. | 110 |
| Abbildung 75 Vergleich Wärmestromdichten und Gesamtenergieabgabe anhand Variante 2 a. Zufuhr von 47 Wh zu verschiedenen Zeitpunkten vor oder nach Feuchtesprung | 111 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 76 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BSP_01 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 121 |
| Abbildung 77 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BSP_03 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 122 |
| Abbildung 78 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_01 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 123 |
| Abbildung 79 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_03 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 124 |
| Abbildung 80 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_04 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 125 |
| Abbildung 81 Luft-, Oberflächentemperatur und Feuchteverlauf der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_05 ohne hygrische Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 126 |
| Abbildung 82 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der thermischen Simulation ohne hygrische Konditionierung (eigene Darstellung) | 127 |
| Abbildung 83 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation ohne hygrische Konditionierung (eigene Darstellung) | 128 |
| Abbildung 84 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BSP_01 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 130 |
| Abbildung 85 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante BESP_03 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 131 |
| Abbildung 86 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_01 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 132 |
| Abbildung 87 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_03 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 133 |
| Abbildung 88 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_04 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 134 |
| Abbildung 89 Luft-, Oberflächentemperatur, Feuchteverlauf, thermische und hygrische Leistung der thermischen und hygrothermischen Simulationsvariante HRLB_05 mit hygrischer Konditionierung über den Analysezeitraum von 20. bis 23 Juli (eigene Darstellung) | 135 |
| Abbildung 90 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der thermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung) | 136 |
| Abbildung 91 Vergleich der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung) | 137 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 92 Vergleich der hygrischen Energieflüsse und Leistungen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung) | 138 |
| Abbildung 93 Vergleich der thermischen Energieflüsse und Leistungen der unterschiedlichen Bauteilvarianten in der hygrothermischen Simulation mit hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung) | 139 |
| Abbildung 94 Temperaturdifferenz der Oberflächentemperaturen der hygrothermischen Simulationsvarianten zwischen den Varianten mit und ohne hygrischer Konditionierung (eigene Darstellung) | 140 |
| Abbildung 95 Kubus Kösching | 144 |
| Abbildung 96 Umbauten für PhyTAB | 144 |
| Abbildung 97 Erweiterung des bestehenden Messsystems | 144 |
| Abbildung 98 Nachgerüstete Temperatursensoren | 144 |
| Abbildung 99 Solarstation auf dem Dach des TUM Hauptgebäudes - vor, während und nach dem Umbau | 144 |
| Abbildung 100 Baukonstruktive Ertüchtigung des ursprünglichen Kubus durch einen kompletten Ab- und Wiederaufbau der Tragkonstruktion | 145 |
| Abbildung 101 Einbau und Abdichtung der neuen Isolierverglasung | 145 |
| Abbildung 102 Einbau der Innendämmung und der Aluminiumprofile | 145 |
| Abbildung 103 Detailanschluss Testelement an den Rahmen, unten außen | 146 |
| Abbildung 104 Detailanschluss zweier Testelemente, unten mittig | 146 |
| Abbildung 105 Detailanschluss Testelement an den Rahmen, oben außen | 146 |
| Abbildung 106 Thermische Ertüchtigung mit maßgefertigten Vakuumisolationspaneelen und Isolierverglasung | 146 |
| Abbildung 107 Axonometrie eines Kubus ohne Darstellung der zwei einzusetzenden Fassadenetestelemente | 147 |
| Abbildung 108 Axonometrie der innenliegenden Vakuumisolation mit eingestelltem Aluminiumrahmen mit Teleskoparm in horizontaler Richtung | 147 |
| Abbildung 109 Fotos vom Bau der Fassadetestelemente (v. l. n.r.: einzelner Massivholzständer und Zwischendämmung bei den HRLB-Elementen; seitliche Abklebung des Brettspernhölz für die BSP-Elemente; Befestigung der putzbaren Aussendämmung mit Stabdübeln; Unterputz mit Randleisten aussen) | 147 |
| Abbildung 110 Axonometrie des Testkubus mit zwei Fassadetestelementen | 148 |
| Abbildung 111 Vertikalschnitt durch ein BSP-Element im eingebauten Zustand | 148 |
| Abbildung 112 Teile der alten Eternitbeplankung | 149 |
| Abbildung 113 Zustand der alten Konstruktion - Rahmen | 149 |
| Abbildung 114 Montage der neuen Bodenplatte | 149 |
| Abbildung 115 Montage neuer OSB-Beplankung | 149 |
| Abbildung 116 fertig beplankter Innenraum | 150 |
| Abbildung 117 Testweises Verklotzen zweier Rahmen | 150 |
| Abbildung 118 Detail der provisorischen Verklotzung | 150 |
| Abbildung 119 Finale Verklotzung mittels Schraubkeilen (KnieglTec) | 150 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 120 Verklotzen des neuen Fensters in der Konstruktion | 151 |
| Abbildung 121 Abkleben des Fensterrahmens | 151 |
| Abbildung 122 Einsetzen des Fensterflügels | 151 |
| Abbildung 123 Fenster fertig abgedichtet | 151 |
| Abbildung 124 Bitumenabdichtung der Kubusflanken | 151 |
| Abbildung 125 Verblechung zum Witterungsschutz | 151 |
| Abbildung 126 Verschraubung der Bleche | 151 |
| Abbildung 127 Abgeschlossene Montage der Fassadenteilelemente, Außenansicht | 151 |
| Abbildung 128 Aluminiumplatte mit Durchführung für 2x Luft-; 1x Strom-; 1x Datenleitung; 1x Reserveblindstopfen | 151 |
| Abbildung 129 Durchführungsplatte im eingebauten Zustand (Außenansicht) | 151 |
| Abbildung 130 Horizontalschnitt durch die Einschuböffnung an einem Kubus | 152 |
| Abbildung 131 Zweiteiliges Mess- und Versorgungskonzept, schematisch dargestellt. | 161 |
| Abbildung 132 Versorgungsschalschrank mit Elementen zur gezielten Ansteuerung einzelner Geräte über die Außensteckdosen sowie jeweils getrenntem Verbrauchsmonitoring | 162 |
| Abbildung 133 Brick-Stapel mit Montageplatte und Tragschienensockel | 162 |
| Abbildung 134 Messschalschrank während des Aufbaus mit ausreichend Platz für zukünftige Erweiterungen. | 162 |
| Abbildung 135 Draufsicht auf 3d-Modell mit Oberseite und Kabelauslässen | 163 |
| Abbildung 136 Ansicht Seite (halbtransparente Darstellung zeigt die knickfreie Kanalführung) | 163 |
| Abbildung 137 Ansicht Vorn, Darstellung des achsensymmetrischen Aufbaus | 163 |
| Abbildung 138 Perspektive mit unterseitiger Aussparung für Platinthermometer | 163 |
| Abbildung 139 Formfindung via Rapid Prototyping zur verbesserten Befestigung des PT-1000-Sensors (Spitze) | 164 |
| Abbildung 140 Einbausituationen der fertigen Hülle mit Sensor zur Messung der Oberflächentemperatur | 164 |
| Abbildung 141 Entwicklung einer Hülle für den Kombisensor zur hygrometrischen Materialfeuchtebestimmung | 165 |
| Abbildung 142 Erprobung und Einbau der Sensoren zur hygrometrischen Holzfeuchtebestimmung in verschiedenen Tiefen des Bauteilquerschnitts | 165 |
| Abbildung 143 Schematische Darstellung der Testanlage (Solarstation, Technische Universität München) (eigene Darstellung) | 167 |
| Abbildung 144 Frontansicht eines Testkubus mit den Funktionsboxen, Übersicht über die Anordnung der Sensoren und der aktiven Systeme (eigene Darstellung) | 168 |
| Abbildung 145 Schematische Abbildung des Messkastens in Verbindung mit den individuellen Sensoren (eigene Darstellung) | 169 |
| Abbildung 146 Schematische Abbildung des Wärmestromkastens inkl. der angebrachten Sensors (eigene Darstellung) | 170 |
| Abbildung 147 Schematische Abbildung des Stromversorgungskastens inkl. Steckdosen für die aktiven Systeme (eigene Darstellung) | 171 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 148 Schematische Abbildung der „Red Box“ (eigene Darstellung) | 172 |
| Abbildung 149 Übersicht über den Aufbau und der Struktur des Python-Skripts für die Integration des Mess-, Steuer- und Regelungskonzepts (eigene Darstellung) | 174 |
| Abbildung 150 Blockschaltbild eines Proportional-Integral-Differenzial-Reglers (PID-Regler) (eigene Darstellung) | 176 |
| Abbildung 151 Draufsicht auf das TAM inkl. der Darstellung der Position der einzelnen Komponenten (eigene Darstellung) | 177 |
| Abbildung 152 Schematische Abbildung des Luftstroms durch das TAM inkl. der Gebäudetechnik (eigene Darstellung) | 177 |
| Abbildung 153 Prinzip | 179 |
| Abbildung 154 Erhöhung der absoluten Luftfeuchte durch 50 Minuten Befeuchtung- Aktive Wasserabgabe an die Raumluft im Brettsperrholz-Kubus Kösching | 179 |
| Abbildung 155 Rel. Luftfeuchten & Temperaturen in der Grenzschicht, innenseitig. Kubus Kösching, vgl. BSP_01 | 180 |
| Abbildung 156 Temperaturdelta an Decken- und Wandoberfläche, innen. Kubus Kösching, vgl. BSP_01 | 180 |
| Abbildung 157 Kubus Ost mit BSP_01 und BSP_02 (abgedeckt) | 181 |
| Abbildung 158 Anordnung der Oberflächen-temperatursensoren | 181 |
| Abbildung 159 Beispielhafte Messergebnisse der Oberflächentemperaturen - Kubus Ost – Fassadentestelement A (BSP_01) für einen Ausschnitt von 15 Minuten | 181 |
| Abbildung 160 Anordnung der Kombisensoren im Testelement / in der Kubusaussenwand zur hygrometrischen Materialfeuchtebestimmung | 182 |
| Abbildung 161 In 70 mm Tiefe verbauter Kombisensor (O_A_b7 und O_A_c7) | 182 |
| Abbildung 162 Exemplarische Darstellung der gemessenen relativen Luftfeuchte und -temperatur in einer kleinen abgedichteten Kammer im Materialquerschnitt (hygrometrische Materialfeuchtebestimmung) | 182 |
| Abbildung 163 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. Der Kasten markiert den Zeitraum der aktiven Befeuchtung durch remote angesteuerte Steckdose. | 183 |
| Abbildung 164 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor dem abgedichteten Referenz-Testelement B, BSP_02, Kubus Ost. | 183 |
| Abbildung 165 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 184 |
| Abbildung 166 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 184 |
| Abbildung 167 Oberflächentemperaturen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 184 |
| Abbildung 168 Resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 185 |
| Abbildung 169 Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A und Testelement B, Kubus Ost. | 185 |
| Abbildung 170 Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftsicht. | 185 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 171 Kurzzeitiger Luftwechsel (zwei Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 186 |
| Abbildung 172 Kurzzeitiger Luftwechsel (zwei Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 186 |
| Abbildung 173 Einstündiger Luftwechsel (60 Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 187 |
| Abbildung 174 Einstündiger Luftwechsel (60 Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 187 |
| Abbildung 175 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 187 |
| Abbildung 176 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 187 |
| Abbildung 177 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 188 |
| Abbildung 178 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 188 |
| Abbildung 179 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 188 |
| Abbildung 180 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 188 |
| Abbildung 181 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 189 |
| Abbildung 182 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 189 |
| Abbildung 183 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A und Testelement B, Kubus Ost. | 189 |
| Abbildung 184 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A und Testelement B, Kubus Ost. | 190 |
| Abbildung 185 Kurzzeitige Fensterlüftung (zwei Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftschicht. | 190 |
| Abbildung 186 Einstündige Fensterlüftung (60 Minuten) und resultierende Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftschicht. | 190 |
| Abbildung 187 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. Die Abbildung zeigt den Ausschnitt von vier Stunden vergrößert. | 191 |
| Abbildung 188 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. Der Kasten markiert die ersten vier Stunden des Versuchszeitraums. | 191 |
| Abbildung 189 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. Die Abbildung zeigt den Ausschnitt von vier Stunden vergrößert. | 192 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 190 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor dem Referenz-Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 192 |
| Abbildung 191 Aufheizversuch und resultierende Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A (BSP_01, frei) und Testelement B (BSP_02, mit Folie abgedichtet), Kubus Ost. | 192 |
| Abbildung 192 Oberflächentemperaturen an fünf verschiedenen Positionen in drei verschiedenen Höhen auf Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 193 |
| Abbildung 193 Kurzzeitige Fensterlüftung, 54 Minuten Heizbetrieb und weitere kurze Fensterlüftung - resultierende Temperaturdifferenzen zwischen Testelement A, BSP_01, und Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 193 |
| Abbildung 194 Kurzzeitige Fensterlüftung, 54 Minuten Heizbetrieb und weitere kurze Fensterlüftung - resultierende Oberflächentemperaturdifferenzen bereinigt nach den generellen Temperaturdifferenzen der angrenzenden Luftsicht. | 194 |
| Abbildung 195 Stoßlüfen, Aufheizen, Stoßlüften und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 195 |
| Abbildung 196 Stoßlüften, Aufheizen, Stoßlüften und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 195 |
| Abbildung 197 Mittelfristige Abkühlung nach dem Aufheizversuch (Stoßlüfen, Aufheizen, Stoßlüften) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 195 |
| Abbildung 198 Mittelfristige Abkühlung nach dem Aufheizversuch (Stoßlüfen, Aufheizen, Stoßlüften) und hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_02 abgedichtet, Kubus Ost. | 195 |
| Abbildung 199 Messaufbau für die Experimente in Kubus Ost. Der Befeuchter wurde für diese Periode nicht benutzt. | 196 |
| Abbildung 200 Schematischer Vergleich der Temperatursensoren auf BSP_01 (links, teils mit Folienabdeckung) und BSP_02 (rechts). Die Pfeile geben das erwartete Gefälle des messbaren hygrothermischen Effekts an. | 196 |
| Abbildung 201 Relative Luftfeuchten und -temperaturen, gemessen in der Mitte des Kubus Ost auf drei verschiedenen Höhen. | 197 |
| Abbildung 202 Temperaturen, gemessen an der Bauteiloberfläche von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 197 |
| Abbildung 203 Temperaturdifferenzen zwischen den Messwerten von Testelement A (BSP_01) und Testelement B (BSP_02), Kubus Ost. | 197 |
| Abbildung 204 Auswertung der nach der Temperaturdifferenzen der Grenzschicht bereinigten Oberflächentemperaturdifferenzen. Die Pfeile markieren die lokalen Minima/Maxima der gemittelten Kurven. | 198 |
| Abbildung 205 Messaufbau für die Experimente in Kubus Ost mit BSP_01 (links) und BSP_03, abgeklebt (rechts). | 199 |
| Abbildung 206 Einbau der Kombisensoren zur Erfassung der Bauteiltemperatur und -feuchte in jeweils vier verschiedenen Tiefen. Da BSP_03 (rechts) über eine zusätzliche 25 mm starke Innenbeplankung verfügt, erreichen hier nur die Sensoren O_B_b6/c6 und O_B_b7/c7 die Brettsperholzsicht. | 199 |
| Abbildung 207 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 200 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 208 Hygrometrische Materialfeuchtebestimmung in vier verschiedenen Tiefen von Testelement B, BSP_03 abgedichtet, Kubus Ost. | 200 |
| Abbildung 209 Relative Luftfeuchte und -temperatur, gemessen in der Mitte von Kubus Ost in drei verschiedenen Höhen. Der Kasten markiert den folgenden Untersuchungsausschnitt. | 200 |
| Abbildung 210 Relative Luftfeuchte und -temperatur, gemessen in der Mitte von Kubus Ost in drei verschiedenen Höhen, dargestellt für einen Zeitraum von drei Tagen. | 201 |
| Abbildung 211 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen in der Grenzschicht vor Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 201 |
| Abbildung 212 Temperaturen, gemessen an der Bauteiloberfläche von Testelement A, BSP_01, Kubus Ost. | 201 |
| Abbildung 213 Temperaturdifferenzen zwischen den Messwerten von Testelement A (BSP_01) und Testelement B (BSP_03 abgedichtet), Kubus Ost. | 201 |
| Abbildung 214 Differenzen der gemessenen Lufttemperaturen in der Grenzschicht, jeweils vor Testelement A (BSP_01, frei) und Testelement B (BSP_03, mit Folie abgedichtet), Kubus Ost. | 202 |
| Abbildung 215 Auswertung der nach der Temperaturdifferenzen der Grenzschicht bereinigten Oberflächentemperaturdifferenzen. Die Pfeile markieren die lokalen Minima/Maxima der Kurve der Lufttemperatur gemessen in der Raummitte von Kubus Ost (O_C_e1). | 202 |
| Abbildung 216 Prinzip der hygrothermischen Pufferung | 203 |
| Abbildung 217 Schema zur rechnerischen Beurteilung der hygrothermischen Pufferung im Langzeitexperiment | 204 |
| Abbildung 218 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in verschiedenen Tiefen des Wandquerschnitts über den Jahresverlauf. Kubus Kösching, vgl. BSP_01 | 205 |
| Abbildung 219 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in verschiedenen Tiefen des Wandquerschnitts über die zwei heißesten Messtage im August 2020. Kubus Kösching, vgl. BSP_01 | 205 |
| Abbildung 220 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in verschiedenen Tiefen des Wandquerschnitts über die zwei kältesten Messtage im Februar 2021. Kubus Kösching, vgl. BSP_01 | 205 |
| Abbildung 221 Relative Luftfeuchten und -temperaturen in der Grenzschicht an verschiedenen Stellen im Kubus | 206 |
| Abbildung 222 Messergebnisse der Oberflächentemperaturmessung an verschiedenen Punkten der Brettsperrholzoberflächen, innen. Dargestellt für die zwei kältesten Tage der Messperiode im Kubus Kösching, Wandaufbau vgl. BSP_01 | 207 |
| Abbildung 223 Temperaturdifferenzen an verschiedenen Punkten der Brettsperrholzoberflächen, innen. Dargestellt für die zwei kältesten Tage der Messperiode im Kubus Kösching, Wandaufbau vgl. BSP_01 | 207 |
| Abbildung 224 Temperaturdifferenzen an verschiedenen Punkten der Brettsperrholzoberflächen, innen. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching, Wandaufbau vgl. BSP_01 | 207 |
| Abbildung 225 Gemessene Oberflächentemperaturen, gleitender Mittelwert sowie Temperaturdelta an der innenseitigen Deckenoberfläche aus Brettsperrholz. Dargestellt für die zwei kältesten Tage der Messperiode im Kubus Kösching | 208 |
| Abbildung 226 Gleitender Mittelwert der Oberflächentemperatur sowie Temperaturdelta an der innenseitigen Deckenoberfläche aus Brettsperrholz. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching | 208 |
| Abbildung 227 Gleitender Mittelwert der Oberflächentemperatur sowie Temperaturdelta an der Innenseite der Nordostwand aus Brettsperrholz. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching | 209 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 228 Gleitender Mittelwert der Oberflächentemperatur sowie Temperaturdelta an der Innenseite der Nordwestwand aus Brettsperrholz. Dargestellt für die gesamte Messperiode im Kubus Kösching | 209 |
| Abbildung 229 Schichtung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte in Abhängigkeit der Höhe. Die Werte sind jeweils in der Mitte des Kubus in Kösching gemessen, es werden exemplarisch fünf Tage der heißesten gemessenen Periode im August 2020 gezeigt. | 210 |
| Abbildung 230 Schichtung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte in Abhängigkeit der Höhe. Die Werte sind jeweils in der Mitte des Kubus Kösching gemessen, es werden exemplarisch fünf Tage der kältesten gemessenen Periode im Februar 2021 gezeigt. | 211 |
| Abbildung 231 Abweichungen der gemessenen relativen Luftfeuchte und -temperatur vom Messwert auf der Höhe 1360 mm OKFF, dargestellt für fünf Tage im August 2020, Kubus Kösching. | 211 |
| Abbildung 232 Abweichungen der gemessenen relativen Luftfeuchte und -temperatur vom Messwert auf der Höhe 1360 mm OKFF, dargestellt für fünf Tage im Februar 2021, Kubus Kösching. | 211 |
| Abbildung 233 Einstündiger Luftwechsel (60 Minuten) und resultierende relative Luftfeuchten und -temperaturen in drei verschiedenen Höhen mittig positioniert in Kubus Ost. | 212 |
| Abbildung 234 Temperaturen an der Wandoberfläche, innen: zwei Wintertage. Kubus Kösching, vgl. BSP_01 | 212 |
| Abbildung 235 Sonnenstandsdiagramm für den Standort Kösching am 12. Februar 2021, 10:35 Uhr. | 213 |
| Abbildung 236 Sonnenstandsdiagramm für den Standort Kösching am 12. August 2020, 09:00 Uhr. | 213 |
| Abbildung 237 Temperaturen an der Wandoberfläche, innen: zwei Sommertage. Kubus Kösching, vgl. BSP_01 | 213 |
| Abbildung 238 Schematische Übersicht Messsensoren HRLB_01 und HRLB_02 (eigene Darstellung) | 215 |
| Abbildung 239 Fahrplan Messwoche - Holzrahmenleichtbauelemente HRLB_01 und HRLB_2 | 216 |
| Abbildung 240 Temperatur- und Feuchteverlauf im Kubus der Messreihe HRLB_01 und HRLB_02 (eigene Darstellung) | 217 |
| Abbildung 241 Verlauf der Oberflächentemperatur auf dem HRLB_01 und der operativen Temperatur im Kubus (eigene Darstellung) | 218 |
| Abbildung 242 Verlauf der Oberflächentemperatur auf dem HRLB_02 und der operativen Temperatur im Kubus (eigene Darstellung) | 219 |
| Abbildung 243 Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_01 (eigene Darstellung) | 220 |
| Abbildung 244 Verlauf der Temperatur und der absoluten Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_01 (eigene Darstellung) | 220 |
| Abbildung 245 Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_2 (eigene Darstellung) | 221 |
| Abbildung 246 Verlauf der Temperatur und der absoluten Feuchte in unterschiedlicher Bauteiltiefe im HRLB_02 (eigene Darstellung) | 221 |
| Abbildung 247 Temperaturdifferenz des HRLB_01 & HRLB_02 Elements in Bauteiltiefe (eigene Darstellung) | 222 |
| Abbildung 248 Temperaturdifferenz des HRLB_01 & HRLB_02 Elements in Bauteiltiefe (eigene Darstellung) | 223 |
| Abbildung 249 Schematische Übersicht Messsensoren TAM (eigene Darstellung) | 224 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 250 Fahrplan Messwoche – Thermisch aktiviertes Massivholzelement | 225 |
| Abbildung 251 Temperatur- und Feuchteverlauf im Kubus der Messreihe TAM (eigene Darstellung) | 226 |
| Abbildung 252 : Temperaturverteilung auf der Oberfläche des TAM (eigene Darstellung) | 227 |
| Abbildung 253 Temperatur- und Feuchteverteilung des TAM (eigene Darstellung) | 228 |
| Abbildung 254 Temperatur- und Feuchteverteilung in Bauteiltiefe des TAM (eigene Darstellung) | 229 |
| Abbildung 255 Schnitt durch Wandaufbau mit Prototyp C nach (Pape, 2020) | 231 |
| Abbildung 256 Gegenüberstellung von „Regelbereich“ und Ort der maximalen Spannungen, nach (Pape, 2020) | 233 |
| Abbildung 257 TAM-Wandaufbauten mit unterschiedlichen Deckplatten: (a) Vollholzplatte, (b) Dreischichtplatte, (c) Lehmplatte, (d) Gipskartonplatte, (e) Gipskartonplatte mit Graphitanteil (eigene Darstellung) | 235 |
| Abbildung 258 Ansicht Kanalschicht TAM. Rot markierter Bereich für Anbringung von Befestigungsmittel (eigene Darstellung) | 235 |
| Abbildung 259 Anschlussmöglichkeiten nach Anschlussort eines TAM an weitere Bauteile (eigene Darstellung) | 236 |
| Abbildung 260 (a) Wandfuß mit Befestigung auf der hygrothermisch nicht aktivierte Oberfläche (HnAO), (b) Wandfuß mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV1 und PV2, (c) Wandfuß mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV3, (d) Wandfuß mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV4, (e) Wandfuß mit Zugankersystem (eigene Darstellung) | 236 |
| Abbildung 261 (a) Wandkopf mit Befestigung über die Decke, (b) Wandkopf mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV1 und PV2, (c) Wandkopf mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV3, (d) Wandkopf mit Verbindungsmittel auf der HAO bei der Produktionsvariante PV4 (eigene Darstellung) | 239 |
| Abbildung 262 TAM Anschluss an Decke, nicht tragend (eigene Darstellung) | 240 |
| Abbildung 263 (a) Wandstoß mit Fugenbrett innenliegend, (b) Wandstoß mit Fugenbrett außenliegend, (c) Wandstoß mit Stufenfalz, (d) stumpfer Wandstoß (eigene Darstellung) | 241 |
| Abbildung 264 Eckverbindungen von thermisch aktiviertem Massivholz; (a) Verbindung mit geklebter Deckschicht, (b) Verbindung mit geschraubter Deckschicht (eigene Darstellung) | 242 |
| Abbildung 265 Konstruktiver Anschluss der dezentralen Technikeinheit an das TAM auf der Massivholzdecke, nach (Gruzlewski, 2019) | 243 |
| Abbildung 266 Anschluss der dezentralen Technikeinheit an das TAM in der Massivholzdecke integriert, nach (Gruzlewski, 2019) | 244 |
| Abbildung 267 Explosionszeichnung TAM (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.60) | 246 |
| Abbildung 268 Vermaßung der Belüftungsanäle der Grundplatte (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.61) | 246 |
| Abbildung 269 Vermaßung der Belüftungsanäle der Technikplatte (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.61) | 247 |
| Abbildung 270 Festlegung von Lebenszyklusmodulen (Böhm, 2021; in Anlehnung an DIN EN15804, 2020, S.17) | 248 |
| Abbildung 271 Systemfließbild TAM (Böhm, 2021) | 249 |
| Abbildung 272 Explosionszeichnung TAM (Böhm, 2021 in Anlehnung an Pape 2020, S.60) | 251 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 273 Treibhauspotential TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (Darstellung nach Böhm, 2021) | 252 |
| Abbildung 274 Treibhauspotenzial Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D, nur Deckschichtplatten (Darstellung nach Böhm, 2021) | 254 |
| Abbildung 275 Gesamteinsatz erneuerbarer Primärenergie (energetische + stoffliche Nutzung) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (eigene Darstellung) | 255 |
| Abbildung 276 Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (energetische + stoffliche Nutzung) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (eigene Darstellung) | 256 |
| Abbildung 277 Eutrophierungspotenzial, in das Süßwasser gelangende Nährstoffanteile (EP-Süßwasser) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (Darstellung nach Böhm, 2021) | 257 |
| Abbildung 278 Versauerungspotenzial, (AP, en: Acidification Potential), TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (Darstellung nach Böhm, 2021) | 258 |
| Abbildung 279 Troposphärisches Ozonbildungspotenzial (POCP, en: Photochemical Ozone Creation Potential) TAM mit Deckplatte der Module A1 bis A3 und C2 bis C4 und Modul D (eigene Darstellung) | 259 |
| Abbildung 280 Bildschirmfoto zur Bilanzierung des Moduls D des Bauteils TAM 2,9 m Dreischichtdeckplatte in der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts (thinkstep AG, 2020), (nach Böhm, 2021) | 261 |
| Abbildung 281 Bildschirmfoto zur Bilanzierung des Moduls D des Bauteils TAM 2,9 m Gipsdeckplatte in der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts (thinkstep AG, 2020), (nach Böhm, 2021) | 262 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1 Brandschutztechnische Anforderungen bezogen auf die Gebäudeklassen der MBO [eigene Darstellung] | 18 |
| Tabelle 2 Versuchskonfigurationen zur thermischen Beaufschlagung auf das TAM [eigene Darstellung] | 48 |
| Tabelle 3 Risse in der Deckschicht der unterschiedlichen Versuchsreihen | 54 |
| Tabelle 4 Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheiten der Versuchskörper [eigene Darstellung] | 56 |
| Tabelle 5 Abmessungen der Einzelkanäle (Eckel, 2021) | 57 |
| Tabelle 6: Tabellarische Darstellung der ermittelten Sandkornrauigkeit und den dazugehörigen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in den Kanälen (Eckel, 2021) | 58 |
| Tabelle 7 Übersicht der verwendeten Messmethoden | 85 |
| Tabelle 8 Medien zur Erstellung verschiedener relativer Luftfeuchten | 90 |
| Tabelle 9 Ermittelte Feuchtepufferwerte (moisture buffering values, MBV) für verschiedene Materialkombinationen nach den Messungen von (Ineichen, 2020) | 95 |
| Tabelle 10 Vergleich der feuchteabhängigen Wärmekapazität c der Gipskartonplatte # 3 (d=12,5 mm) | 101 |
| Tabelle 11 Berechnete Pauschalwerte für eine optimierte Konditionierung | 112 |
| Tabelle 12 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils BSP_01 inkl. der Bauteilschichten | 114 |
| Tabelle 13 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils BSP_03 inkl. der Bauteilschichten | 115 |
| Tabelle 14 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_01 inkl. der Bauteilschichten | 116 |
| Tabelle 15 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_03 inkl. der Bauteilschichten | 117 |
| Tabelle 16 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_04 inkl. der Bauteilschichten | 118 |
| Tabelle 17 Spezifische thermische Eigenschaften des Bauteils HRLB_05 inkl. der Bauteilschichten | 119 |
| Tabelle 18 Liste der Abkürzungen | 178 |
| Tabelle 19 GWP Modul A1 TAM 2,9m Dreischichtdeckplatte (Darstellung nach Böhm, 2021) | 253 |
| Tabelle 20 GWP Modul A1 TAM 2,9m Gipsdeckplatte (Darstellung nach Böhm, 2021) | 253 |

Anlage

| | |
|---|-------------|
| Anlagen zu Kapitel III – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung | A 1 |
| Stationäre Labormessungen zur Sorptivität verschiedener Baustoffe | A 1 |
| Ergebnisse der Laborversuche zum hygrothermischen Effekt | A 18 |
| | |
| Anlagen zu Kapitel IV – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche | A 42 |
| Details zur Messtechnik und der in Kubus Ost und West verbauten Elektrotechnik | A 42 |
| Auswahl des Messsystems für die Temperaturmessung | A 42 |
| Auswahl des Messsystems für die Luftfeuchtemessung | A 49 |
| Auswahl des Messsystems für die Wärmestrommessung | A 51 |
| Ausführungsdetails des baukonstruktiven Umbaus der Testkuben auf der Solarstation | A 62 |
| | |
| Verzeichnisse | A 81 |
| Abbildungsverzeichnis | A 88 |
| Tabellenverzeichnis | A 91 |

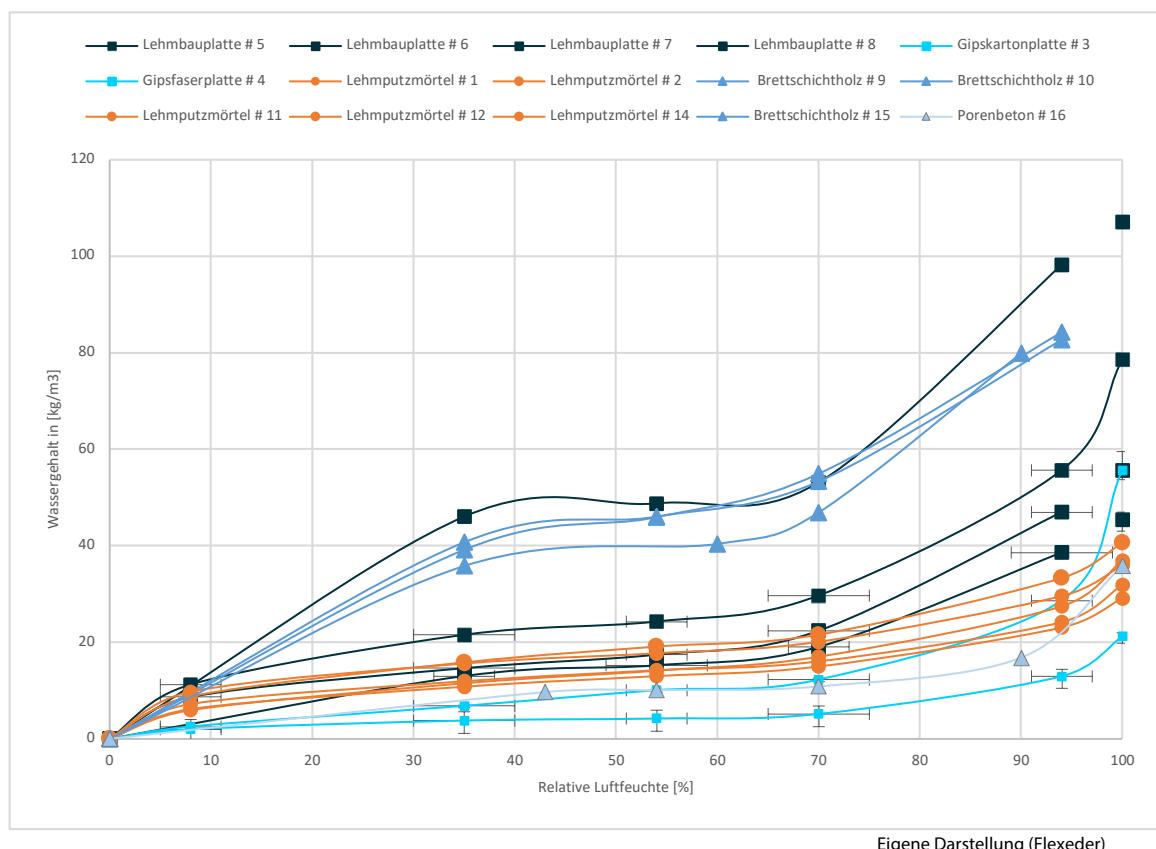
Anlagen zu Kapitel III – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung

Stationäre Labormessungen zur Sorptivität verschiedener Baustoffe

Nina Flexeder

Die Sorptionsisothermen auf den folgenden Seiten wurden in eigenen Messreihen erstellt. Ein überschlägiger Vergleich zeigt bereits die Tendenzen der einzelnen Baustoffgruppen, vgl. Abbildung 1. Die Materialien #5, 6, 7, und 8 zeigten nach 7 tägiger Lagerung bei 100 % Luftfeuchte Verfärbungen an kleinen Stellen, was auf Sporenbildung schließen lässt. Deswegen wurde die Konditionierung an diesem Punkt abgebrochen, ohne dass die Gewichtskonstanz bereits erreicht worden wäre. Dementsprechend sind die gemessenen Werte bei 100 % Luftfeuchte für diese vier Baustoffe nicht als absolut anzusehen.

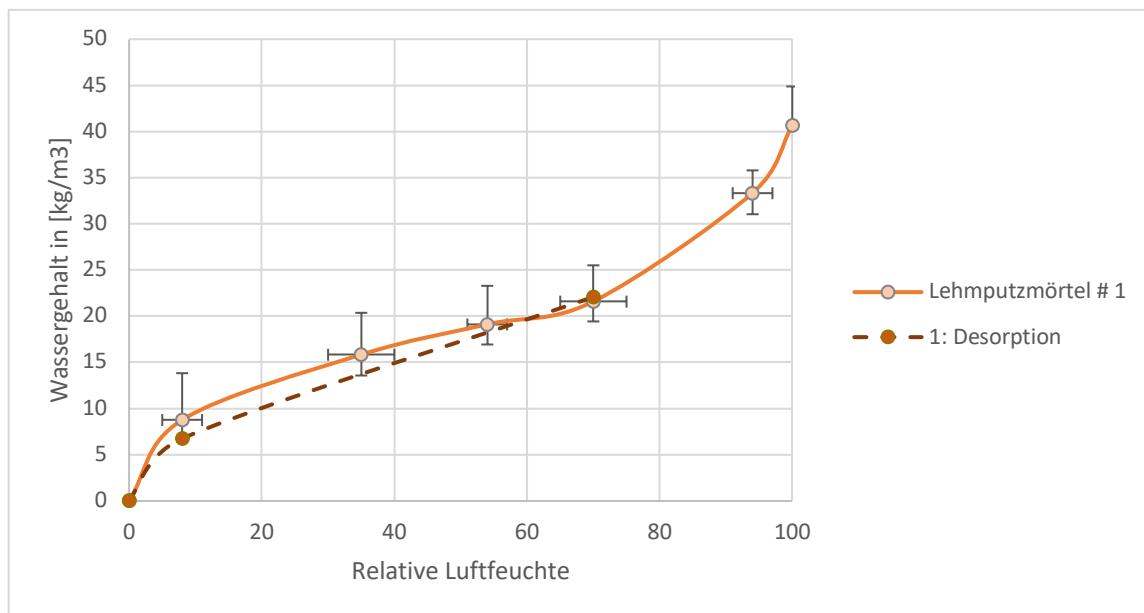
Die Photographien zeigen die Baustoffproben jeweils nach der Darrprobe, sodass typische Spuren wie Risse und Harzaustritt zu sehen sind. Alle folgenden Fotografien (Abbildung 2 - Abbildung 16) sowie die zugehörigen Auswertungen der Sorptionsisothermen sind eigene Darstellungen (Flexeder).

Abbildung 1 Vergleich der gemessenen Sorptionsisothermen aller untersuchten Baustoffgruppen

Eigene Darstellung (Flexeder)

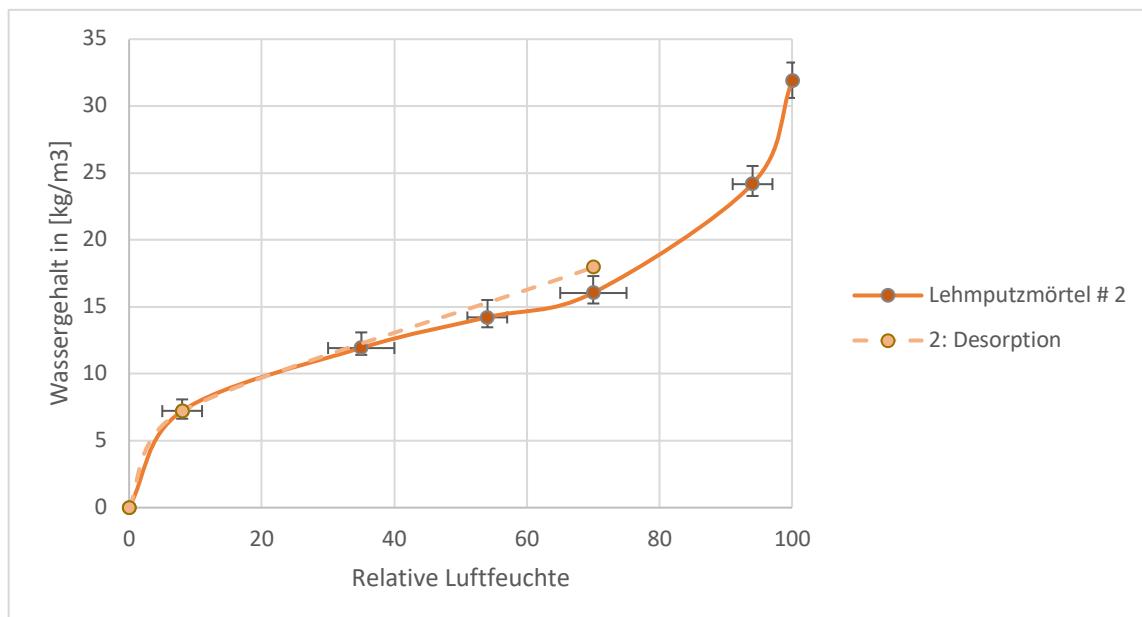
Lehmoberputz (fein) #1**Abbildung 2 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

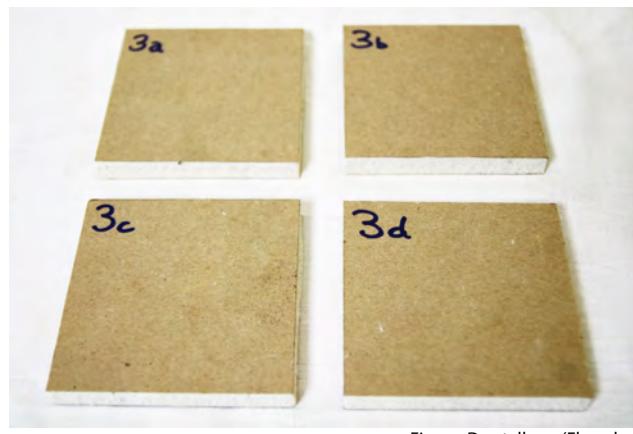
Eigene Darstellung (Flexeder)



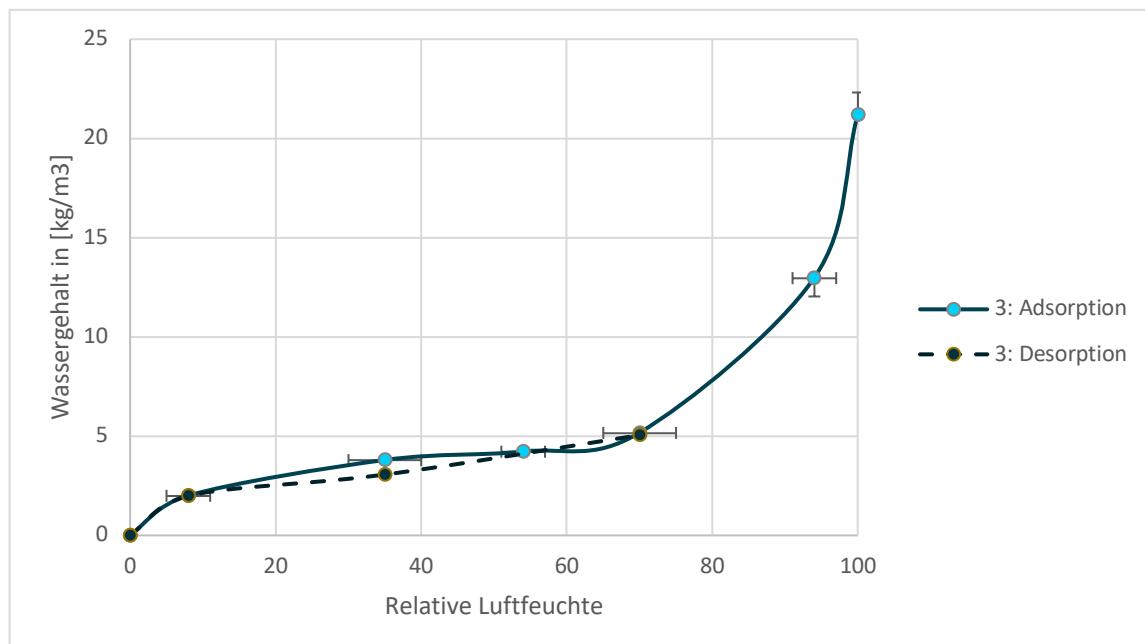
Lehmoberputz (grob) #2**Abbildung 3 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

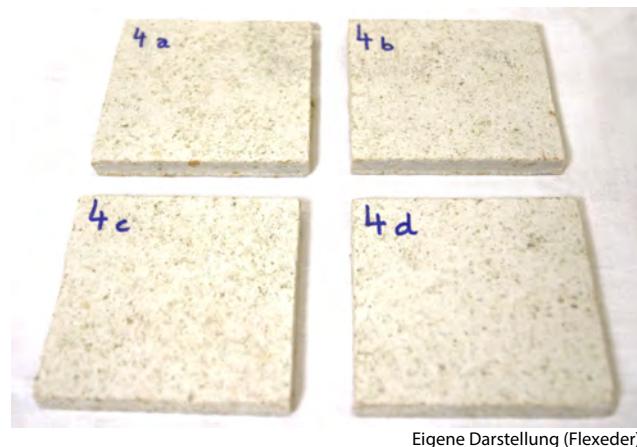
Eigene Darstellung (Flexeder)



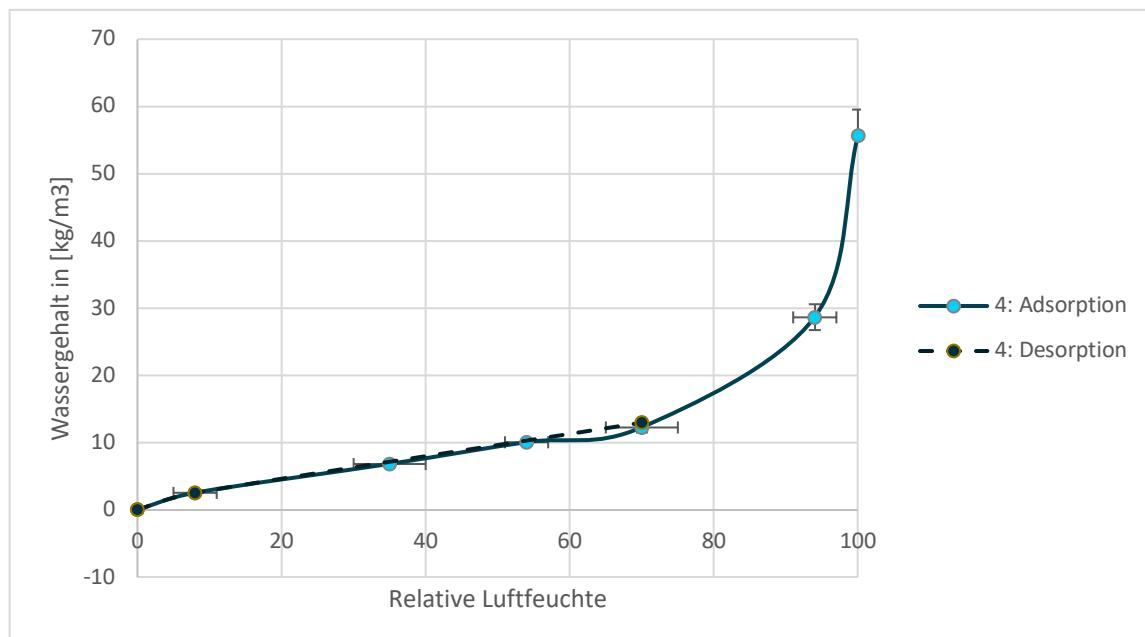
Gipskartonplatte #3**Abbildung 4 Vier Baustoffproben #3 a - d**

Eigene Darstellung (Flexeder)



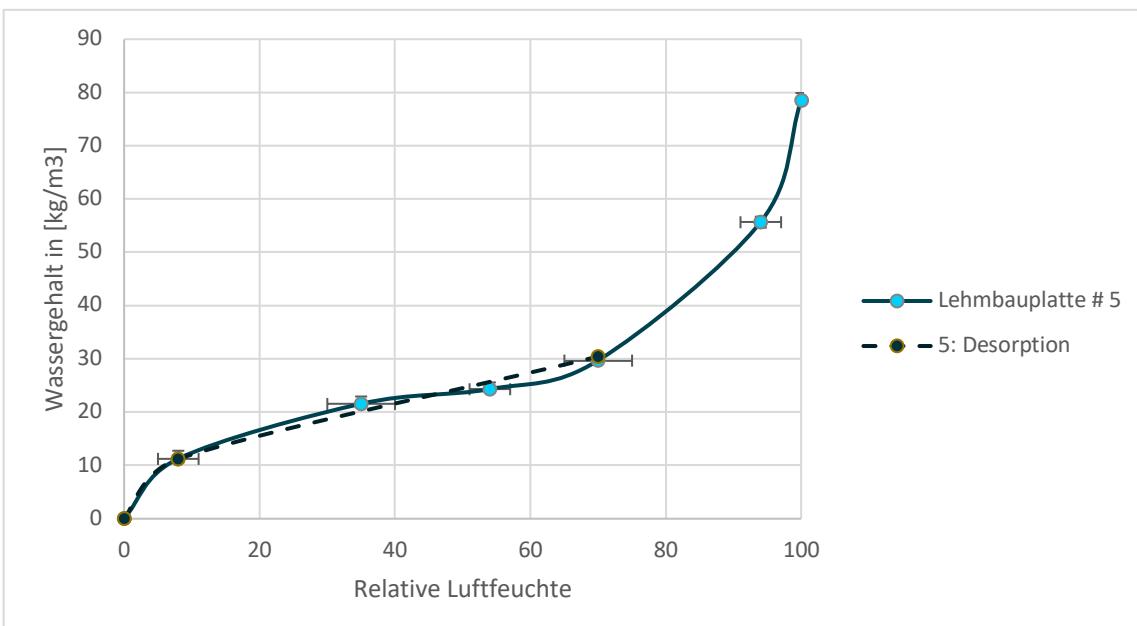
Gipsfaserplatte #4**Abbildung 5 Vier Baustoffproben #4 a - d**

Eigene Darstellung (Flexeder)



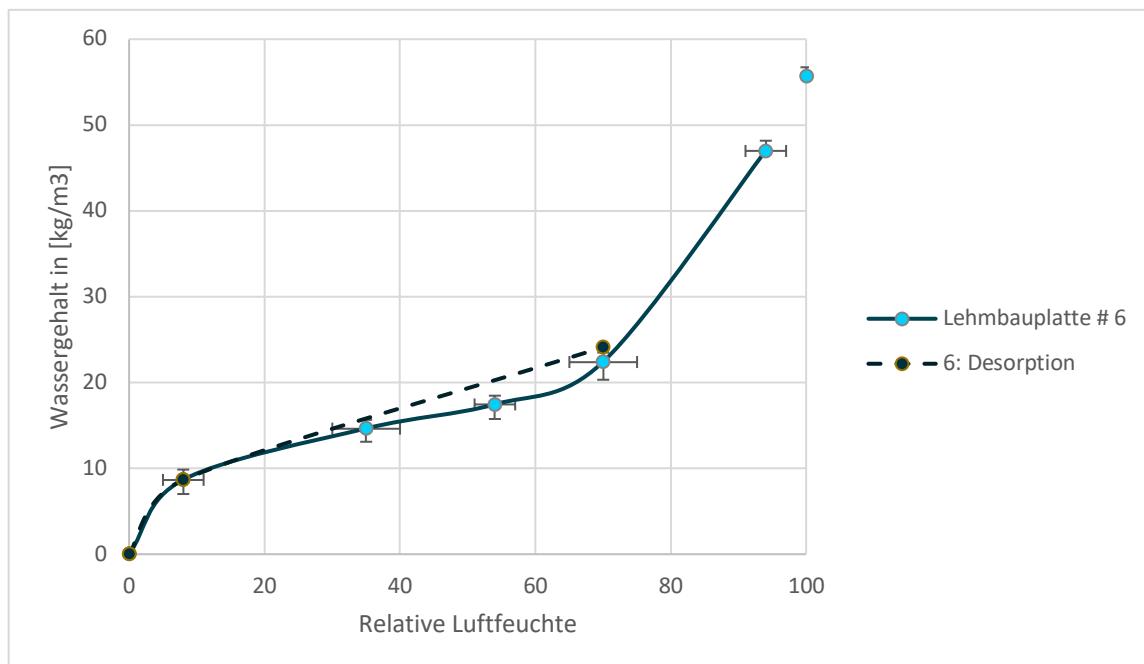
LehmBauplatte (Holzfasern) #5**Abbildung 6 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

Eigene Darstellung (Flexeder)



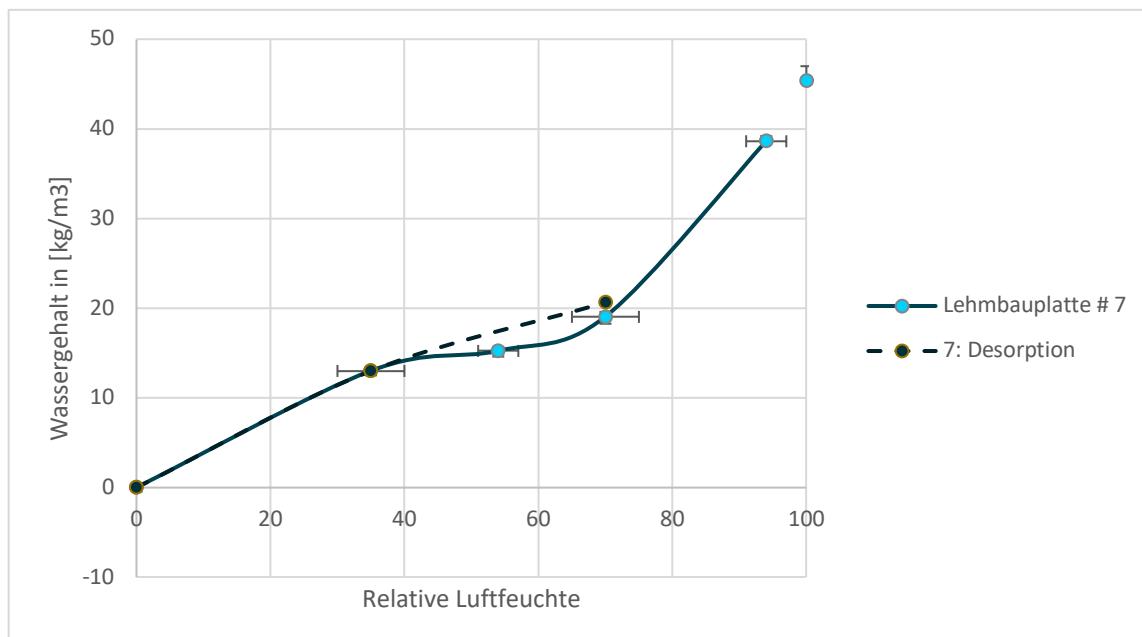
Lehmplatte (Schilfrohr, dünn) #6**Abbildung 7 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

Eigene Darstellung (Flexeder)



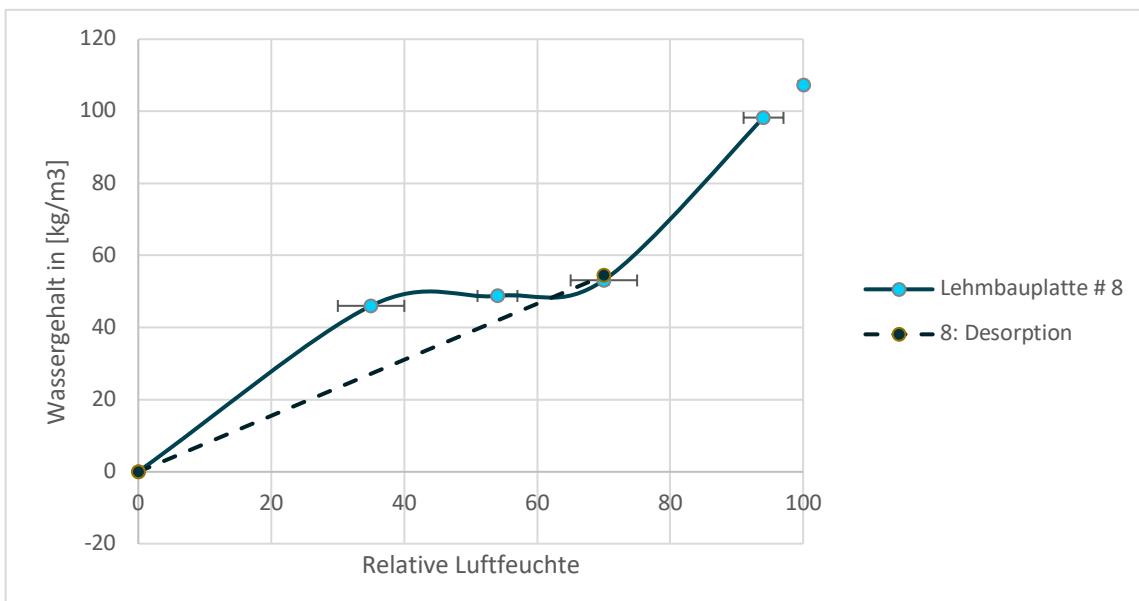
Lehmabauplatte (Schilfrohr, dick) #7**Abbildung 8 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

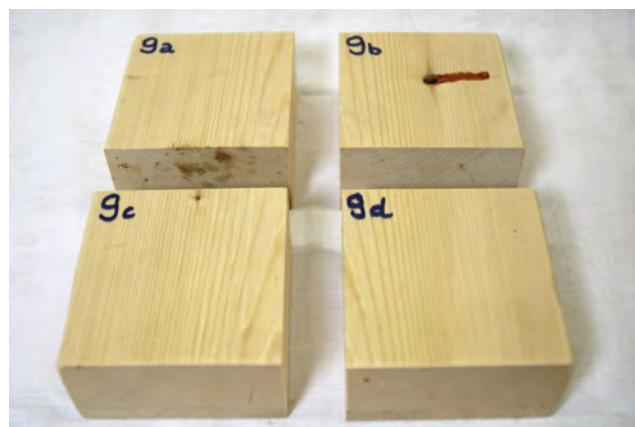
Eigene Darstellung (Flexeder)



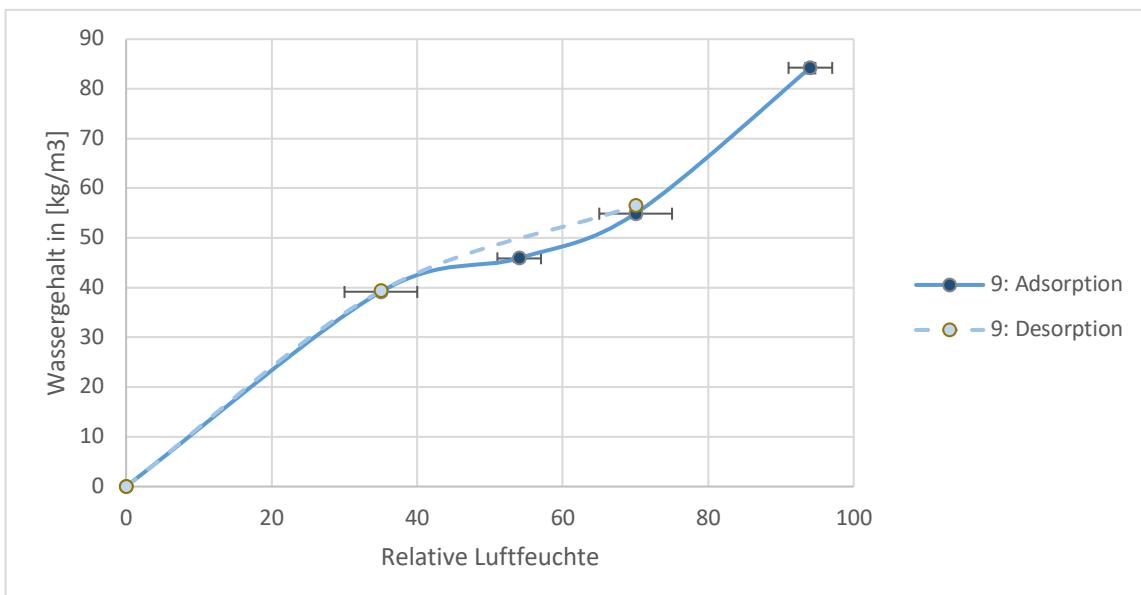
LehmBauplatte (Hanf) #8**Abbildung 9 Vier Baustoffproben #8 a - d**

Eigene Darstellung (Flexeder)



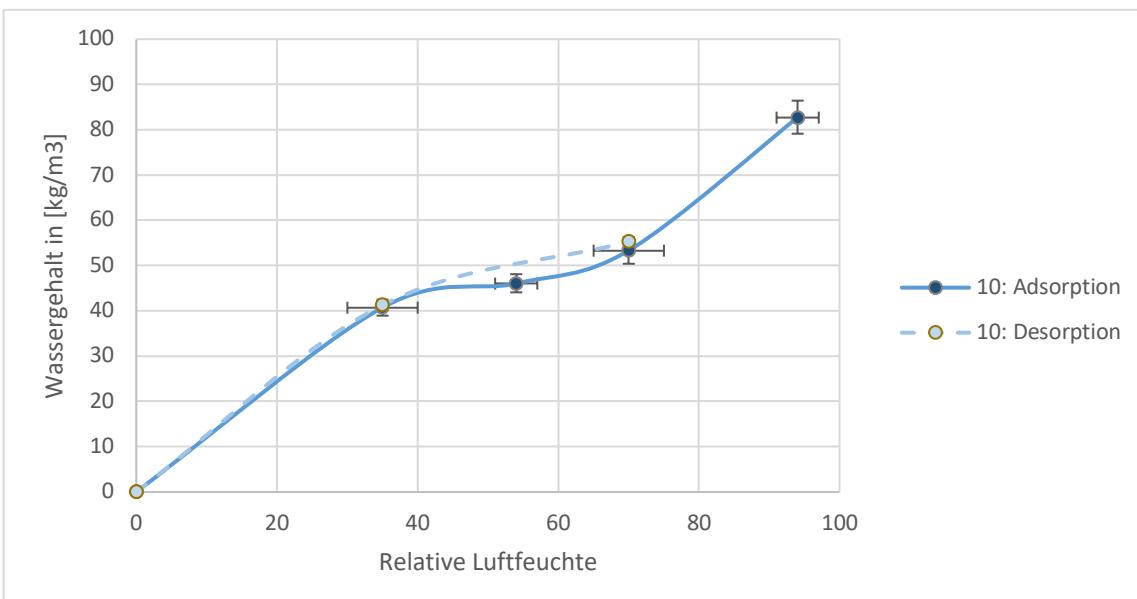
Brettschichtholz tangential #9**Abbildung 10 Vier Baustoffproben #9 a - d**

Eigene Darstellung (Flexeder)



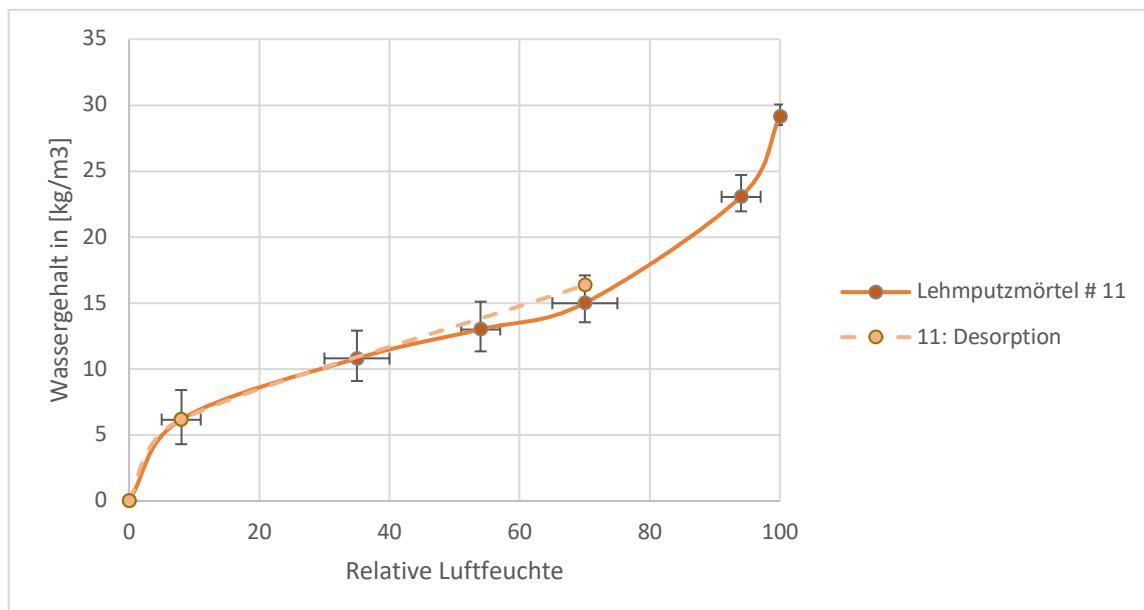
Brettschichtholz quer #10**Abbildung 11 Vier Baustoffproben #10 a - d**

Eigene Darstellung (Flexeder)



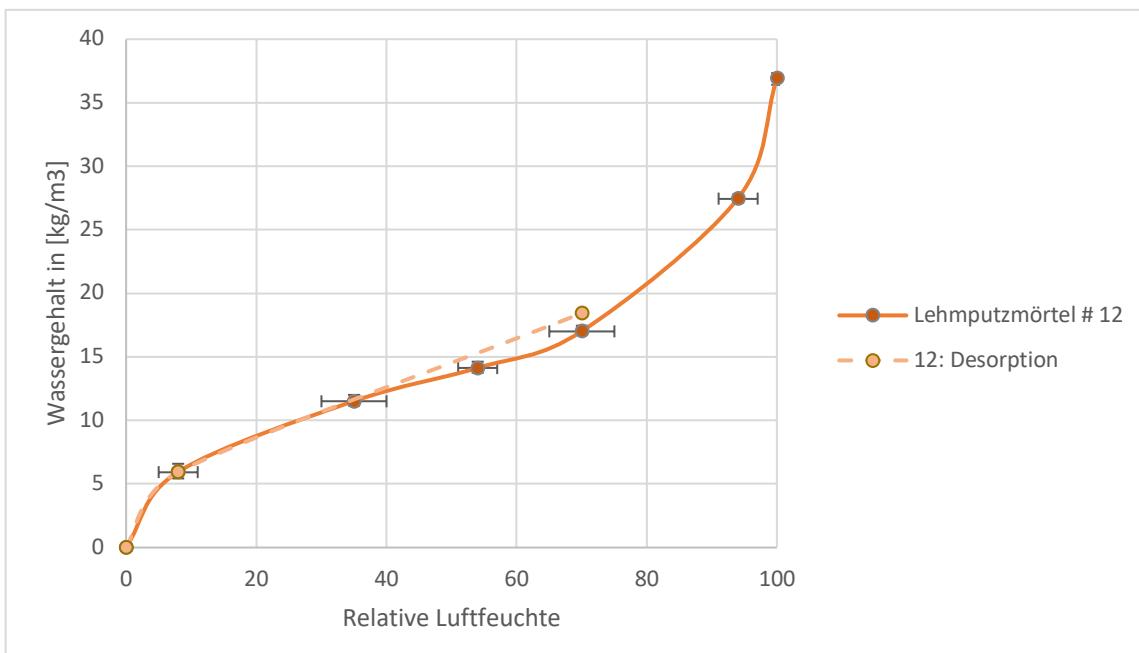
Lehmoberputz (mineralisch) #11**Abbildung 12 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

Eigene Darstellung (Flexeder)



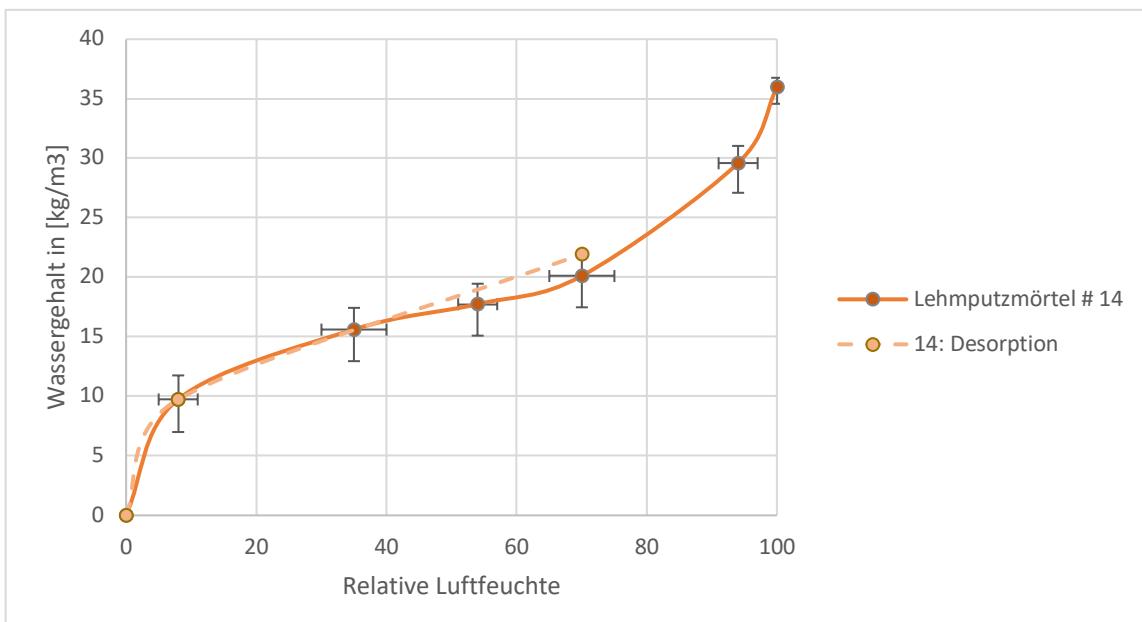
Lehmunterputz #12**Abbildung 13 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

Eigene Darstellung (Flexeder)



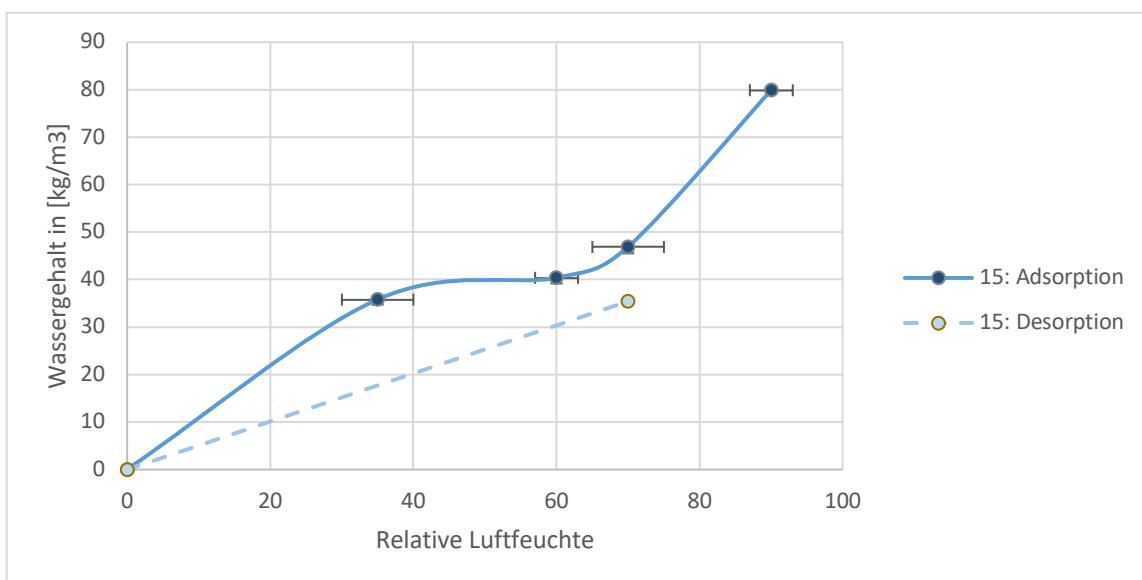
Lehmoberputz (fein) #14**Abbildung 14 Beispiel für eine der vier Baustoffproben**

Eigene Darstellung (Flexeder)



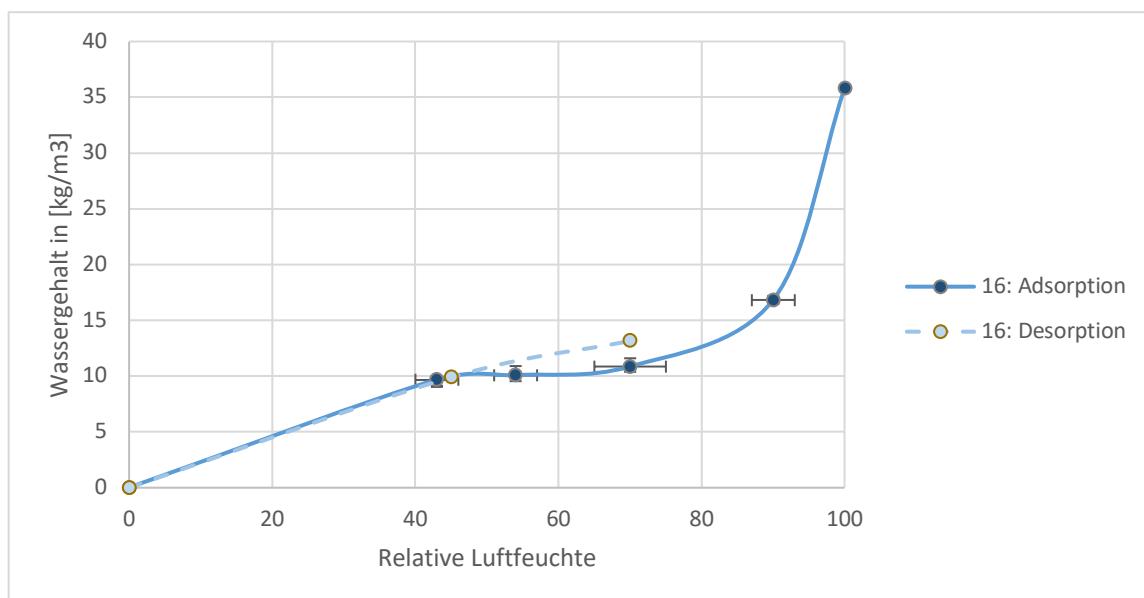
Brettschichtholz tangential #15**Abbildung 15 Vier Baustoffproben #15 a - d**

Eigene Darstellung (Flexeder)



Porentbetonstein # 16**Abbildung 16 Vier Baustoffproben #16 a - d**

Eigene Darstellung (Flexeder)



Ergebnisse der Laborversuche zum hygrothermischen Effekt

Nina Flexeder

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Materialien beziehungsweise Materialkombinationen auf ihre thermische Reaktion bei isothermen Luftfeuchtesprüngen hin untersucht.

Tabelle 1: Im Feuchtesprungversuch untersuchte Materialien beziehungsweise Materialkombinationen

| | |
|---------------------------|---|
| # 3 | Gipskartonplatte |
| # 4 | Gipsfaserplatte |
| # 4 + # 14 | Gipsfaserplatte verputzt |
| # 5 + # 14 | Lehmplatte verputzt |
| # 5 + # 14 + Kalkanstrich | Lehmplatte verputzt mit zusätzlichem Kalkanstrich |
| # 8 | Lehmplatte |
| # 9 | Brettschichtholz tangential |
| # 10 | Brettschichtholz quer |
| # 13 | Holzweichfaserplatte |
| # 13 + # 14 | Holzweichfaserplatte verputzt |
| # 16 | Porenbetonstein |

Eigene Darstellung (Flexeder)

Jedem hier dokumentierten Feuchtesprungversuche geht eine isotherme Entfeuchtung mit rund vier bis sieben Tagen Dauer voraus. Die Messergebnisse wurden gemäß der in Kapitel III beschriebenen Methodik bereinigt. Die dargestellten Thermographien dokumentieren die Wärmeverteilung und wurden innerhalb des Messstunden zeitlich verteilt aufgenommen. Die erste zeigt jeweils den Zustand etwa 30 Sekunden unmittelbar nach dem Luftfeuchtesprung. Durch eine thermographische Untersuchung der Oberflächen nach ausreichender isothermer und isobarer Lagerung wurde die Ähnlichkeit der einzelnen Oberflächen überprüft. Es zeigten sich große Übereinstimmungen der Emissivitäten von Probekörperoberflächen mit jenen der abgeklebten Referenzkörperoberfläche; mit Ausnahme der Kalkoberfläche. Beim Vergleich der hygrothermischen Masse verschiedener Einzelmessungen untereinander sind die unterschiedlichen Luftfeuchtesprünge sowie Zeiträume zu beachten. Alle folgenden Fotografien, Thermographien (Abbildung 18 - Abbildung 39) sowie die zugehörigen Auswertungen der Experimente sind eigene Darstellungen (Flexeder).

Abbildung 17: Zeitliche Abfolge der im Folgenden dargestellten Thermographien

| | | |
|---|---|---|
| a | b | c |
| d | e | f |
| g | h | i |

Eigene Darstellung (Flexeder)

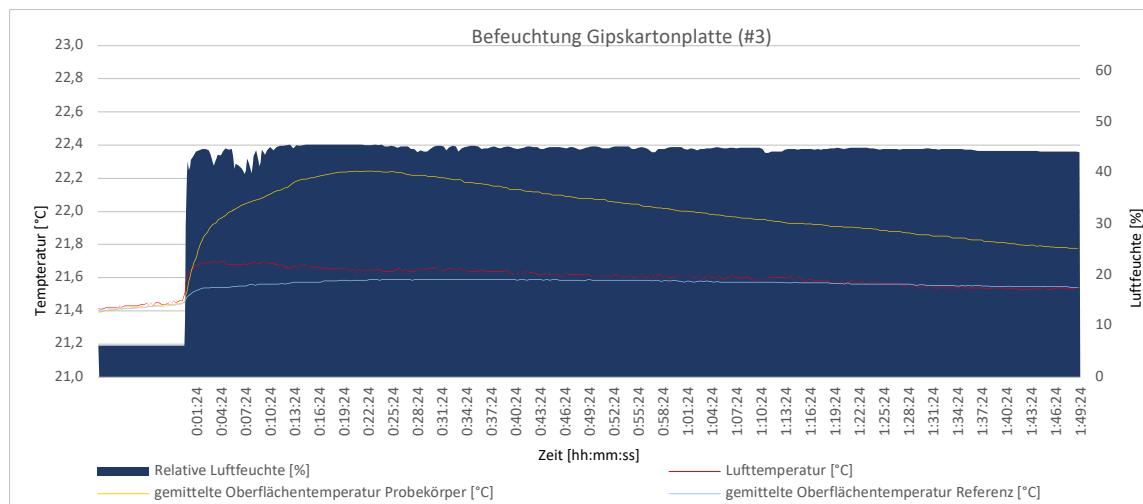
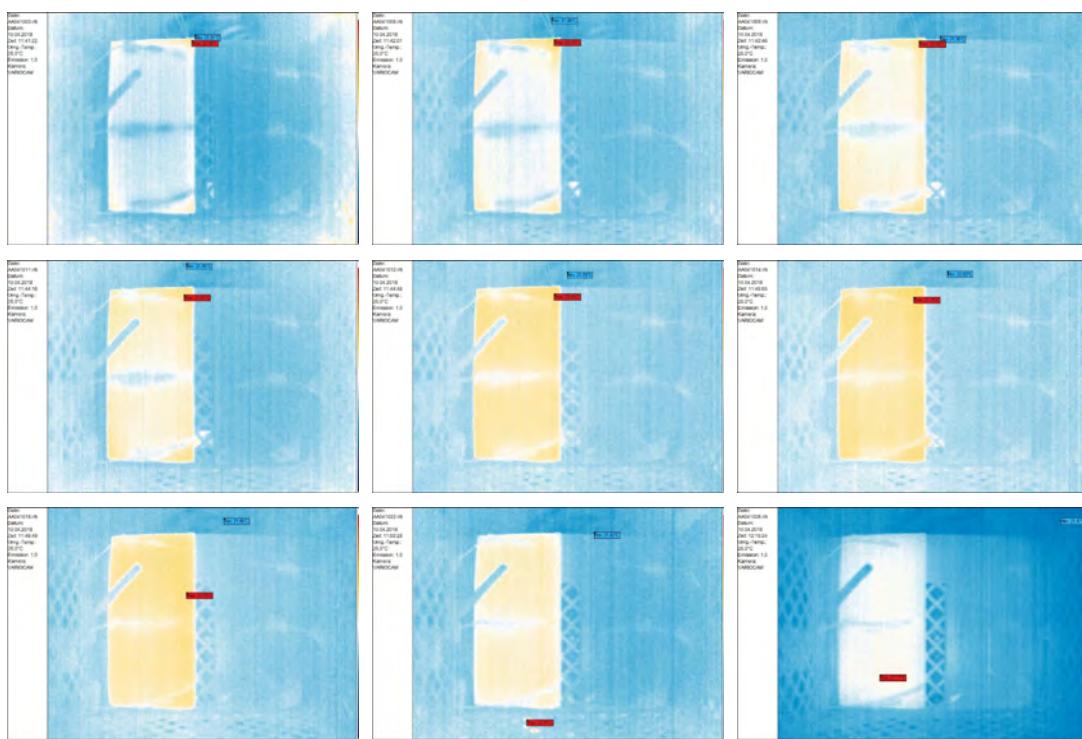
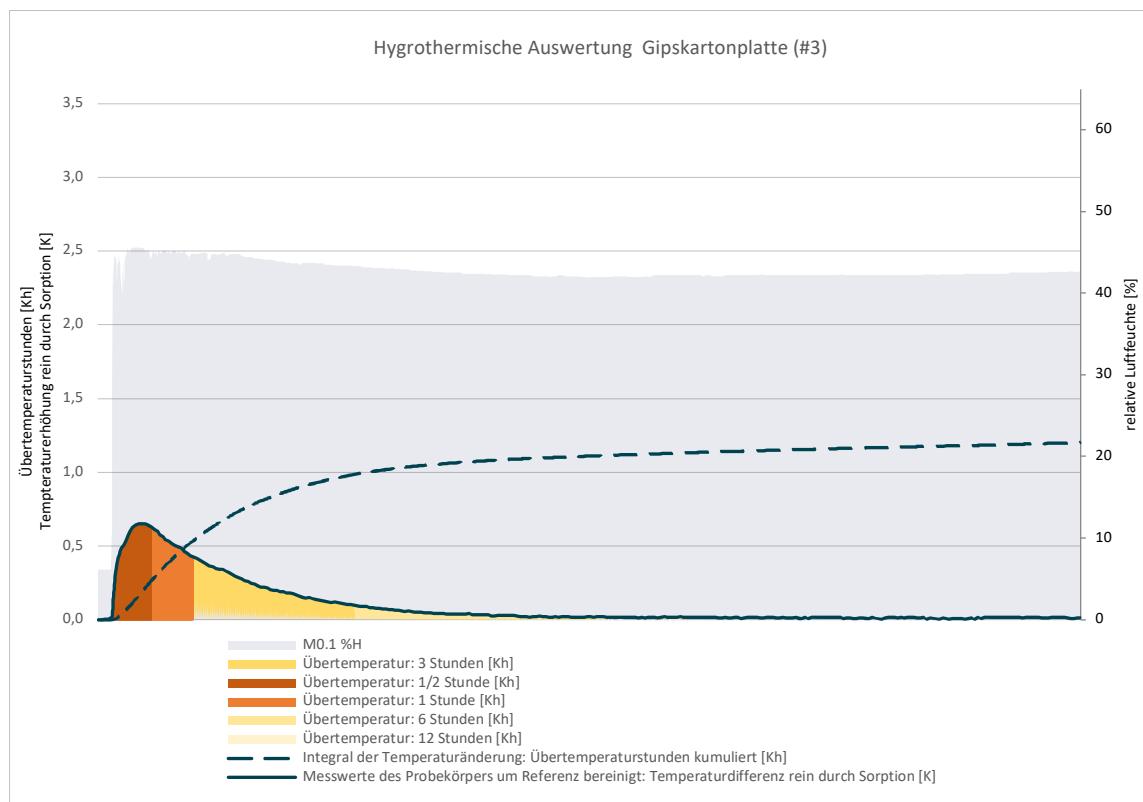
Gipskartonplatte #3**Abbildung 18 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Gipskartonplatte #3**

Abbildung 19 Probekörper links, Referenzkörper rechts



Gipsfaserplatte # 4

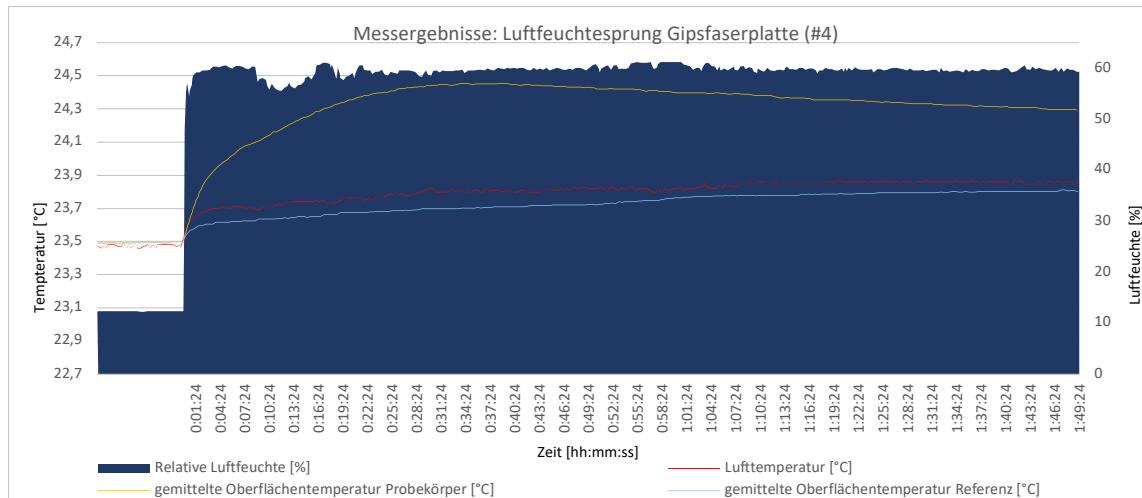


Abbildung 20 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Gipsfaserplatte #4

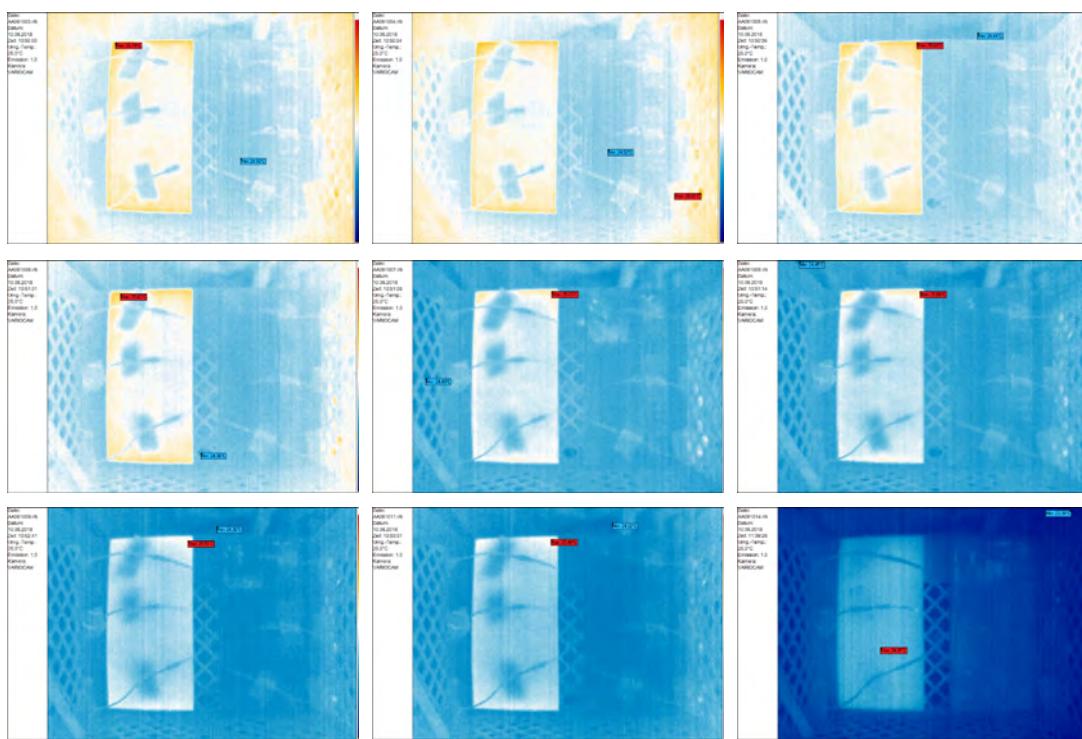
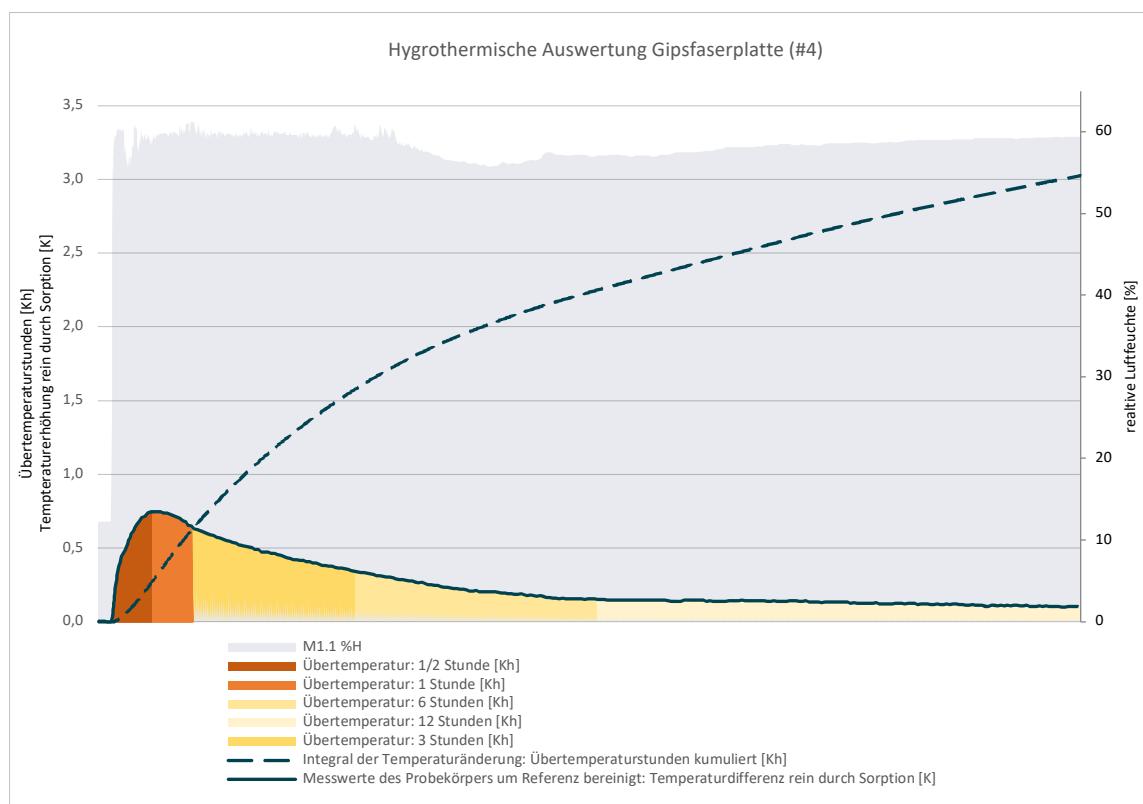


Abbildung 21 Probekörper links, Referenzkörper rechts

Gipsfaserplatte verputzt #4 + #14

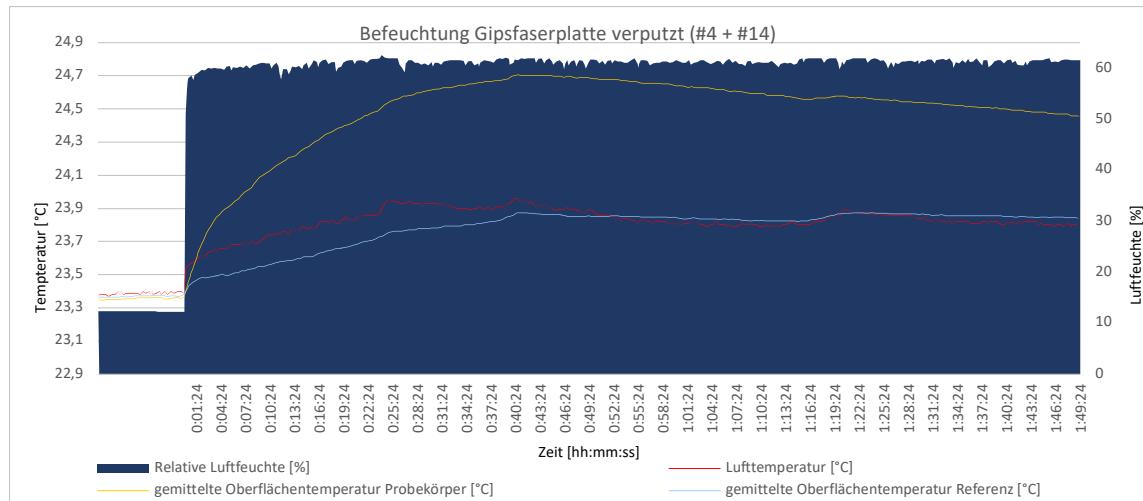


Abbildung 22 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #4 + #14

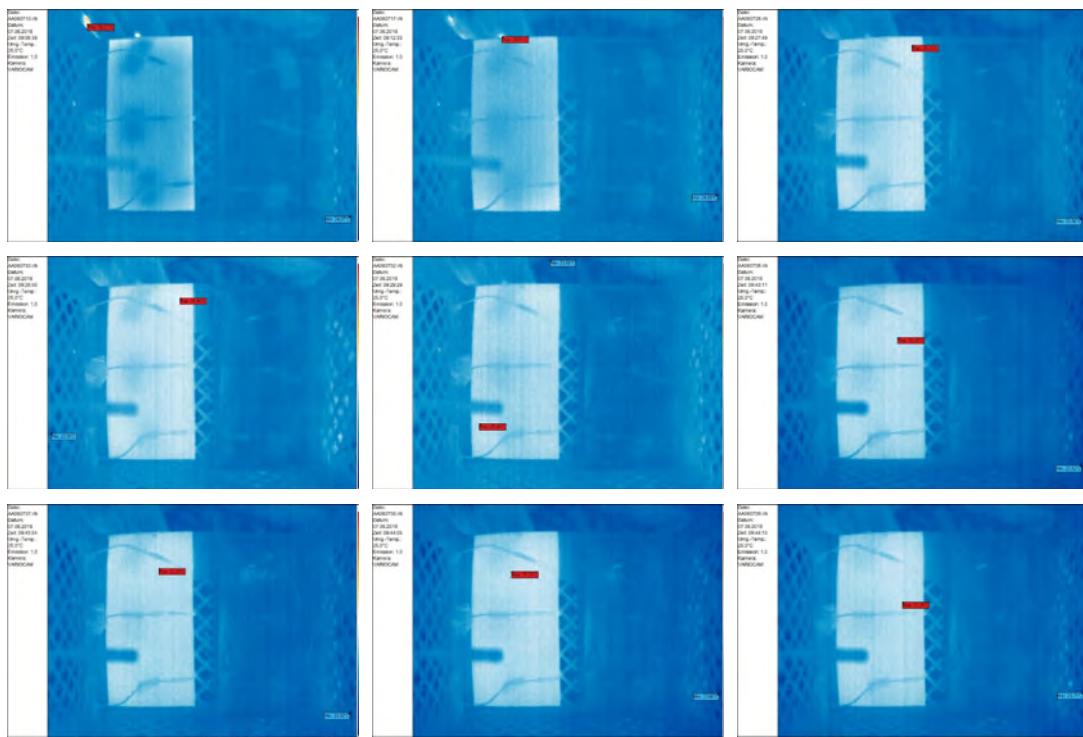
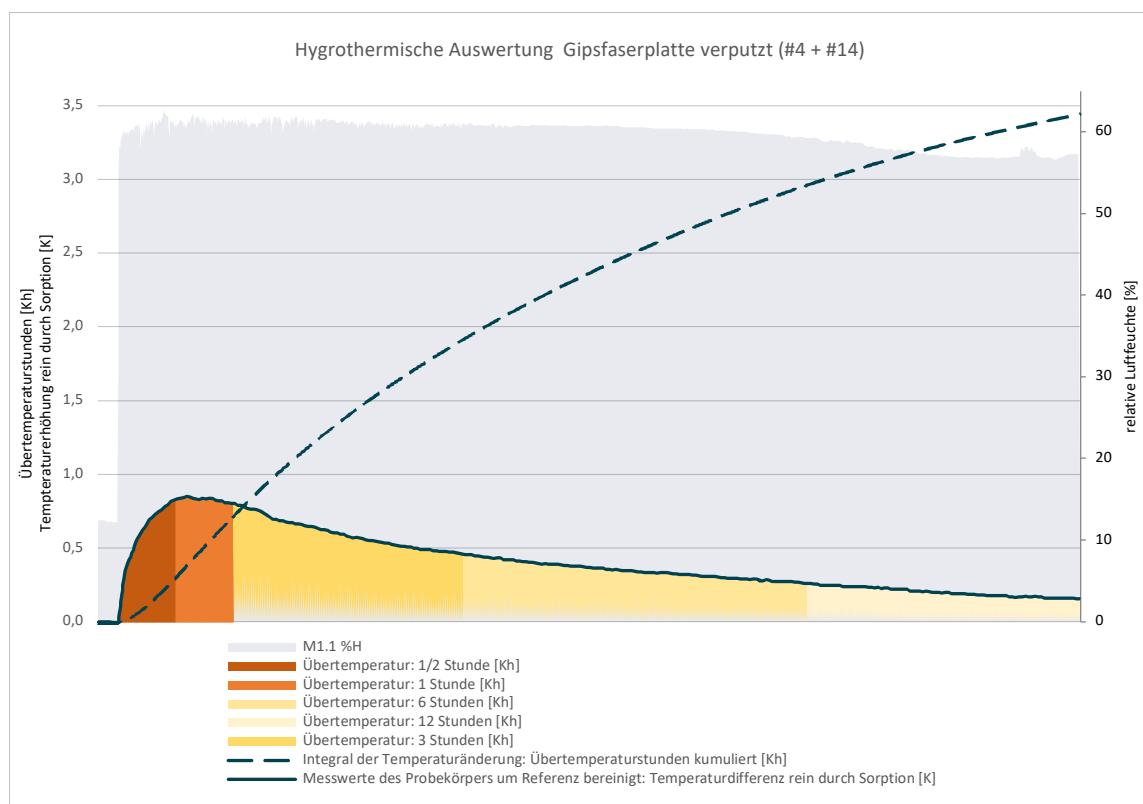
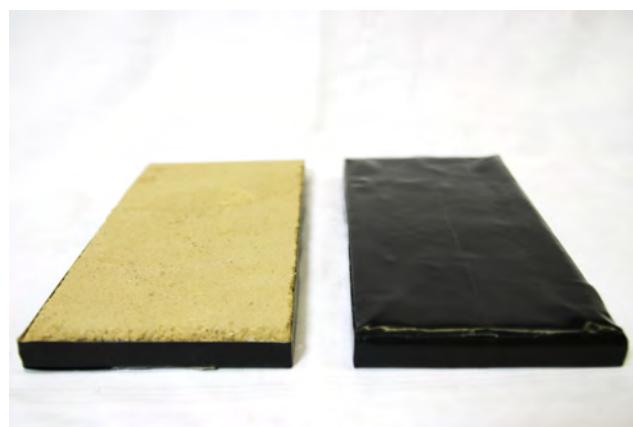


Abbildung 23 Probekörper links, Referenzkörper rechts



Lehmplatte verputzt #5 + #14

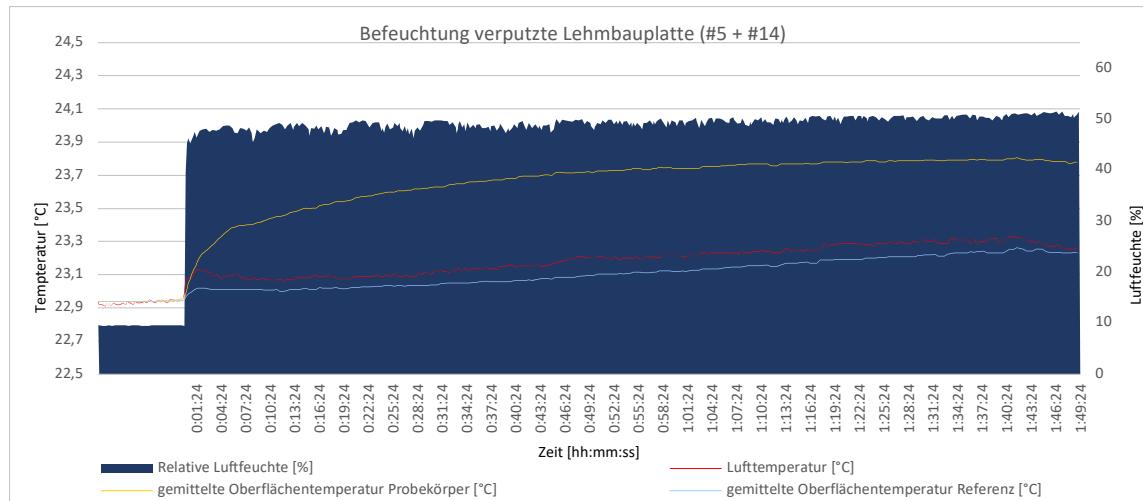


Abbildung 24 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Lehmplatte #5 + #14

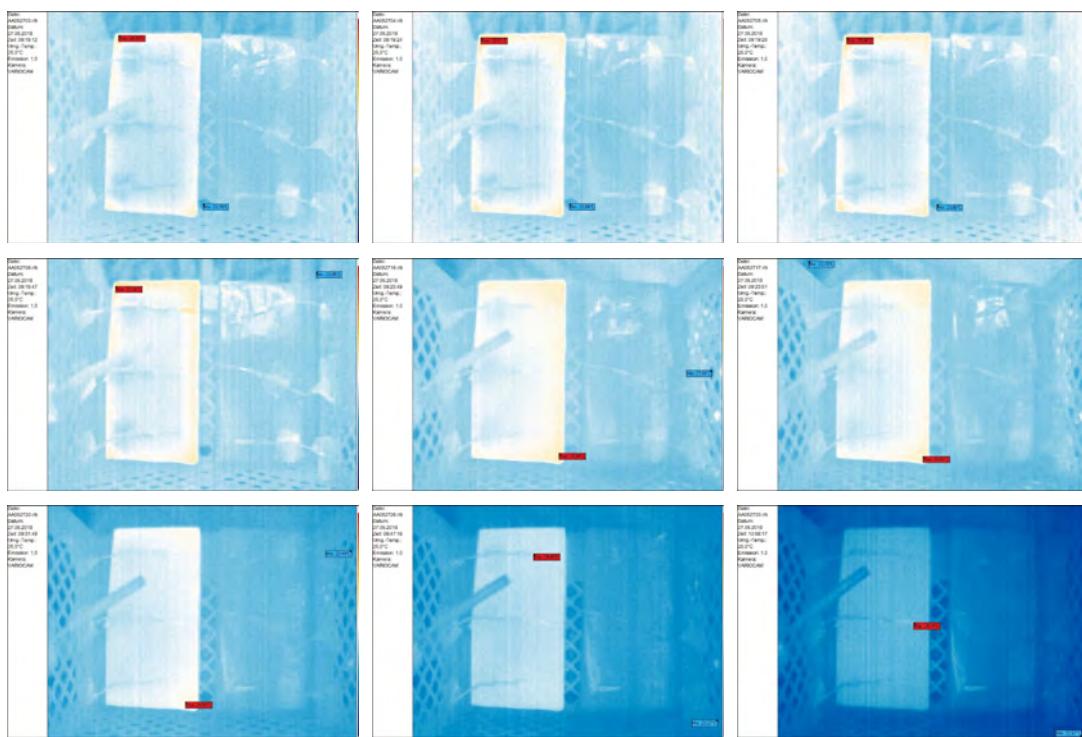
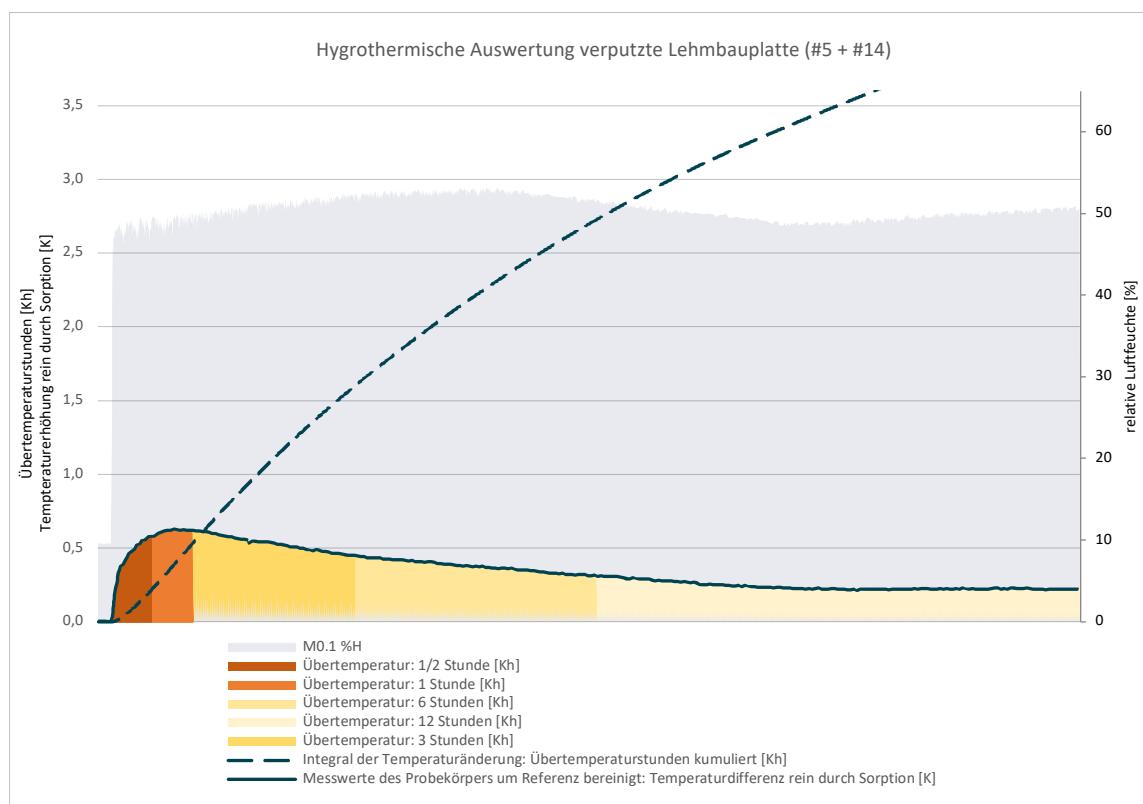


Abbildung 25 Probekörper links, Referenzkörper rechts

Lehmplatte verputzt mit zusätzlichem Kalkanstrich #5 + #14 + Kalk

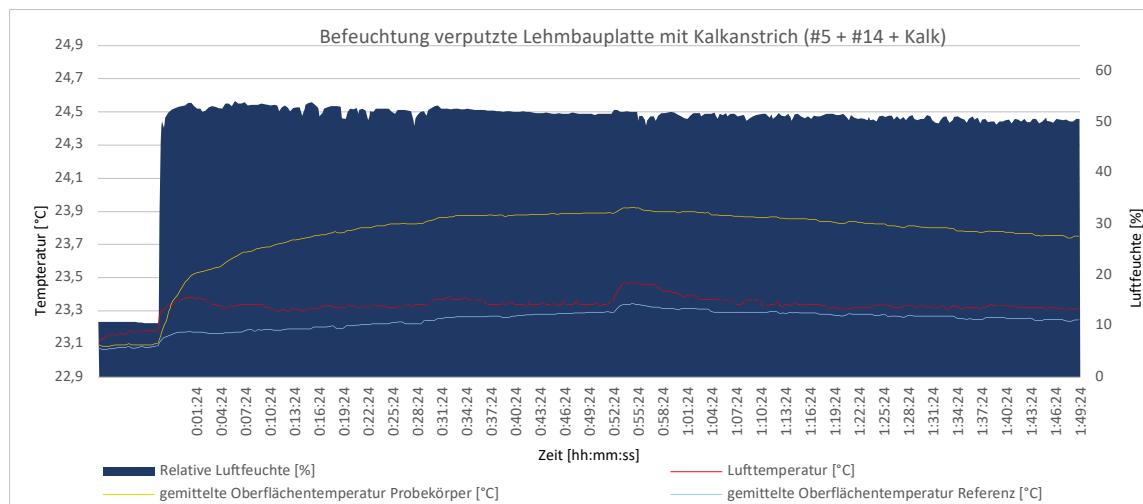


Abbildung 26 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #5 + #14 + Kalkanstrich

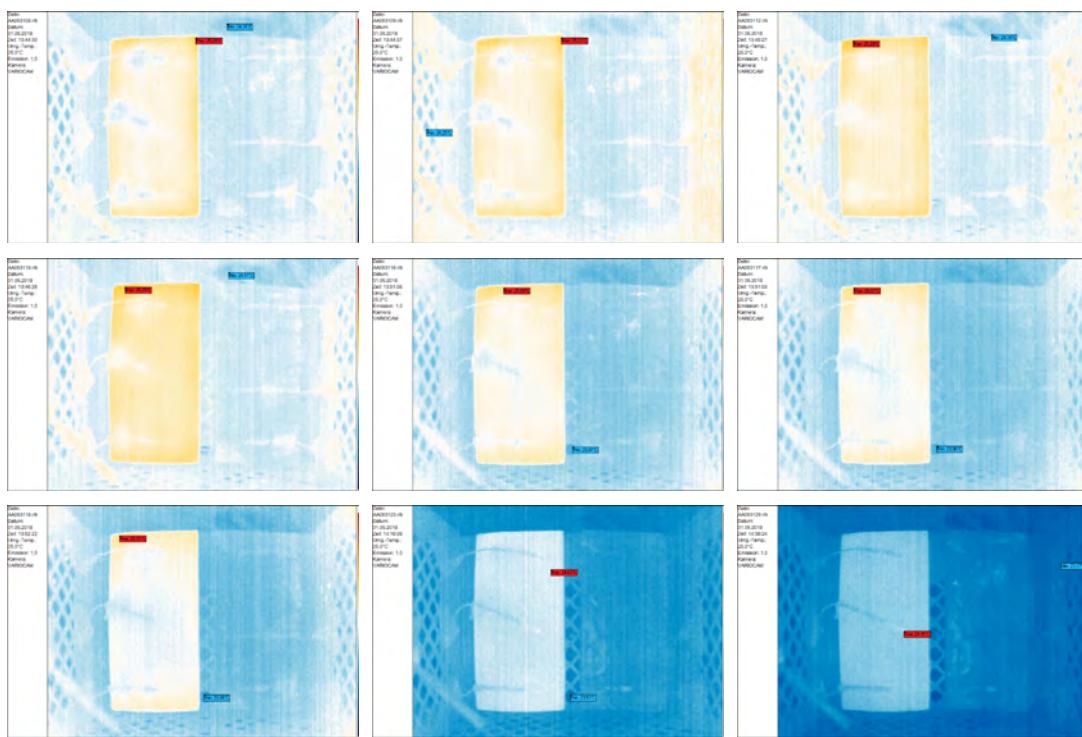
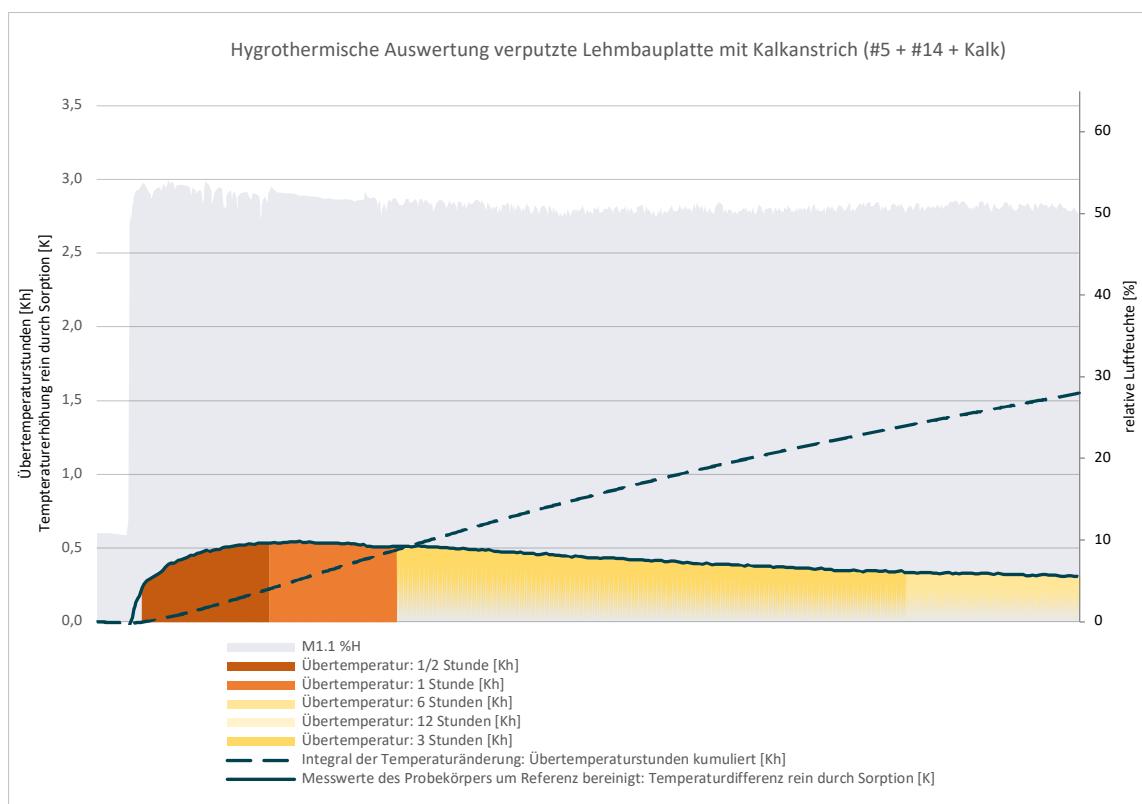


Abbildung 27 Probekörper links, Referenzkörper rechts

Lehmabauplatte #8

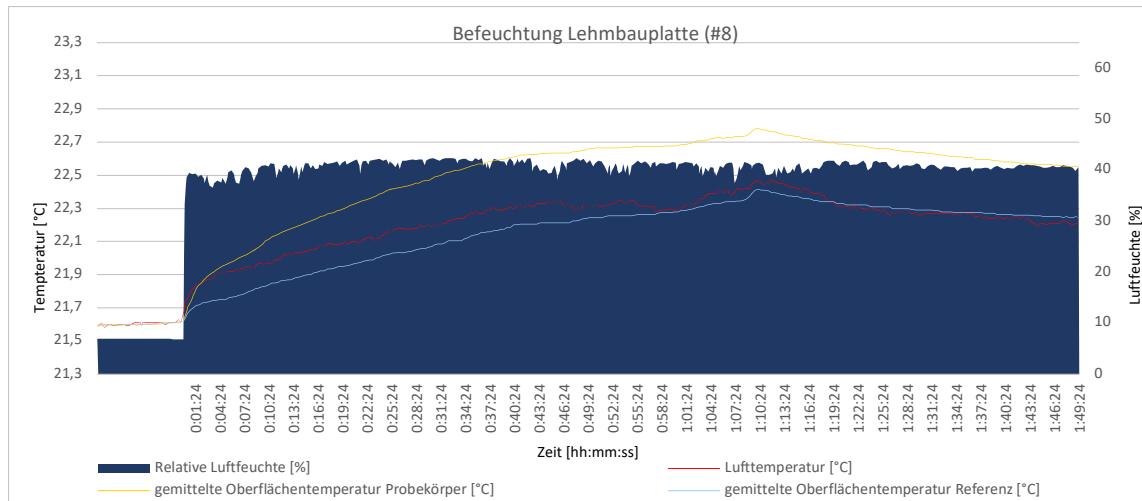


Abbildung 28 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Lehmbauplatte #8

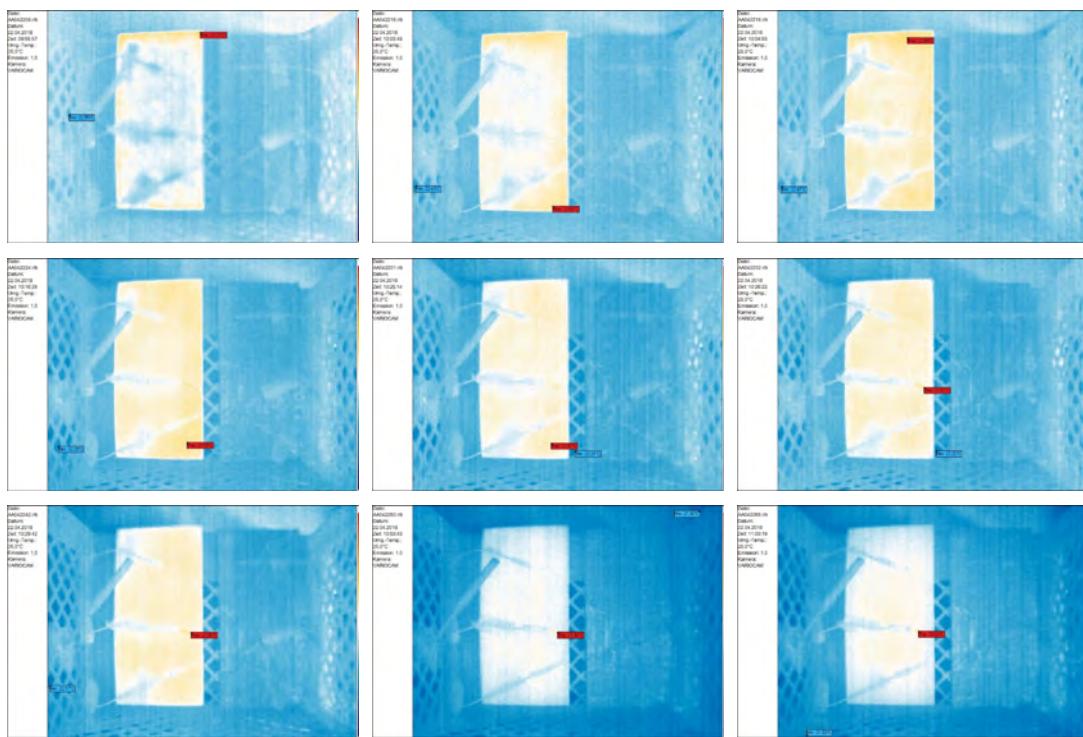
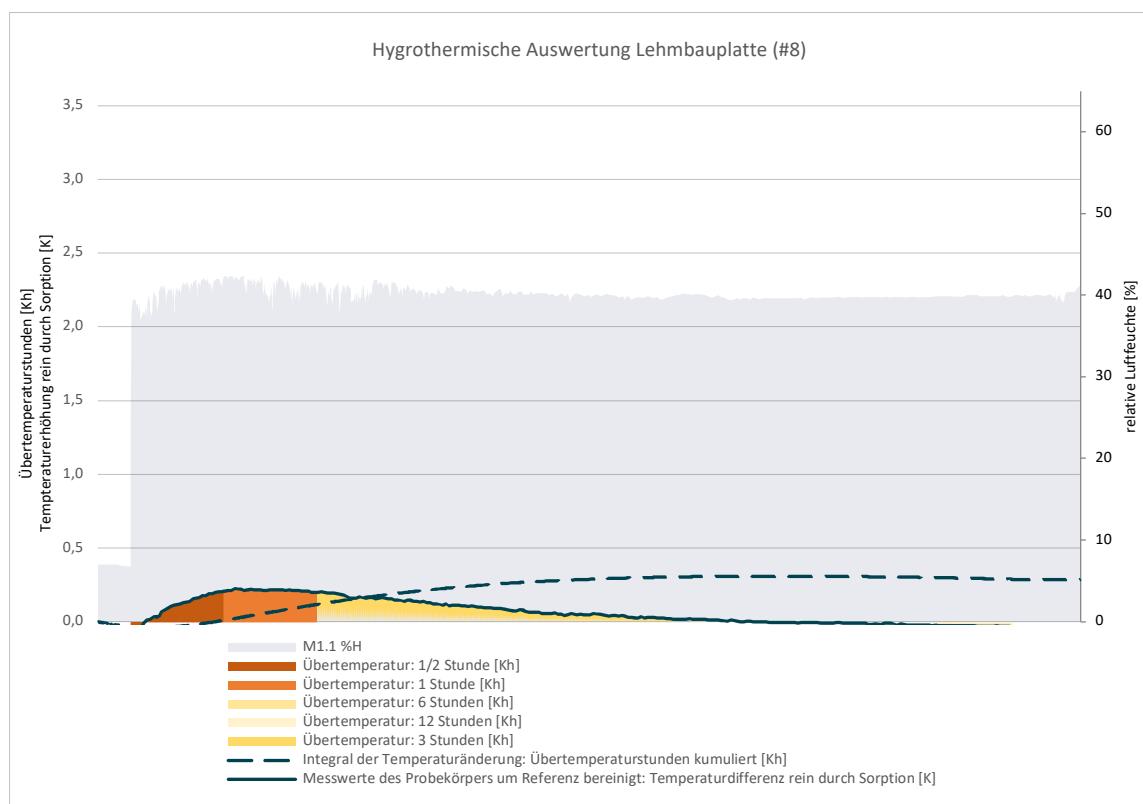
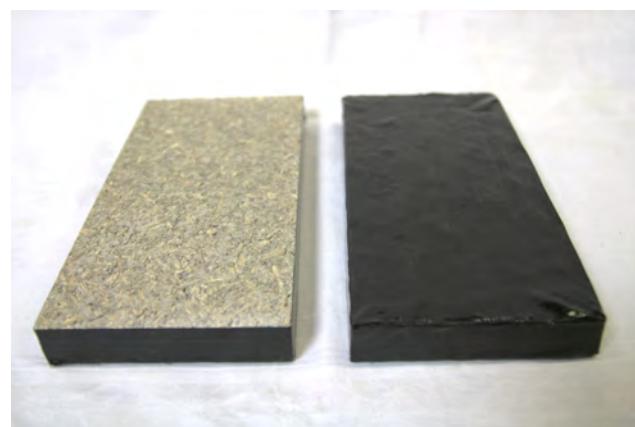


Abbildung 29 Probekörper links, Referenzkörper rechts



Brettschichtholz tangential #9

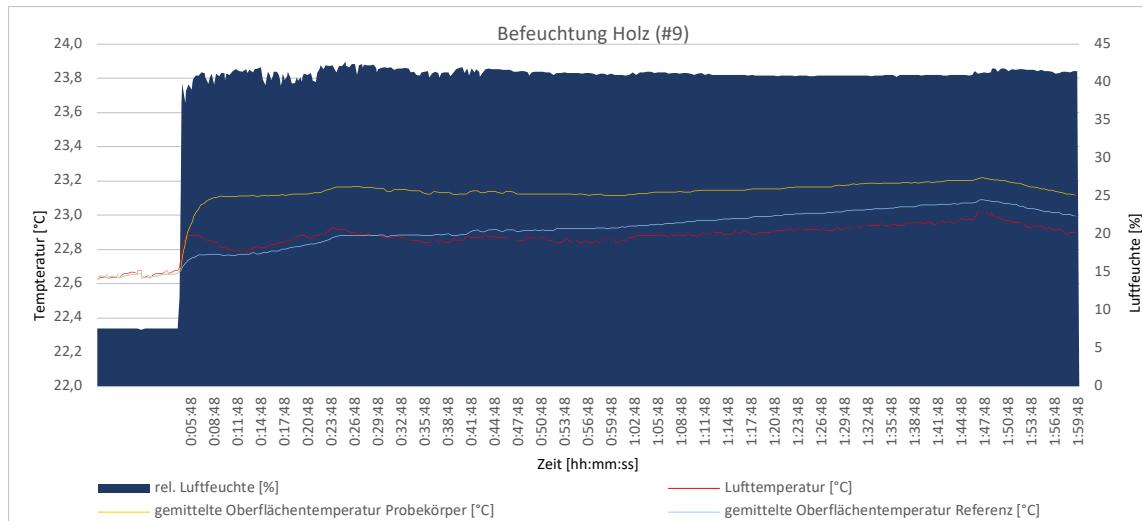


Abbildung 30 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit tangentialem Brettschichtholz #9

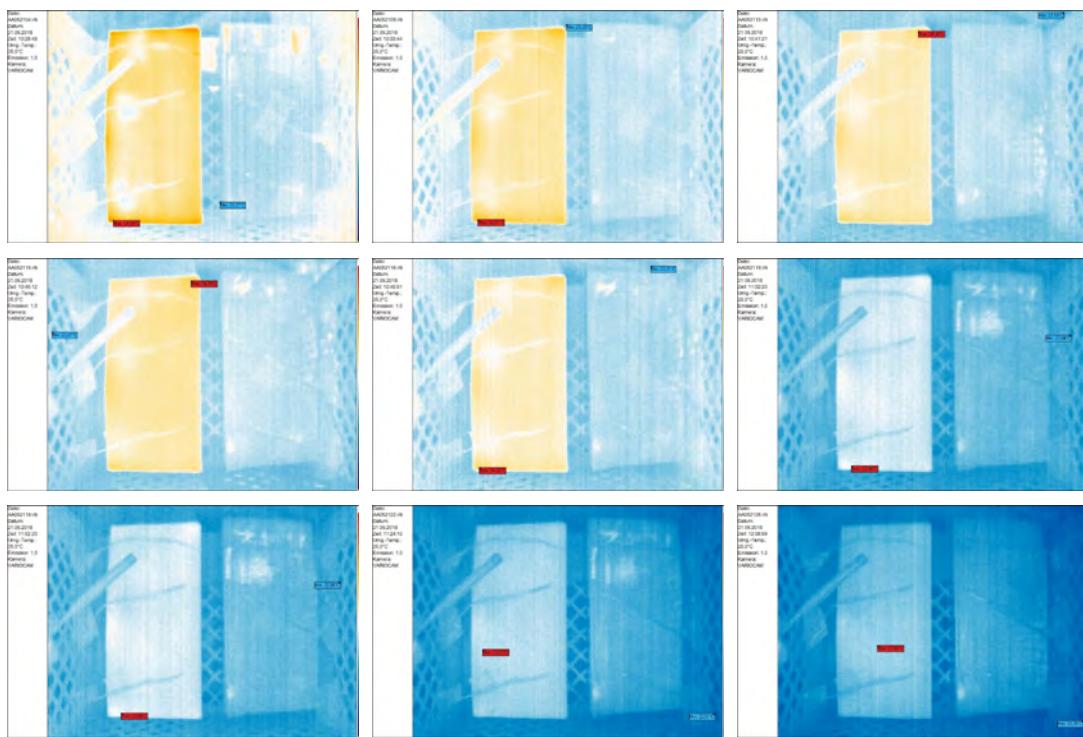
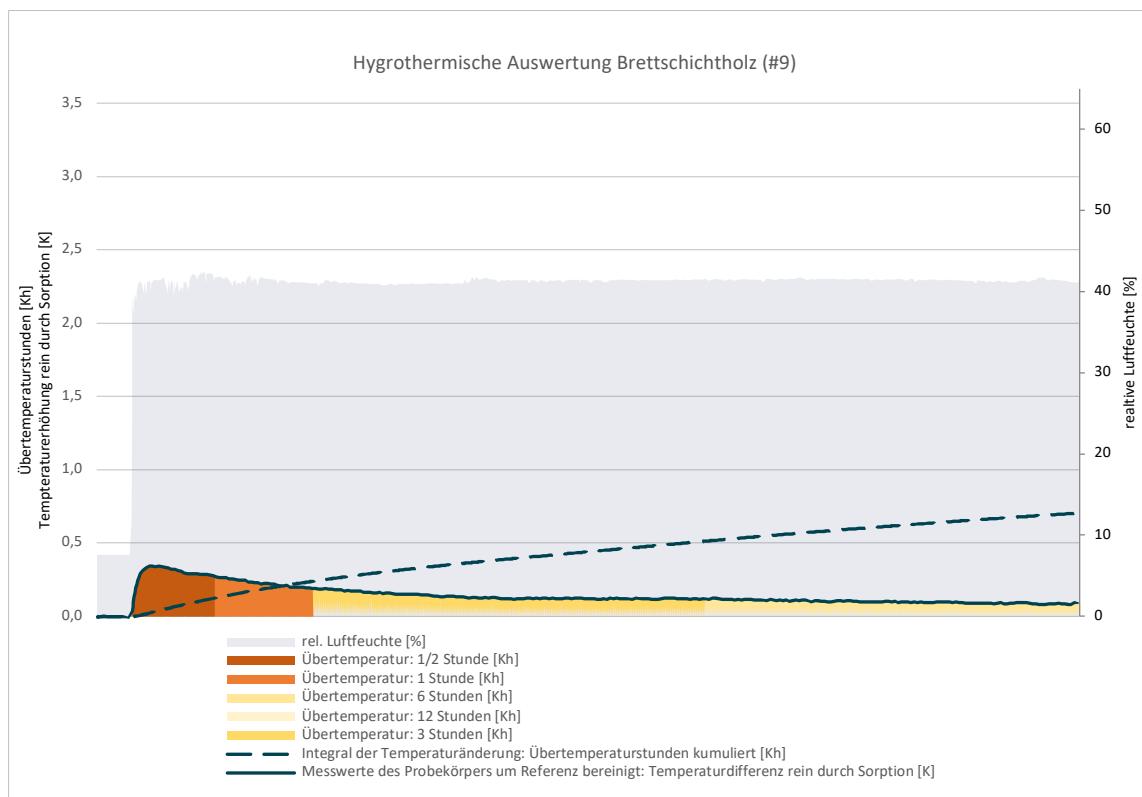


Abbildung 31 Probekörper links, Referenzkörper rechts

Brettschichtholz quer #10

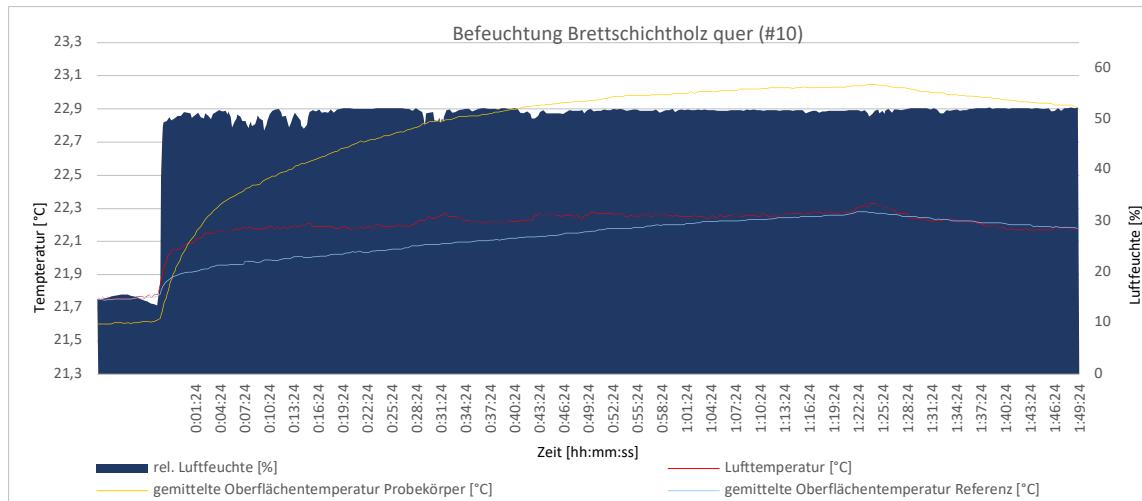


Abbildung 32 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit stirnseitigem Brettschichtholz #10

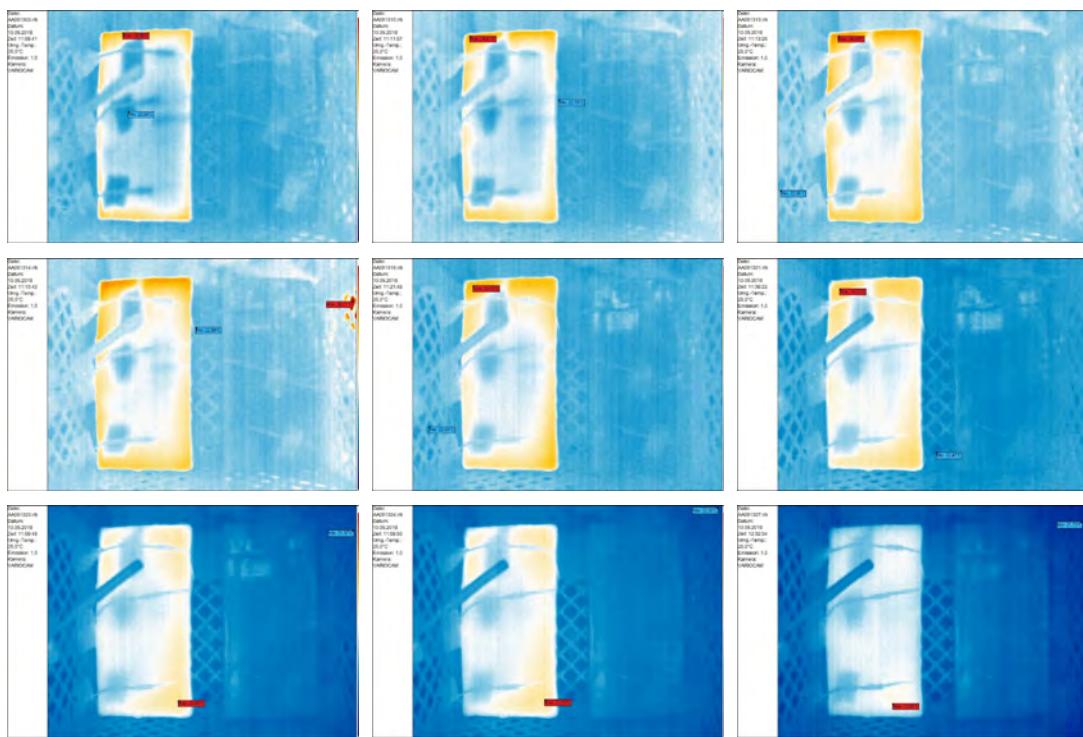
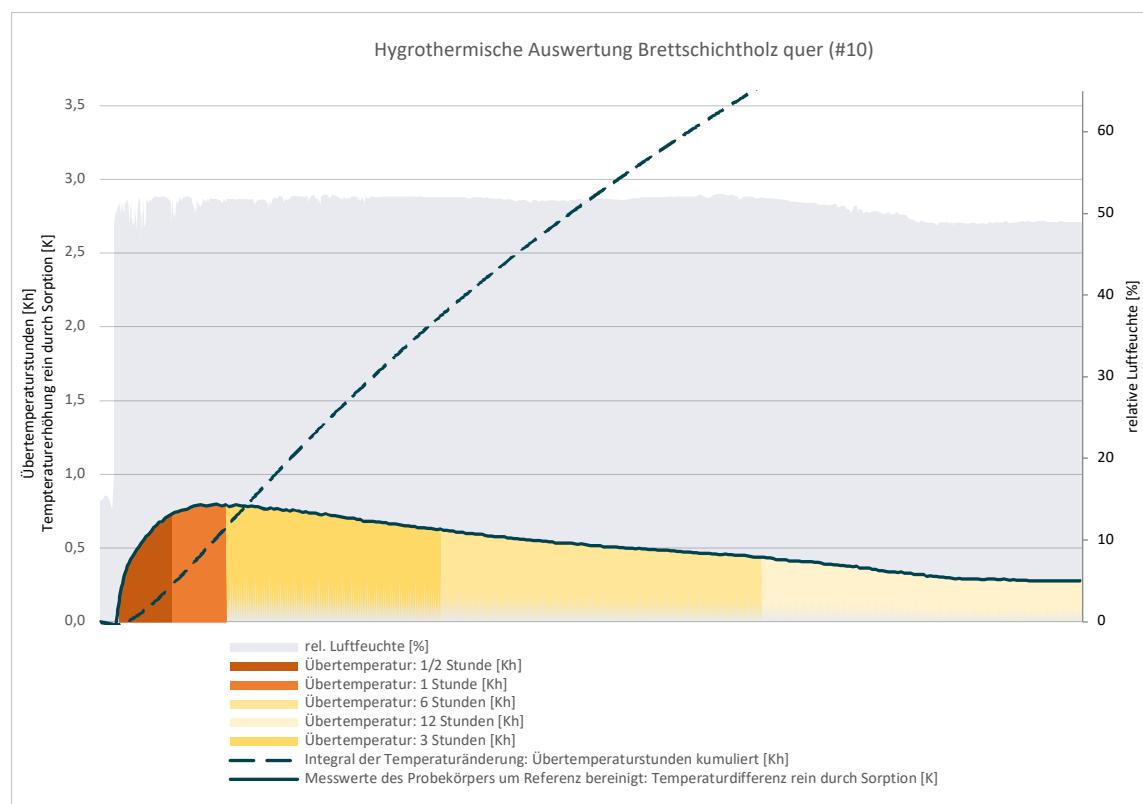


Abbildung 33 Probekörper links, Referenzkörper rechts



Holzweichfaserplatte #13

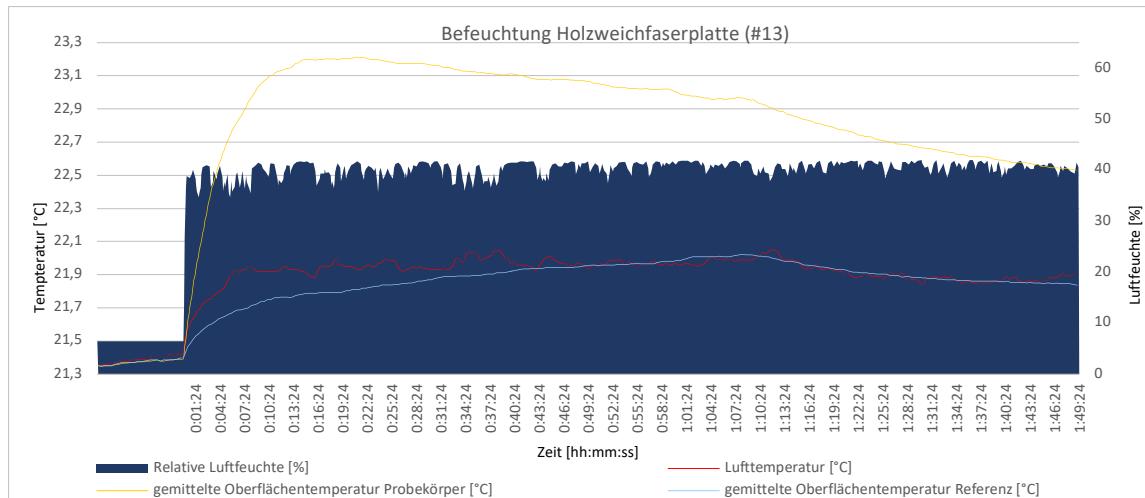


Abbildung 34 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Holzweichfaserplatte #13

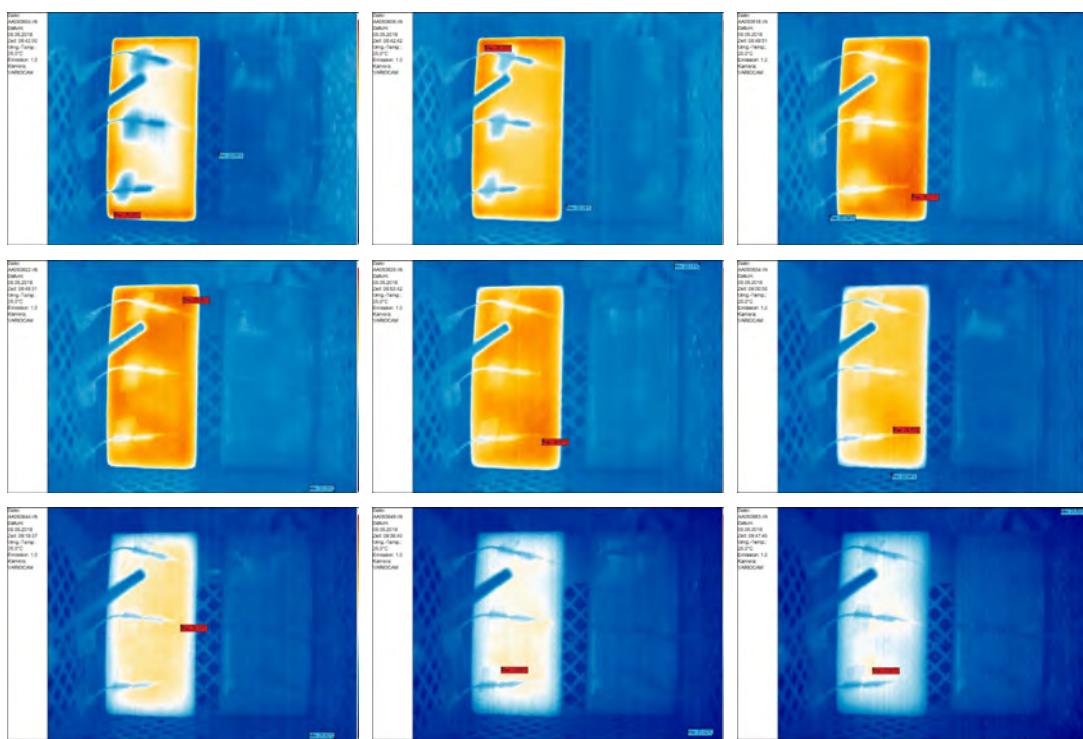
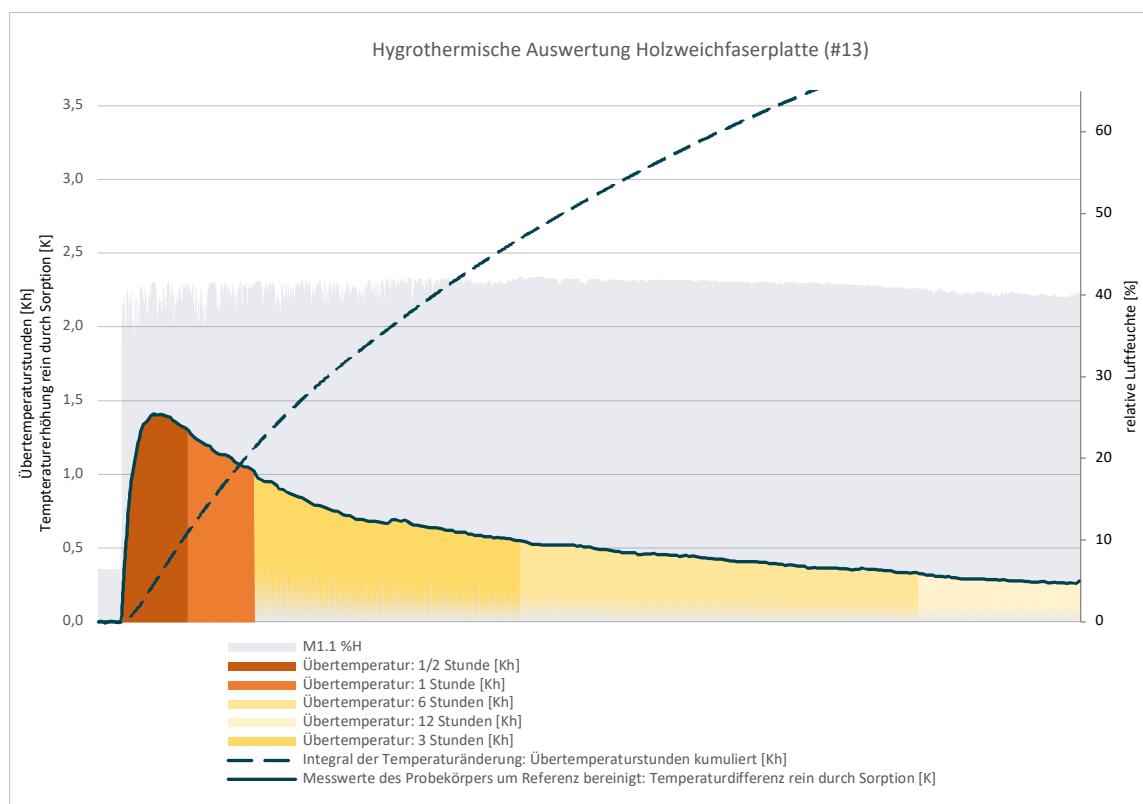


Abbildung 35 Probekörper links, Referenzkörper rechts

Holzweichfaserplatte verputzt #13 + #14

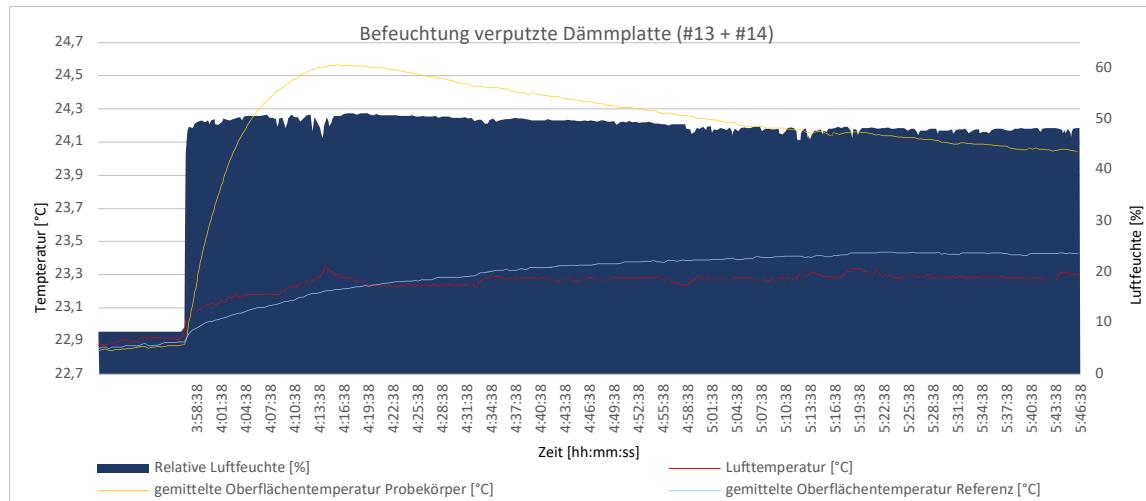


Abbildung 36 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit lehmverputzter Holzweichfaserplatte (#13 + #14)

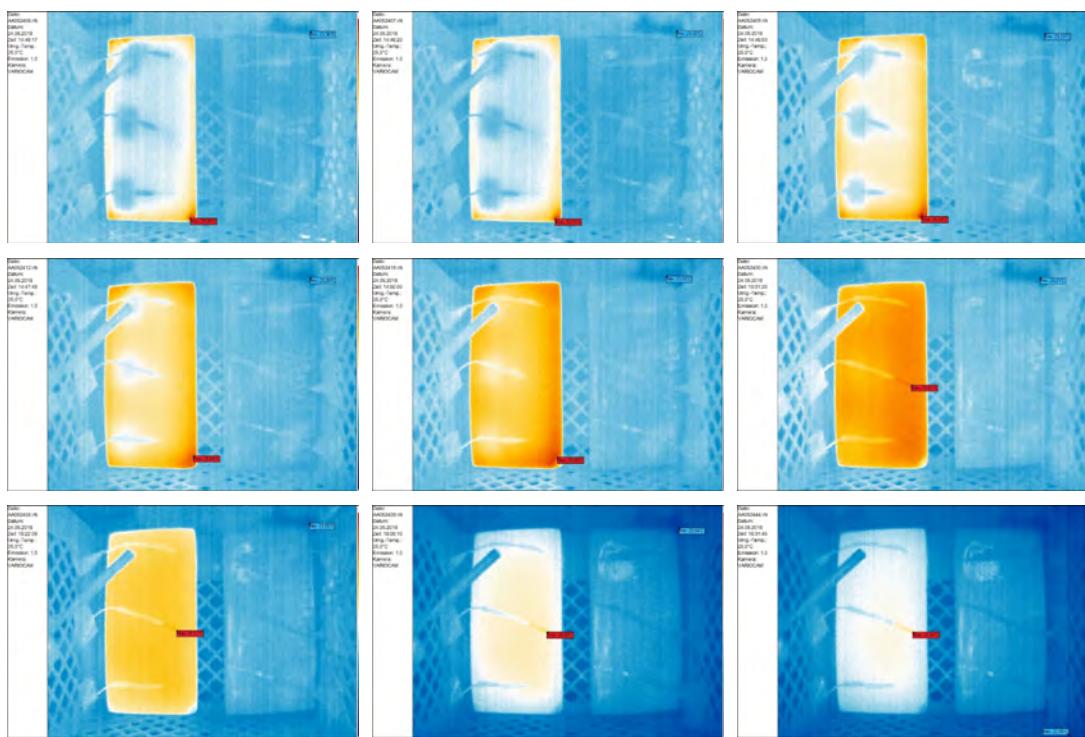
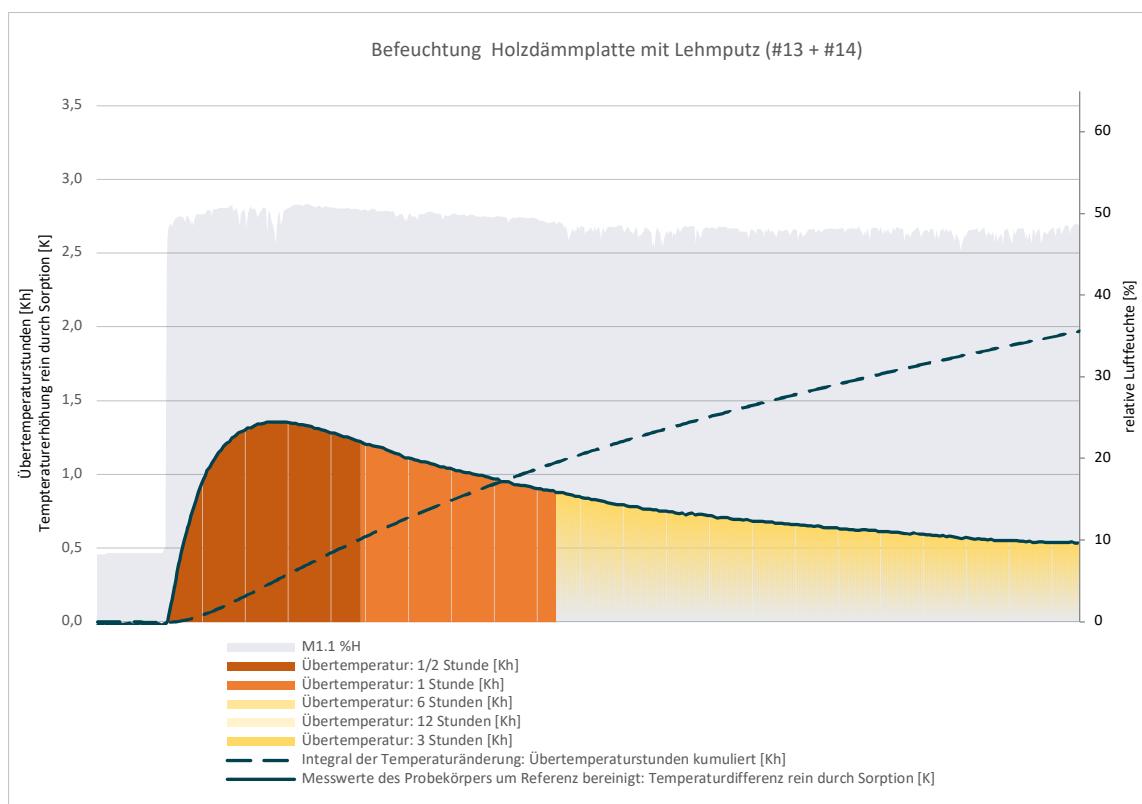


Abbildung 37 Probekörper links, Referenzkörper rechts



Porenbetonstein #16

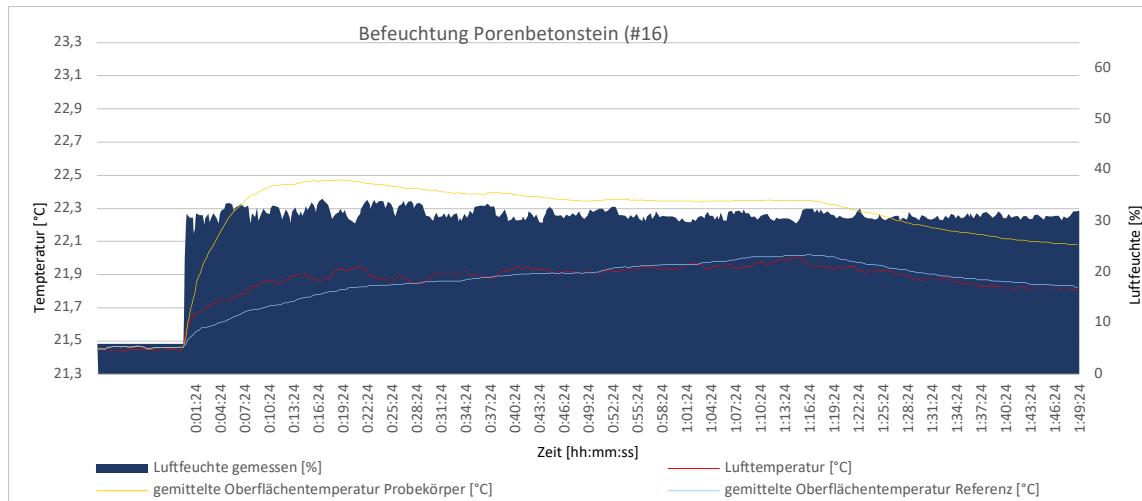


Abbildung 38 a-i: Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Porenbetonstein #16

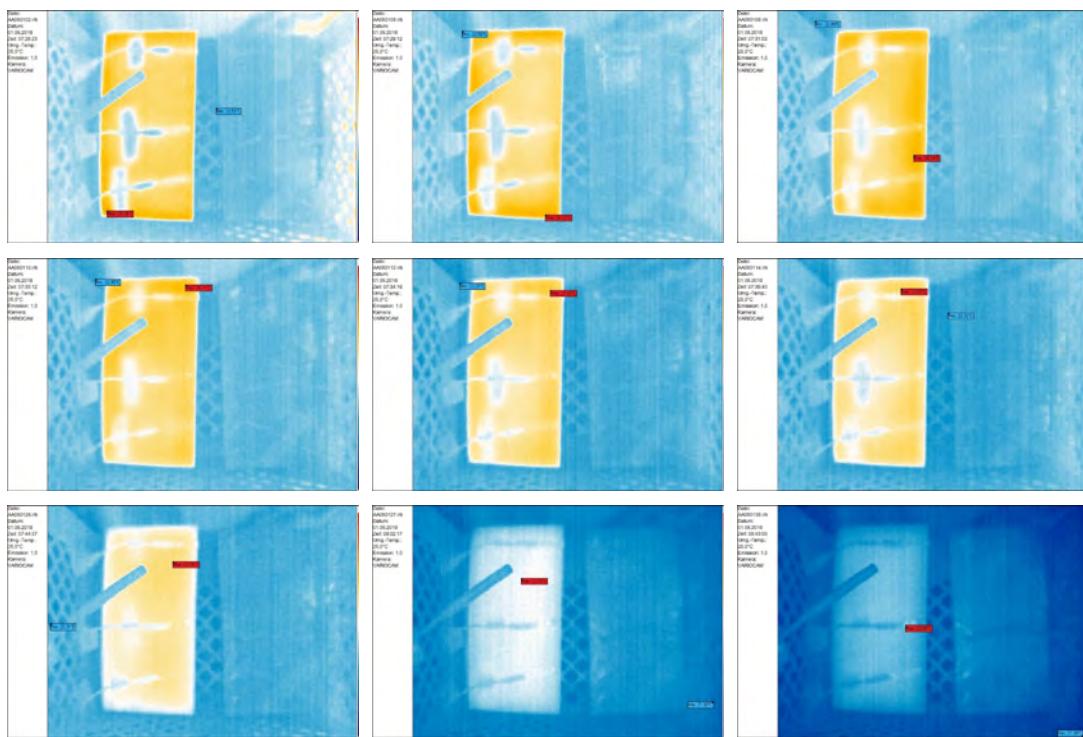
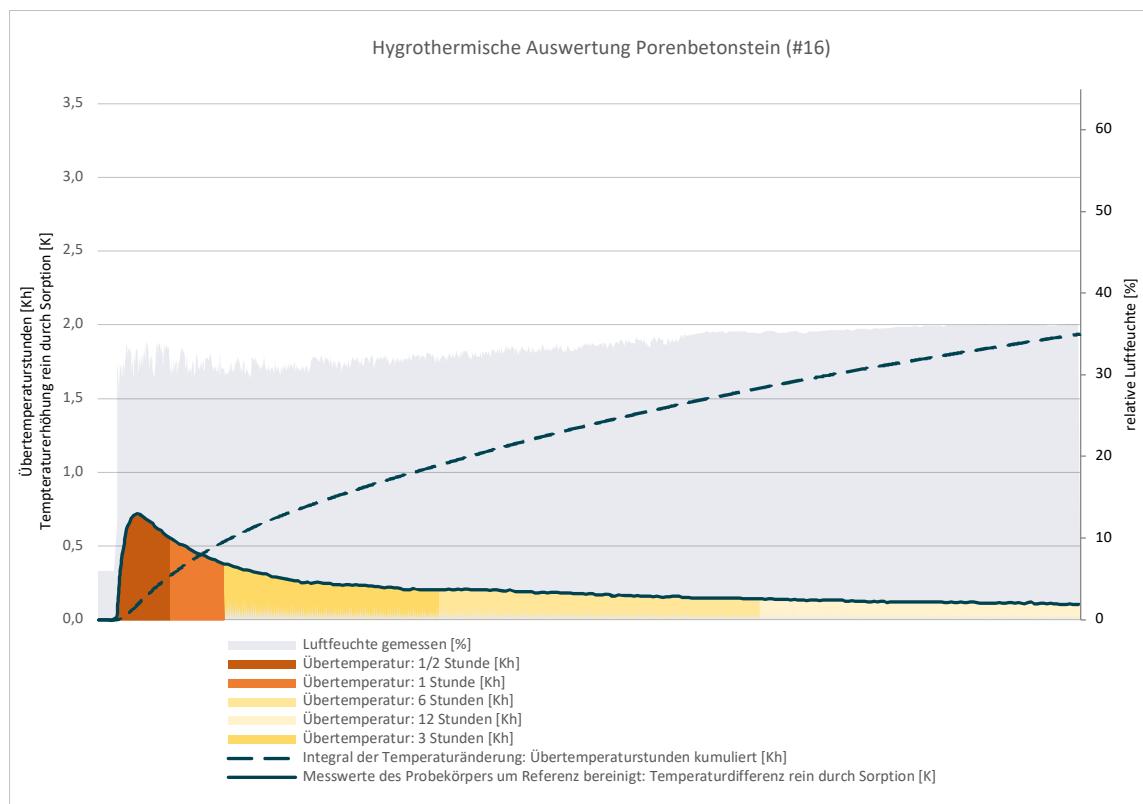


Abbildung 39 Probekörper links, Referenzkörper rechts

Anlagen zu Kapitel IV – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche

Details zur Messtechnik und der in Kubus Ost und West verbauten Elektrotechnik

Michael Kamml

Auswahl des Messsystems für die Temperaturmessung

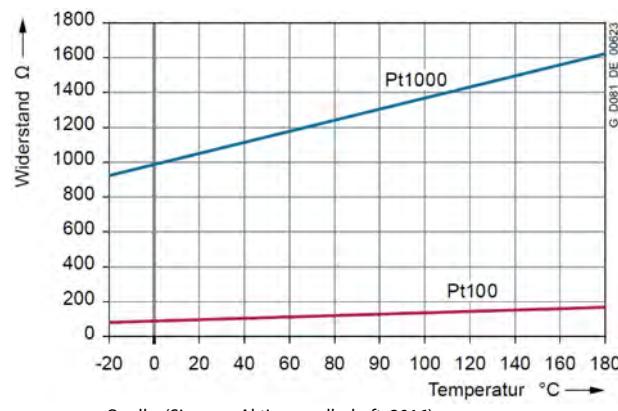
Als Anforderungen an die Temperaturmessungen ist eine hohe Genauigkeit ($\pm 0,1 \text{ K}$) sowie ein Messbereich von $0 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$ festgelegt worden. Weiterhin berücksichtigt werden verschiedene Einflüsse, welche die Messungen verfälschen können. So wurde einerseits auf äußere Einflüsse geachtet und andererseits auch die verschiedenen Fehlerquellen berücksichtigt. Betrachtet wurden die folgenden Elemente.

- Sensortyp
- Leitungslängen
- Messschaltung
- Analog- Digitalwandler
- Langzeit Messverhalten
- Sensorelement Veränderung
- Wärmeeintrag durch Leitungen
- Wärmeeintrag durch Messstrom
- Bauform des Sensors und der Befestigung

Auswahl

Bei den PT-Sensoren ist die Messgröße der elektrische Widerstand. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, steigt die Widerstandskennlinie des Pt 1000 deutlich steiler an als die des Pt 100, was bei gleicher Temperaturdifferenz eine höhere Widerstandsänderung zur Folge hat. Bei einem höheren Widerstand ist der Stromfluss (bei gleicher Spannung) geringer, was sich positiv auf die Eigenerwärmung auswirkt.

Abbildung 40 Widerstandskennline Pt 1000 und Pt 100



Quelle: (Siemens Aktiengesellschaft, 2016)

Weiterhin betrachtet wurde die Widerstandsmessung mit Thermoelementen. Diese geben als Messgröße eine Spannung aus. Diese eignen sich für Messungen bei hohen Temperaturen oder hohen

Temperaturdifferenzen. Diese sind für das Forschungsprojekt nicht geeignet, weil diese im geforderten Temperaturbereich eine geringere Genauigkeit aufweisen.

Verbaut wurden PT1000 „Heraeus M 222, Platin-Temperatursensoren nach DIN EN 60751“ mit einer Genauigkeitsklasse F 0,1 (Klasse 1/3 B)

Tabelle 2: DIN EN 60751:2008 S.15 Genauigkeitsklassen für Messwiderstände

| Für drahtgewickelte Widerstände | | Für Schicht-Widerstände | | Grenzabweichung ^a °C |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Klasse | Gültigkeitsbereich °C | Klasse | Gültigkeitsbereich °C | |
| W 0,1 | -100 bis +350 | F 0,1 | 0 bis +150 | ± (0,1 + 0,0017 t) |
| W 0,15 | -100 bis +450 | F 0,15 | -30 bis +300 | ± (0,15 + 0,002 t) |
| W 0,3 | -196 bis +660 | F 0,3 | -50 bis +500 | ± (0,3 + 0,005 t) |
| W 0,6 | -196 bis +660 | F 0,6 | -50 bis +600 | ± (0,6 + 0,01 t) |

^a | t | = Betrag der Temperatur in °C ohne Berücksichtigung des Vorzeichens.

Quelle: (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009, p. 12)

Tabelle 3: Angaben für Berechnungen des Leitungswiderstands

| Formelzeichen | Bezeichnung | Rechenwert | Einheit | Quelle |
|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ρ | spezifischer Widerstand | 0,0178 | $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ | (Bastian et al., 2008, p. 38) |
| l | Leitungslänge | 2 x 5 m | m | |
| A | Leitungsquerschnitt | 2 x 0,22 mm ² | mm ² | |
| TK | Temperaturkoeffizient | 3850 ppm/K | ppm/K | (Heraeus, 2019, p. 1) |
| R ₀ | Widerstand bei 0 °C | 1000 Ω | Ω | |
| R | Widerstand | | Ω | |

Der Leitungswiderstand durch die Leitung berechnet sich nachfolgender Formel:

$$R = \rho * \frac{l}{A}$$

$$R = 0,0178 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} * \frac{10 m}{0,22 mm^2}$$

$$R = 0,81 \Omega$$

Messsystem mit: PT1000 und T=20 °C

Aus Kennlinie PT1000 +10 °C 1039,00 Ohm
+20 °C 1077,90 Ohm

$$\Delta T = \frac{R_{Leitung}}{TK \cdot R_0} * R_{Leitung}$$

$$\Delta T = \frac{0,81 \Omega}{3850 \frac{ppm}{K} \cdot 1000 \Omega}$$

$$\Delta T = 0,21 \text{ K}$$

Aus der Berechnung wird deutlich, die Abweichung durch den Leiterwiderstand ist nicht zu vernachlässigen.

Konstante Temperaturabweichung. → Möglichkeit der Kalibrierung, der Berechnung und Korrektur der Messwerte oder Auswahl einer geeigneten Messschaltung.

Messschaltung

Als mögliche Messschaltung gibt es die zwei, drei oder Vierleiterschaltung. Bei der Zweileiterschaltung sind die Leitungswiderstände vollständig im Messwert enthalten. Zudem wirken sich Temperaturänderungen der Leiter auch auf das Messergebnis aus. Bei der Dreileiterschaltung wird eine Leitung durch eine gemeinsame Zuleitung eingespart. Dies ist insbesondere bei großen Kabellängen wichtig. Bei der Vierleiterschaltung werden durch eigene Messleitungen und einem nahezu gegen unendlich gehenden Innenwiderstands des Messgeräts die Einflüsse der Leitungswiderstände vollständig ausgeschlossen (Bergmann, 1996, pp. 359–361).

Gewählt wurde eine Vierleiterschaltung, um individuelle Kompensationsrechnungen des Leitungswiderstands zu vermeiden.

Analog Digitalwandler

Ausgewählt: Tinkerforge PTC Bricklet 2.0. Unterstützt werden Pt 100 und Pt 1000 Sensoren mögliche Messschaltungen Typ zwei, drei oder Vierleiter. Als Wandler wird ein MAX3186 eingesetzt.

Tabelle 4: Daten des Analog Digital Wandlers

| Eigenschaft | Wert | Auswirkung |
|-------------|-------------------------|----------------|
| Auflösung | 15 Bit | 0,03125 °C |
| Genauigkeit | 0,05 % auf voller Skala | max. +- 0,5 °C |

Quelle: (Maxim Integrated, 2015, pp. 1–3)

Fehler durch lineare Anpassung in dem Converter: Wird im Converter linear approximiert, dann berechnet sich der Fehler aus Differenz zwischen dem linearen Graph und dem durch die Callendar-Van Dusen Gleichung definierten Verlauf:

$$R(T) = R_0(1 + aT + bT^2 + c(T - 100)T^3)$$

$$R(60\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1000 \cdot (1 + 3,90830 \cdot 10^{-3} \cdot 60 + -5,77500 \cdot 10^{-7} \cdot 60^2 + 0 \cdot (T - 100)T^3)$$

$$R(60\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1232,419 \Omega$$

$$a = 3,90830 \times 10 - 3$$

$$b = -5,77500 \times 10 - 7$$

$$c = -4,18301 \cdot 10^{-12} \text{ wenn } -200^{\circ}\text{C} \leq T \geq 0$$

$$c = 0 \quad \text{wenn } 0^{\circ}\text{C} \leq T \geq 850^{\circ}\text{C}$$

Formel für lineare Approximation mit dem Temperaturkoeffizienten aus dem Datenblatt von 3850 ppm/K.

$$R(T) = 1000 + 3850 \cdot \frac{\text{ppm}}{K} \cdot T$$

$$R(60) = 1000 + 3850 \cdot \frac{\text{ppm}}{K} \cdot 60\text{K}$$

$$R(60) = 1231 \Omega$$

Durch die Differenz zwischen der Linearen- und der Van Dusen-Gleichung: Bei 60 °C würde ein Fehler von 0,37 K (1,412 Ω) entstehen.

Da der Fehler der Umrechnung relevant ist, wurde hier weiter recherchiert. Bei dem Auslesen des Grundprogramms auf dem PTC Bricklet kann festgestellt werden, dass die Umrechnung mit einer „lookup table“ und einer linearen Interpolation zwischen den einzelnen Zwischenwerten erfolgt. Auch den Abweichungen im Referenzwiderstand (390 Ω bzw. 3900 Ω) wird Rechnung getragen. Eine Verfälschung der Messwerte ist hier nicht zu erwarten bzw. nicht relevant (O. Lüke, personal communication; Olaf Lüke, 2018). Des Weiteren sind systematische Abweichungen durch die Kalibrierung auf eine festgelegte Referenztemperatur eliminiert.

Langzeit Messverhalten

Veränderung des Sensorelements durch Alterung: Aus dem Datenblatt des Herstellers ist zu entnehmen, dass die Langzeitstabilität bei 0,04 % (R_0 Drift) nach 1000 h bei maximaler Betriebstemperatur von 500 °C liegt. Es ist anzunehmen, dass die Änderung für die Messung unerheblich ist. Durch den erwarteten moderaten Temperaturbereich von max. - 10 °C bis + 60 °C. Aus dem Maximaldrift würde ein Fehler bei 60 °C von <0,024 K entstehen. Annahme: Keine nennenswerten Veränderungen der Leitungen und des AD Wandlers über einen Zeitraum von zwei Jahren.

Einfluss

Wärmeeintrag durch Leitungen

Der Wärmeeintrag durch die Leitungen zur Messstelle muss ebenfalls berücksichtigt werden. Neben der Verlegung der Leitungen entlang der Isothermen kann auch mit der Reduzierung der Leitungen selbst der Fehler reduziert werden.

Durch den minimalen Übergang von Messleitung auf Sensor (Querschnitt Sensoranschluss 0,03 mm²) wird der Einfluss vernachlässigt.

Selbsterwärmung durch Messstrom

Fehler durch Erwärmung des Sensors durch den Messstrom: Der Messstrom und die am Sensor anliegende Spannung wurde bei laufender Messung mit einem Keithley 6517B Electrometer erfasst. Die Messwerte sind Mittelwerte aus je fünf Messungen und in Tabelle 4 erfasst. Berechnungen mit Werten des PTC 2.0 Bricklet und den Angaben des verwendeten Pt 1000 Sensors.

Tabelle 5: Messwerte für Wärmeeintrag durch Messstrom

| Formelzeichen | Einheit | Bezeichnung | Rechenwert |
|---------------|---------|-------------|-------------|
| U | V | Spannung | 0,419 V |
| I | A | Strom | 0,0003822 A |
| T | °C | Temperatur | 23,3 °C |

Im Datenblatt des Sensors ist die Selbsterwärmung mit 0,4 K/mW bei 0 °C angegeben

Die Erwärmung selbst berechnet sich dann wie folgt:

$$\Delta\vartheta = 0,4 \frac{\text{K}}{\text{mW}} \cdot P$$

$$\Delta\vartheta = 0,4 \frac{\text{K}}{\text{mW}} \cdot 0,419 \text{ V} \cdot 0,0003822 \text{ A} \cdot \frac{1000 \text{ mW}}{1 \text{ W}}$$

$$\Delta\vartheta = +0,064 \text{ K}$$

Eigenerwärmung/Joulesche Erwärmung

Die Stromwärmeverluste berechnen sich nach dem Stromwärmegesetz:

Formeln aus (Bastian et al., 2008, p. 47).

Tabelle 6: Berechnung Erwärmung des Sensors Daten aus Datenblatt (Heraeus, 2019)

| Formelzeichen | Einheit | Bezeichnung | Rechenwert |
|-------------------|------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Q_w | J oder Ws | Wärmeenergie | |
| P | W | Leistung | |
| t | s | Zeit | 1 s |
| m | kg | Masse | 0,00001 kg* |
| ρ | $\frac{g}{cm^3}$ | | 21,5 $\frac{g}{cm^3}$ |
| c | $\frac{J}{kg \cdot K}$ | Spezifische Wärmekapazität Platin | 133 $\frac{J}{kg \cdot K}$ |
| $\Delta\vartheta$ | K | Temperaturdifferenz | |

$$Q_w = P \cdot t$$

$$P = U \cdot I$$

$$Q_w = 0,419 V \cdot 0,0003822 A \cdot 1 s$$

$$Q_w = 1,601 \cdot 10^{-4} Ws$$

- $$\Delta\vartheta = \frac{Q}{m \cdot c}$$

$$\Delta\vartheta = \frac{1,601 \cdot 10^{-4} J}{1 \cdot 10^{-3} cm^3 \cdot 21,5 \frac{g}{cm^3} \cdot 133 \frac{J}{kgK} \cdot \frac{1kg}{1000g}}$$

$$\Delta\vartheta = +0,056 K$$

*Annahme aus Dichte 21,5 g/cm³ * Abmessungen

Zeit wurde aufgerundet (0,8 Sek. für 40 Messungen)

Quelle: Dichte / spezifische Wärmekapazität Platin (Grigull & Sandner, 1990, p. 148)

Beide der berechneten Werte liegen in einem akzeptablen Bereich.

Zur Begrenzung der Selbsterwärmung wird zusätzlich über die Software das Bricklet bzw. die Messung abgeschaltet, sodass die Messspannung nur anliegt, wenn auch gemessen wird. Des Weiteren wird dieser systematische Messfehler auch durch die Kalibrierung eliminiert.

Im Rahmen der gewählten Messzyklen, der Nullpunktikalibrierung und der verwendeten Sensoren ist davon auszugehen, dass die Selbsterwärmung keinen Einfluss auf die Messungen hat.

Bauform des Sensors

Für die Oberflächen Messung bieten sich möglichst kleine Sensoren in Rechteckform an, da diese eine glatte Oberfläche besitzen und der Sensor durch die „große“ Oberfläche ein gutes Ansprechverhalten zeigt. Zudem wird die Wärmeübertragung (Konduktion) durch den direkt anliegenden Sensor sichergestellt.

Für Temperaturmessung im Material können zylindrische Sensoren verwendet werden, da diese einfach nachträglich mittels Bohrungen in das Material eingesetzt werden können. Die metallische Schutzhülle sollte so kurz wie möglich gewählt werden, um punktuell messen zu können. Durch das Bohren mit einem genau passenden Bohrer kann der Sensor passgenau eingefügt werden. Eine schräge Bohrung vergrößert den Weg durch die Isothermen. So wird die Wärmemenge, welche über die Sensorkabel eingetragen wird, verringert und es verringert sich so auch die Abweichung der Messung.

Für die Messung von Lufttemperaturen werden die Sensoren gegen langwellige & kurzwellige Strahlung geschirmt. Dazu eignen sich Temperaturfühler mit einem Metallschirm. Niedrige Emissionsgrade reduzieren den Einfluss von Strahlung.

Für die Messung von Strahlungstemperatur ist der Sensor von einer strahlungsabsorbierenden Hülle umgeben. Dazu eignen sich Temperaturfühler mit einer sogenannten Schwarzkugel. Die Kugel hat eine schwarze Beschichtung und damit einen sehr hohen Absorptionsgrad. Die sphärische Geometrie ermöglicht die Aufnahme der Strahlung aus allen Raumrichtungen.

Befestigung des Sensors auf der Oberfläche

Die Montage der Sensoren hat einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis. Die Entkopplung des Sensors von dem Montagematerial muss gewährleistet sein.

Sensorpyramide: Gewählt wurde eine Pyramide, welche die Oberfläche nur minimal beeinflusst und gleichzeitig eine sichere Befestigung der Sensoren ermöglicht.

Verklebung: Verklebt werden die Sensoren mit einem kleinen Stück Alubutylklebeband.

Anpressdruck/Befestigung: Getestet wurden vier verschiedenen Varianten. Es erfolgten Tests zu Stabilität, Einfluss, Anpressdruck, Dauerhaftigkeit.

Weitere mögliche Fehlerquellen

Auf Nachfragen beim Hersteller des MAX31865 wurden von einem Mitarbeiter folgende Fehler benannt:

„Die wichtigsten Fehlerursachen bei der MAX31865-Messung sind Abweichungen im RREF-Widerstandswert und Rauschen an langen RTD-Kabeln. Die Verwendung eines Niedertemperatur-Referenzwiderstandes und die genaue Messung seines Wertes ist der Schlüssel zu präzisen Messungen, da der MAX31865 im Wesentlichen nur den Spannungsabfall über RTDIN+/- betrachtet. Die Verwendung einer Vierleiterkonfiguration kann auch dazu beitragen, Messfehler zu reduzieren, indem sie den durch die Impedanz der RTD-Kabel selbst verursachten Spannungsabfall kompensiert. Letztendlich meldet der MAX31865 lediglich die über die RTDIN+/- Pins gemessene Impedanz, und es liegt an dem Benutzer zu bestimmen, wie sich diese Impedanz auf die Temperatur für seinen speziellen RTD überträgt.“ (Z. Cox, personal communication, 11/2019)

Eigene Übersetzung der E-Mail

- Das Auswerteelement Tinkerforge PTC Bricklet 2.0 verwendet für die Referenzwiderstände 390 bzw. 3900 Ω Präzisionswiderstände mit einer Toleranz von 0,1 %
- Abweichung durch Impedanz der Sensorleitungen: Kompensation durch Vierleiterschaltung
- Abweichungen durch Rauschen: Reduktion durch Mittelwertbildung, um zufällige/ statistische Fehler auf den Messwerten zu reduzieren und die Genauigkeit zu erhöhen. Die Mittelwertbildung erfolgt direkt in

dem Tinkerforge-System. Dabei wird aus 40 Messwerten ein gleitender Mittelwert gebildet. Die Messdauer beträgt dann 0,8 Sekunden.

- Kalibrierung, um systematische Fehler zu reduzieren sind die Sensoren in der fertigen Konfiguration auf eine festgelegte Referenztemperatur kalibriert.

Gesamtfehler

Zur Fehlervermeidung wurden folgende Maßnahmen getroffen:

- PT1000 Platin-Temperatursensoren Genauigkeitsklasse F 0,1 (Klasse 1/3 B)
- Vierleiterschaltung
- lange Messzyklen
- Nullpunktikalibrierung

Ausschlaggebend für die Fehler bei dieser Temperaturmessung (0 – 60 °C) ist die Abweichung des Sensors.

$$\Delta t = \pm(0,0017 \cdot |t|)$$

$$\Delta t = \pm(0,0017 \cdot |60^{\circ}C|)$$

$$\Delta t = \pm 0,102^{\circ}C$$

Auswahl des Messsystems für die Luftfeuchtemessung

Für die Anforderungen an die Luftfeuchtemessung wurde eine mittlere Genauigkeit von $\pm 2\%$ festgelegt. Der erwartete Messbereich liegt zwischen 20 ... 90 % r. F.. Für die Temperaturmessung wird ein Temperaturbereich zwischen -10 °C und 60 °C erwartet. Bei der Auswahl der Sensoren wurden die folgenden Elemente betrachtet.

- Genauigkeit
- Sensortyp
- Langzeit Messverhalten:
- Kondensation auf dem Sensor
- Selbsterwärmung

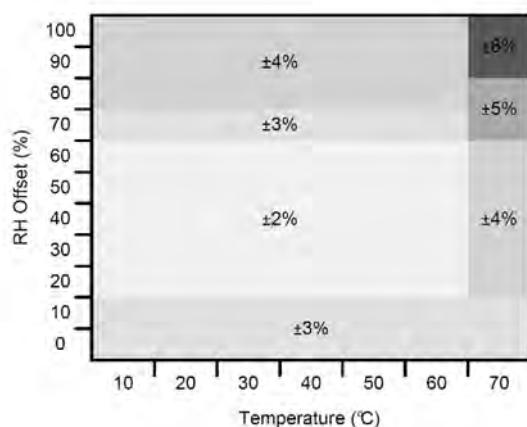
Auswahl

Auf dem Bricklet kommt ein HDC1080 Sensor von Texas Instruments zum Einsatz. Den Herstellerangaben zufolge entspricht die typische Genauigkeit $\pm 2\%$.

Messbereich Luftfeuchte: Einsatzbereich 0 ... 100 % RH (nicht kondensierend)

Die Genauigkeitswerte sind dabei von der Temperatur und der Luftfeuchte abhängig. Die nachfolgende Grafik zeigt die Zusammenhänge:

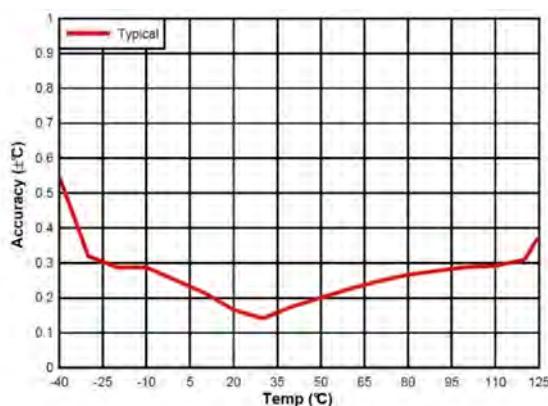
Abbildung 41 Abweichung des Luftfeuchtesensors in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte



Quelle: (Texas Instruments, Incorporated, 2016, p. 19)

Messbereich Temperatur

Abbildung 42 Abweichungen der Temperaturmessung



Quelle: (Texas Instruments, Incorporated, 2016, p. 7)

Hysteresis: Im Bereich von $10 \% \leq RH \leq 70 \% \pm 1 \% RH$

Langzeit Messverhalten: Langzeit Drift durch Alterungseffekte $\pm 0.25 \% RH/a$ (Bei $30 ^\circ C$ und $20 \% \leq RH \leq 50 \%$). Dieser Wert kann durch Staub, verdampfte Lösungsmittel, Ausgasungen von Klebebändern, Klebstoffen, Verpackungsmaterialien usw. beeinflusst werden.

Weiterer Einfluss: Selbsterwärmung durch eine hohe Messfrequenz. Verfälschung der Messergebnisse.

Auswahl des Messsystems für die Wärmestrommessung

Für die Wärmestrommessung wurde als relative Genauigkeit $\pm 10\%$ festgelegt. Der Messbereich des Wärmestroms soll zwischen $-20 \dots +20 \text{ W/m}^2$ liegen. Die erwarteten Temperaturen liegen bei $10 \dots 40^\circ\text{C}$. Die folgenden Elemente wurden bei der Auswahl berücksichtigt:

- Genauigkeit
- Sensortyp
- Langzeit Messverhalten
- Sensorelement Veränderung?
- Einfluss der Selbsterwärmung

Auswahl

erste Abschätzung der zu erwartenden Wärmeströme

$$q = \frac{1}{R} \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$q = \frac{1}{3,43 \frac{m^2 K}{W}} \cdot (40^\circ\text{C} - -20^\circ\text{C})$$

$$q = 17,49 \frac{W}{m^2}$$

q = Wärmestromdichte [W/m^2]
 θ = Schichtgrenztemperatur [$^\circ\text{C}$]

Wärmestrommessplatte

Typ:

Phymeas 7T (Starr Material Epoxidharz)

Abmessungen: 120 mm x 120 mm x 1,5 mm

Aktive Fläche: 90 mm x 90 mm x 1,5 mm

Wärmeleitfähigkeit der Wärmestrommessplatte $\lambda = 0,2 - 0,3 \frac{W}{m \cdot K}$

Kalibrierung:

Wärmestrommessplatte wird bei einer Mittentemperatur von ca. 23°C kalibriert.

SN: 190024

Kalibrierwert: $c = 12,09 \frac{W}{m^2 \cdot mV}$

Änderung des Kalibrierwerts mit der Temperatur:

c = Kalibrierwert [$\text{W/m}^2 \text{mV}$]

ϑ = Temperatur [$^\circ\text{C}$]

$$c(\vartheta) = c \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - 23^\circ\text{C}))$$

Genauigkeit:

Der Fehler der Kalibrierung ist kleiner 5 %.

Temperatursensor (PT 100 Kl. A DIN-IEC 751)

(Phymeas GbR, 2021)

Verstärker

Eingesetzt wird der AMP 1200 von GreenTEG. Die Verstärkung ist frei einstellbar zwischen 10-5000. Die Ausgangsspannung liegt zwischen 0-10 V die Versorgungsspannung muss zwischen 12 V und 24 V liegen.

Voreinstellungen durch Hersteller:

| | |
|--------------|------------------------|
| Verstärkung: | 1000x |
| Offset: | 5 V |
| 0 ... 5 V | = negativer Wärmestrom |
| 5 V | = kein Wärmestrom |
| 5 ... 10 V | = positiver Wärmestrom |

Die Informationen über Fehler des eingesetzten Verstärkers stammen aus Recherchen und Angaben des Herstellers. (Informationen aus Mails vom 29.05.2019 Ansprechpartner bei GreenTEG Samuel Krebs)

Offsetfehler:

Beim AMP 2100 liegt der Eingangsoffset bei höchstens 4 Mikrovolt (μ V).

Gain-Fehler:

Einstellung des Verstärkers erfolgte durch den Hersteller GreenTEG. Durch Abweichungen bei den zur Einstellung verwendeten Spannungsquellen und Messgeräten kann es zu Abweichungen kommen. Der Fehler wird mit < 0,5 % angegeben.

Parasitäre thermocouple-Spannungen:

Dieser Thermoelektrizitätsfehler entsteht durch den sogenannten Seebeck-Effekt. Dieser tritt bei Verbindung von verschiedenen Metallen und einem Temperaturunterschied auf. Die Einflüsse durch diesen Effekt werden hier nur oberflächlich berücksichtigt, die erwarteten Thermospannungen liegen überschlägig unter 50 μ V (2 x 5 μ V/K Kupfer-Lötzinn / max. 5 K).

Temperaturdrift der Bauteile:

Da der Verstärker überwiegend bei Raumtemperatur eingesetzt wird dieser Anteil nur reduziert berücksichtigt. Nach Herstellerangaben liegt der maximale Drift bei 2 % (-20 ... 80 °C).

Rauschen/Noise:

Das Rauschen wird als Fehlerquelle nicht weiter berücksichtigt. Da sich der Verstärker in einer geschirmten Umgebung befindet. Es befinden sich keine starken elektromagnetischen Felder in der Umgebung. Bei der Auswahl des Netzteils wurde auf eine reduzierte Rippelspannung geachtet diese beträgt 150 mVp-p. Durch die langsamen Änderungen der Wärmeströme ist davon auszugehen, dass das Rauschen keinen nennenswerten Einfluss auf die Messung hat.

Analog Digitalwandler

Industrial Dual Analog In Bricklet 2.0

Typ: MCP3911

Messbereich: - 35 V bis + 35 V (DC)

Genaugigkeit: 0,1 % / \pm 4 mV über den gesamten Messbereich

Auflösung: 24 Bit (Tinkerforge GmbH, 2021)

Gesamtfehlerrechnung

Reihenschaltung der Auswerteelektronik, die Fehlerfortpflanzung folgt damit den Regeln der Multiplikation. Der Gainfehler des Verstärkers ist eigentlich ein systematischer Fehler. Da dieser aber nicht extra bestimmt wurde, wird dieser bei den statistischen Fehlern mit einbezogen. Formel stammt aus der mathematischen Formelsammlung von (Papula, 2014, p. 305).

$$\text{Fehler} = \text{Messung} * \text{Verstärkung} * \text{Auswertung}$$

absolute Unsicherheit

$$\Delta WF = 12,09 \frac{W}{m^2 \cdot mV} \cdot 5 \%$$

$$\Delta WF = 0,605 \frac{W}{m^2 \cdot mV}$$

ΔWF = absoluter Fehler Wärmestromplatte

ΔAMP = absoluter Fehler Verstärker

ΔADW = absoluter Fehler Analog-Digital-Wandler

a = Ergebnis

Δa = Fehler der Messgröße a

x = Messgröße

Δx = Fehler der Messgröße x

y = Messgröße

Δy = Fehler der Messgröße y

z = Messgröße

Δz = Fehler der Messgröße z

$$\Delta AMP = \text{Offset} + \text{Gainfehler} + \text{Thermoelektrizitätsfehler} + \text{Temperatur Drift}$$

$$\Delta AMP = 1000 \cdot (0,004 \text{ mV} + 1 \text{ mV} \cdot 0,005 + 0,05 \text{ mV} + 1 \text{ mV} \cdot 0,01)$$

$$\Delta AMP = 69 \text{ mV}$$

$$\Delta ADW = 4 \text{ mV}$$

relativer Fehler

$$\begin{aligned} \left| \frac{\Delta a}{\bar{a}} \right| &= \sqrt{\left| \frac{\Delta WF}{WF} \right|^2 + \left| \frac{\Delta AMP}{AMP} \right|^2 + \left| \frac{\Delta ADW}{ADW} \right|^2} \\ \left| \frac{\Delta a}{\bar{a}} \right| &= \sqrt{\left| \frac{0,605 \frac{W}{m^2 \cdot mV}}{12,09 \frac{W}{m^2 \cdot mV}} \right|^2 + \left| \frac{69 \text{ mV}}{1000 \text{ mV}} \right|^2 + \left| \frac{4 \text{ mV}}{1000 \text{ mV}} \right|^2} \\ \left| \frac{\Delta a}{\bar{a}} \right| &= 0,0853 \end{aligned}$$

$$a = \bar{a} \pm \bar{a} \cdot 8,53 \%$$

Details zur verbauten Elektrotechnik

Leitungsauswahl für den Versorgungsschalschrank

230 V 16 A

Für die Leitung von Kubus zu Solarstation wird ein witterungsbeständiges Kabel verwendet es sind drei Leiter notwendig mit je einem Querschnitt von 1,5 mm². Die Belastbarkeit der Leitung beträgt unter Berücksichtigung von:

- Verlegeart (B2)
- Temperatur (30 °C)
- 16,5 Ampere (Bastian et al., 2008, p. 35)

Der Spannungsabfall beträgt bei 10 m Länge
 16 A Maximallast etwa 0,89 %
 (Phasenverschiebung wird vernachlässigt da keine nennenswerte Blindleistung zu erwarten ist). Bei den zu erwartenden 600 W beträgt der Spannungsabfall nur ~0,3 %.

$$A = \text{Leiterquerschnitt } [\text{m}^2]$$

$$L = \text{Leiterlänge } [\text{m}]$$

$$I = \text{Leiterstrom } [\text{A}]$$

$$y = \text{Leitfähigkeit (Kupfer } 56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \text{ (Bastian et al., 2008, p. 38)})$$

$$\Delta U = \text{Spannungsfall } [\text{V}]$$

$$A = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \cos(\phi)}{\gamma \cdot \Delta U} \quad (\text{Bastian et al., 2008, p. 52})$$

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 10\text{m} \cdot 3,15\text{A}}{56 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \cdot 230\text{V} \cdot 1,5\text{mm}^2} \cdot 10^6 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2}$$

$$\Delta U = 0,00326 = 0,33 \%$$

Der Spannungsfall ist so gering wie möglich zu halten, da diese Verlustleistung zur Erwärmung des Kabels beiträgt. Der Spannungsfall von 0,3 % ist unproblematisch. Als Referenzwert für den zulässigen Spannungsfall kann die Angabe der DIN 18015-1 genommen werden.

„Der Spannungsfall in der elektrischen Anlage hinter der Messeinrichtung bis zum Anschlusspunkt der Verbrauchsmittel sollte 3 % insgesamt nicht überschreiten,“ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013, p. 15)

Die Litzen für die Verdrahtung werden in 1,5 mm² ausgeführt. Der Farbcode ist dabei folgender:

- Braun/Schwarz: Phase (L)
- Dunkel Blau:Neutralleiter (N)
- Grün-Gelb: Schutzleiter (PE)

24 V 4 A

Für die Leitungen der Kleinspannung werden 0,5 mm² Litzen verwendet. Diese sind ausreichend groß dimensioniert für die maximal möglichen 4 A des Gleichspannungsnetzteils.

Für den Steuerstromkreis gibt es nach ersten Recherchen keinen Höchstwert für den Spannungsabfall, laut Als Orientierungswert kann ein Spannungsabfall von maximal 5 % angenommen werden. Der Steuerstromkreis ist farblich codiert.

Rot: Phase + 24 V

Hellblau: Rückleiter 0 V

Berechnung des Leiterquerschnitts:

$$A = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U} \quad (\text{Bastian et al., 2008, p. 38})$$

$$A = \frac{2 \cdot 4m \cdot 4A}{58 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega \cdot m} \cdot 24V \cdot 0,05} \cdot 10^6 \frac{mm^2}{m^2}$$

$$A = 0,46 mm^2$$

Die Wahl eines $0,5 \text{ mm}^2$ Querschnitts ist auch für die maximal mögliche Last von 96 W ausreichend.

Bei Änderung der Leitungslänge oder Austausch des Netzteils ist ein größerer Querschnitt zu wählen!

Für den Messkasten 2 wird für die 24 V Verdrahtung ein Querschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ verwendet, um spätere Erweiterungen einfacher zu gestalten.

Sensorleitungen

Für die Leitungen zu den Sensoren werden vier Leiter benötigt, um den Anschluss der Sensoren in einer Vierleiterschaltung auszuführen. Da für die Messleitungen ein Betrieb mit Kleinspannung vorgesehen ist, wird kein Schutzleiter benötigt. Die Vierleiterschaltung ermöglicht das Messen des Widerstands, sodass der Kabelwiderstand vernachlässigt werden kann. Dadurch kann ein möglichst kleiner Querschnitt gewählt werden. Um die Installation der Sensoren zu vereinfachen und auch an schlecht zugänglichen Orten zu ermöglichen, werden Leitungen der Leiterklasse 6 (feinstdrähtig) verwendet. Die Kabeldurchführungen wurden alle entsprechend dem Außendurchmesser der Leitungen dimensioniert.

Auswahl: Sensorleitung, ungeschirmt, $4 \times 0,14 \text{ mm}^2$

Farbcodierung:

Tabelle 7: Farbcodierung der Temperatursensoren

| Anschluss am Sensor | Anschluss am PTC Bricklet | |
|---------------------|---------------------------|---|
| Braun – Schwarz | schwarz | A |
| | braun | B |
| Blau – Weiß | weiß | C |
| | blau | D |

Belegung Leitung

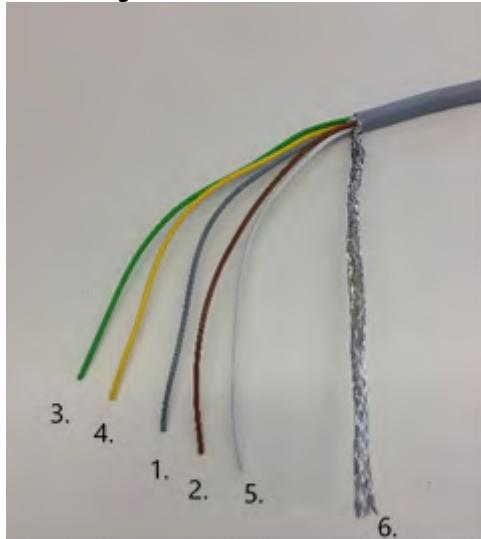
Die Kabelbelegung erfolgt wie hier dargestellt.

Tabelle 8: Farbcodierung Verbindungsleitung

| Pin am Stecker | Leitungsfarbe Schaltschrank | Nutzung | Spannung / Signal |
|----------------|-----------------------------|---------|-------------------|
| 1 | grau | 24 V | DC |
| 2 | braun | 0 V | DC |
| 3 | grün | Modbus | RS485 - |
| 4 | gelb | Modbus | RS485 + |
| 5 | weiß | Modbus | Ground |
| 6 | | Schirm | Nicht aufgelegt |

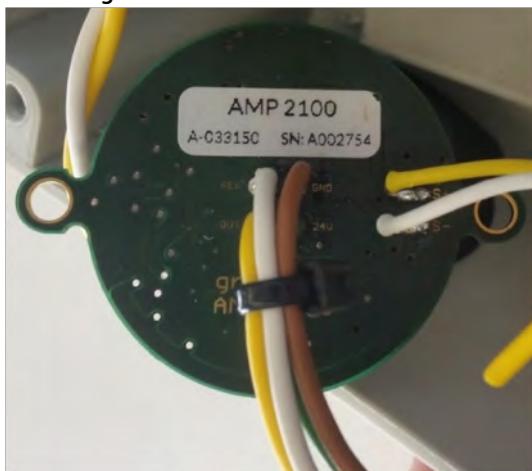
Abbildung 43 Farbcodierung

Verbindungskabel



Farbcodierung GreenTEG

- a. Spannung
 - i. 24 V 24 V grün
 - ii. 0 V GND braun
- b. Eingang
 - i. Sensor S+ gelb
 - ii. Sensor S- weiß
- c. Ausgang
 - i. Ausgang (out) gelb
 - ii. Referenz (ref) weiß

Abbildung 44 Messverstärker

Messtechnik-Schalschrank

Für die Messtechnik wurde ein Kunststoffschalschrank der Firma Rittal verwendet. Durch das Kunststoffmaterial können später problemlos Erweiterungen vorgenommen werden. Das Material ist mit einem Akkuschrauber oder einer Stichsäge leicht zu bearbeiten. Die Abmessungen wurden etwas größer bemessen, um spätere Erweiterungen zu ermöglichen und auch die Wärme der Bricks besser abführen zu können. Das Fenster ermöglicht eine einfache Kontrolle der Technik sowie den Blick auf das Display, ohne den Schalschrank öffnen zu müssen. Die Montage der Bauteile erfolgt immer mit Hutschienen, welche auf der Montageplatte angebracht sind. Durch die aktive Befeuchtung in den Kuben ist die Mess- und Elektrotechnik besonders vor Feuchtigkeit zu schützen. Die Durchführungen für Messleitungen sind mit passenden Kabelverschraubungen (IP68) ausgeführt. Für die Tinkerforge Datenleitungen wurde eine „Skintop cube Multi“ Durchführung (IP66) angebracht. So bleibt die Schutzart des Gehäuses (IP56) erhalten. Über die Durchführungen wurde auch die Zugentlastung der Kabel realisiert.

1. Messtechnik Schalschrank
2. Temperatursensoren
3. Humidity Sensoren
4. Steckverbinder für Wärmestrommessung
5. Sichtfenster zur Kontrolle der Messtechnik
6. Verbindung zum Stromversorgungsschalschrank

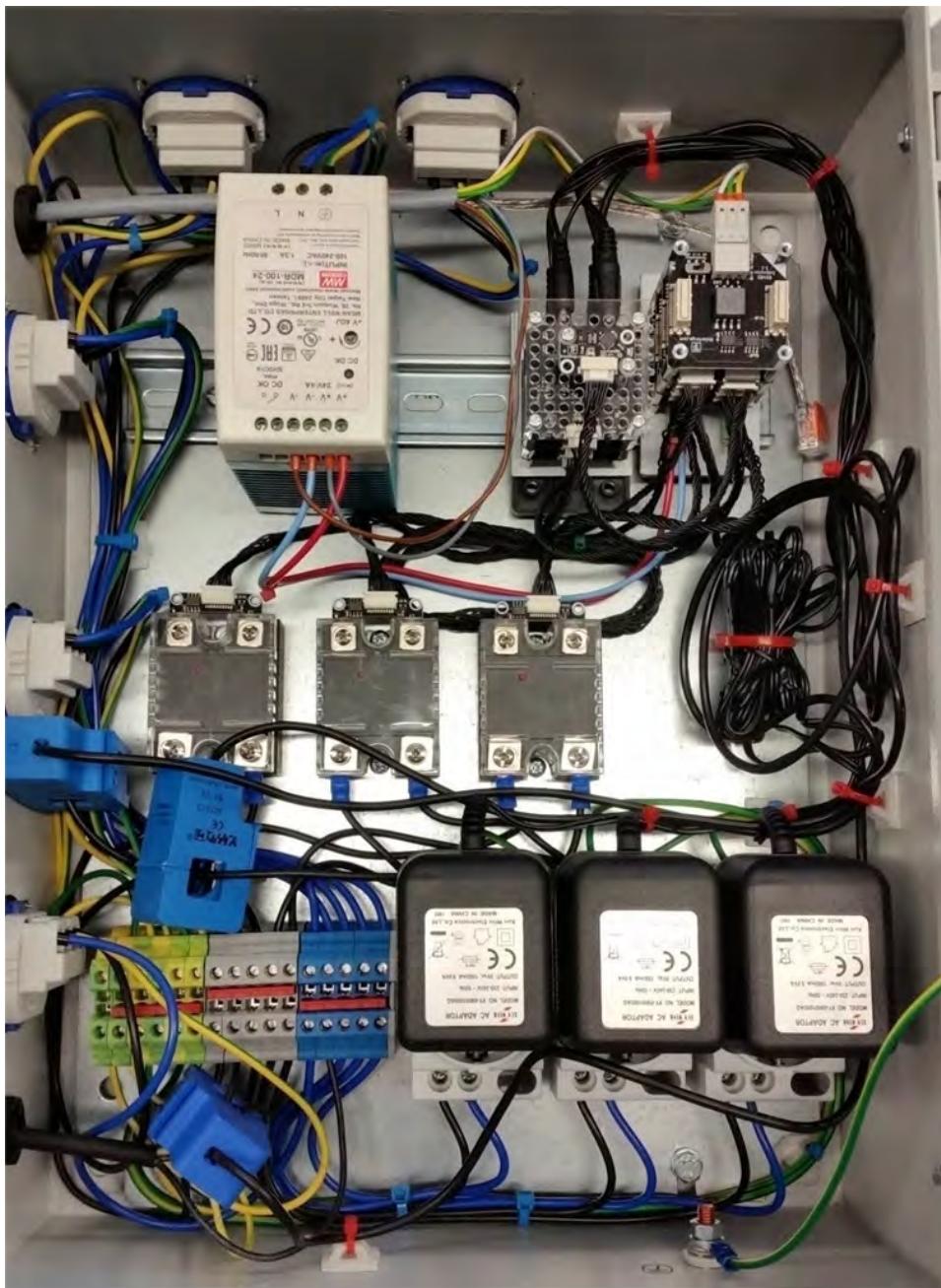
Abbildung 45 Messtechnik Schalschrank mit Sensoren



Stromversorgungsschalschrank

Der Schalschrank für die Stromversorgung des Kubus ist ebenfalls von der Firma Rittal. Dieser Schalschrank ist aus Metall, um eine Erdung des Gehäuses zu ermöglichen. Direkt auf die Montageplatte angeschraubt sind die Solid-state relay (SSR). Für die verbauten SSR sind bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C ohne Kühlkörper noch 9 A zulässig (Xiamen Jinxinrong Electronics Co. Ltd.). Da an den schaltbaren Steckdosen maximal 300 W nach bisheriger Planung zu erwarten sind, wird diese Belastungsgrenze nicht überschritten $1,3 \text{ A} < 9 \text{ A}$. Schaltpläne liegen den Schalschränken bei. Vor der Inbetriebnahme erfolgte für beide Stromversorgungskästen eine Abnahme Prüfung (VDE) inkl. Schutzeleitermessung. Diese wurde von der Elektrowerkstatt der TUM durchgeführt und mit einem entsprechenden Prüfsiegel bestätigt. **Wiederholungsprüffristen sind einzuhalten!**

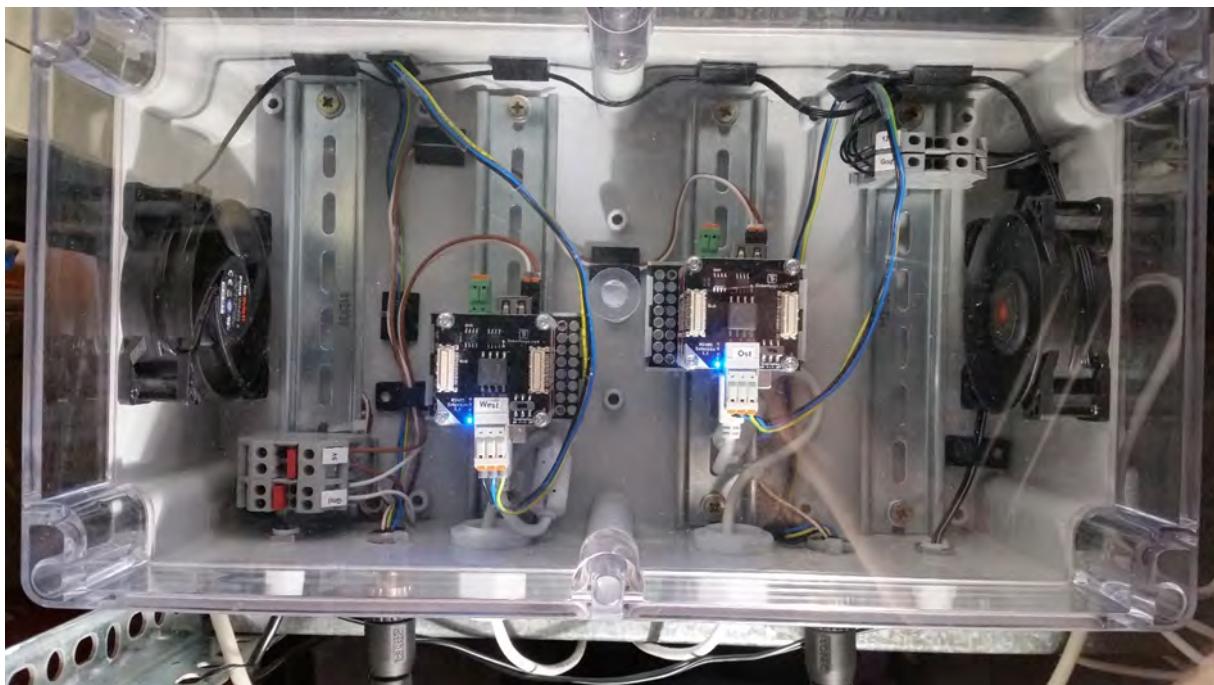
Abbildung 46 Schalschrank für Stromversorgung



Redbrick Gehäuse

Um die Abwärme der beiden Redbricks besser abführen zu können, wurde nachträglich ein eigenes Gehäuse entwickelt. Dieses beinhaltete die zwei Redbricks von Kubus Ost und West sowie die dazugehörigen Power Supplys und je eine Modbus Master Extension. Durch die zentrale Unterbringung der Bricks ist auch die Kühlung mit Umgebungsluft möglich. Zudem sind die Redbricks auch über USB über den Remote Computer in der Solarstation angebunden. So lassen sich Datenabfragen, Programmänderungen und Softwareupdates leichter durchführen. Die Anbindung der Redbricks an die Kuben erfolgt über den RS485 Bus. Dieser erlaubt eine zügige Datenübertragung auch über längere Distanzen.

Abbildung 47 Gehäuse für die Redbricks "Red-Box"



Literaturquellen zu den elektrotechnischen Anlagen

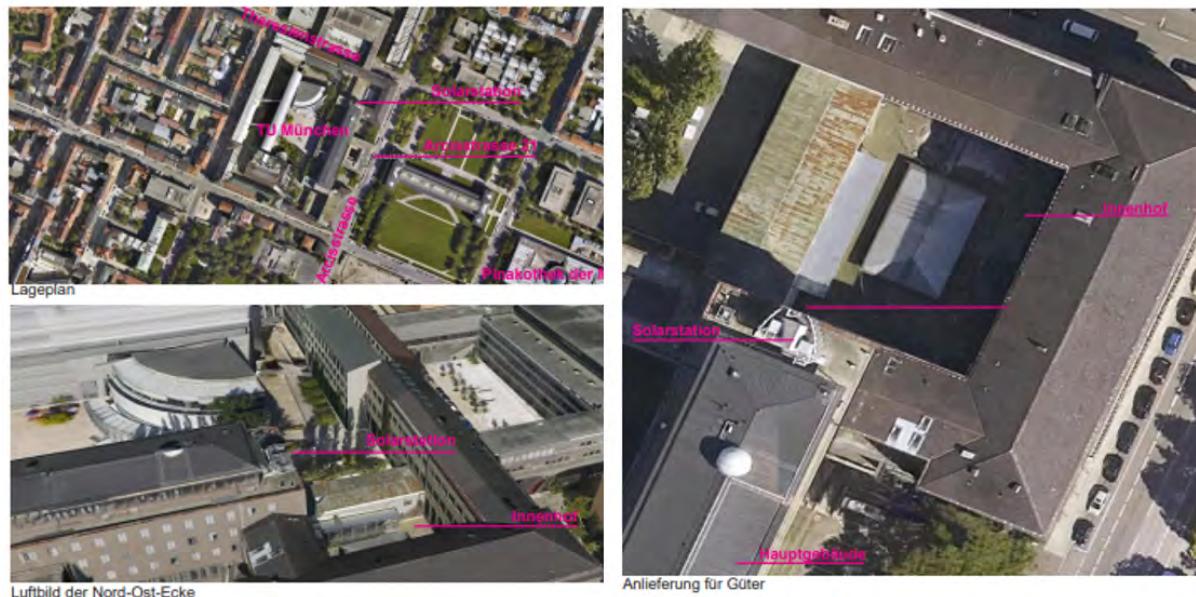
- Bastian, P., Bumiller, H., Burgmaier, M., Eichler, W., Käppel, T., Klee, W., ... Ziegler, K. (2008). *Fachkunde Elektrotechnik* (26., überarb. und erw. Aufl.). Europa-Fachbuchreihe für elektrotechnische Berufe. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel.
- Bergmann, K. (1996). *Elektrische Messtechnik: Elektrische und elektronische Verfahren, Anlagen und Systeme* (6., überarbeitete und ergänzte Auflage). Viewegs Fachbücher der Technik. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-01616-8>
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Mai 2009). *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC 60751:2008)*. (DIN EN, 60751). 10772 Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (September 2013). *Elektrische Anlagen in Wohngebäuden – Teil 1: Planungsgrundlagen*. (DIN, 18015-1): Beuth Verlag GmbH.
- Grigull, U., & Sandner, H. (1990). *Wärmeleitung*. Mit 52 Abbildungen (2. Aufl.). Wärme- und Stoffübertragung. Berlin: Springer.
- Heraeus (11/2019). *M 222, Platin-Temperatursensor nach DIN EN 60751: Einsatztemperaturbereich -70 °C bis +500 °C, kurzzeitig bis +550 °C*.
- Maxim Integrated (2015). *Datenblatt MAX31865: RTD-to-Digital Converter*.
- Olaf Lüke (2018). max31865_lut.c [Computer software]: Github/Tinkerforge. Retrieved from https://github.com/Tinkerforge/ptc-v2-bricklet/blob/master/software/src/max31865_lut.c
- Papula, L. (2014). *Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler; mit zahlreichen Rechenbeispielen und einer ausführlichen Integraltafel* (11.th ed.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Phymeas GbR (2021, June 29). Kalibrierung | Phymeas: Handel, Kalibrierung und Herstellung physikalischer Messtechnik. Retrieved from https://www.phymeas.de/?page_id=25
- Siemens Aktiengesellschaft (2016, October 4). Widerstands-Temperaturkennlinie.png (1033×662). Retrieved from https://cache.industry.siemens.com/dl/files/866/109741866/img_234108/v1/Widerstands-Temperaturkennlinie.png
- Texas Instruments, Incorporated (01/2016). *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor (Rev. A): (SNAS672,A)*.
- Tinkerforge GmbH (2021, June 29). Doku | Tinkerforge: Industrial Dual Analog In Bricklet 2.0. Retrieved from https://www.tinkerforge.com/de/doc/Hardware/Bricklets/Industrial_Dual_Analog_In_V2.html#industrial-dual-analog-in-v2-bricklet
- Xiamen Jinxinrong Electronics Co. Ltd. *Solid State Relay KS15*.

Ausführungsdetails des baukonstruktiven Umbaus der Testkuben auf der Solarstation

Johannes Paulik, Michael Kamml, Nina Flexeder

Standort und Beschreibung der bestehenden Solarstation

Abbildung 48 Luftbilder des Hauptgebäudes der TUM mit Standort der Solarstation



Die umzubauende Solarstation steht auf dem Dach des Hauptgeländes der TU München Arcisstraße 21 in ca. 28 m Höhe. Die Station besteht aus drei Raumkörpern, die auf einem Stahlgerüst der Nordterrasse des Gebäudes stehen. Die Plattform des Stahlgerüsts, auf dem die drei Kuben stehen, liegt ca. auf 3,7 m über dem Terrassenbelag.

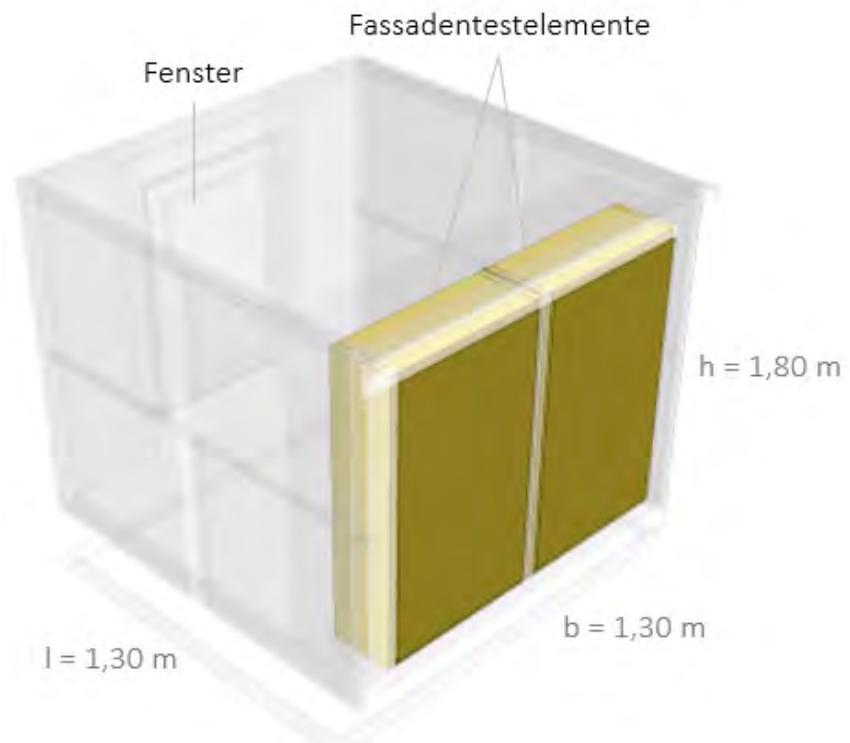
Der Zugang für Personen geschieht über den Aufzug des Hauptgebäudes, zu einer Dachterrasse, auf der die Station auf einem Stahlgerüst steht. Dies kragt an der Nordseite ca. 1,5 m über die Fassadenbrüstung über. Der Zugang für Güter und Fahrzeuge geschieht über ein Tor in der Nord-Ost Ecke Arcisstraße / Theresienstraße. Weitere Zufahrt geht über den Innenhof an der Nord-Ost-Fassade des Hauptgebäudes Arcisstraße 21. Güter können über einen Seil- bzw. Kettenzug (max. 200 kg / 30 m Förderhöhe) auf die Plattform der Station gezogen werden.

Abbildung 49 Solarstation auf dem Dach des TUM Hauptgebäudes

Ein ca. $4,30 \times 4,30 \times 3,30$ (l x b x h in Meter) großer Quader stellt eine 1:1 Simulation eines Raumes dar, dessen südliche Fassade in einem ca. 25° Winkel eine Süd-West Orientierung vorweist. Die beiden Volumen rechts und links des großen Körpers simulieren in einem Maßstab 1:5 Räume und sind in zwei Achsen drehbar um diverse Sonnenstände und Auswirkungen der Sonneneinstrahlung zu simulieren. Ihre Abmessungen betragen ca. $1,30 \times 1,30 \times 1,80$ (l x b x h in Meter). Diese zwei Volumen werden als Testkuben genutzt und in diesem Sinne umgebaut.

Aufbau der Testkuben

Übersicht

Abbildung 50 Darstellung des Kubus mit Außenabmessungen

Kubus West sowie Ost bestehen aus folgenden Bauteilen:

- Boden
- Decke
- Zwei Wände ohne Fenster
- Eine Wand mit Fenster
- Zwei Auswechselbare Fassadentestelemente

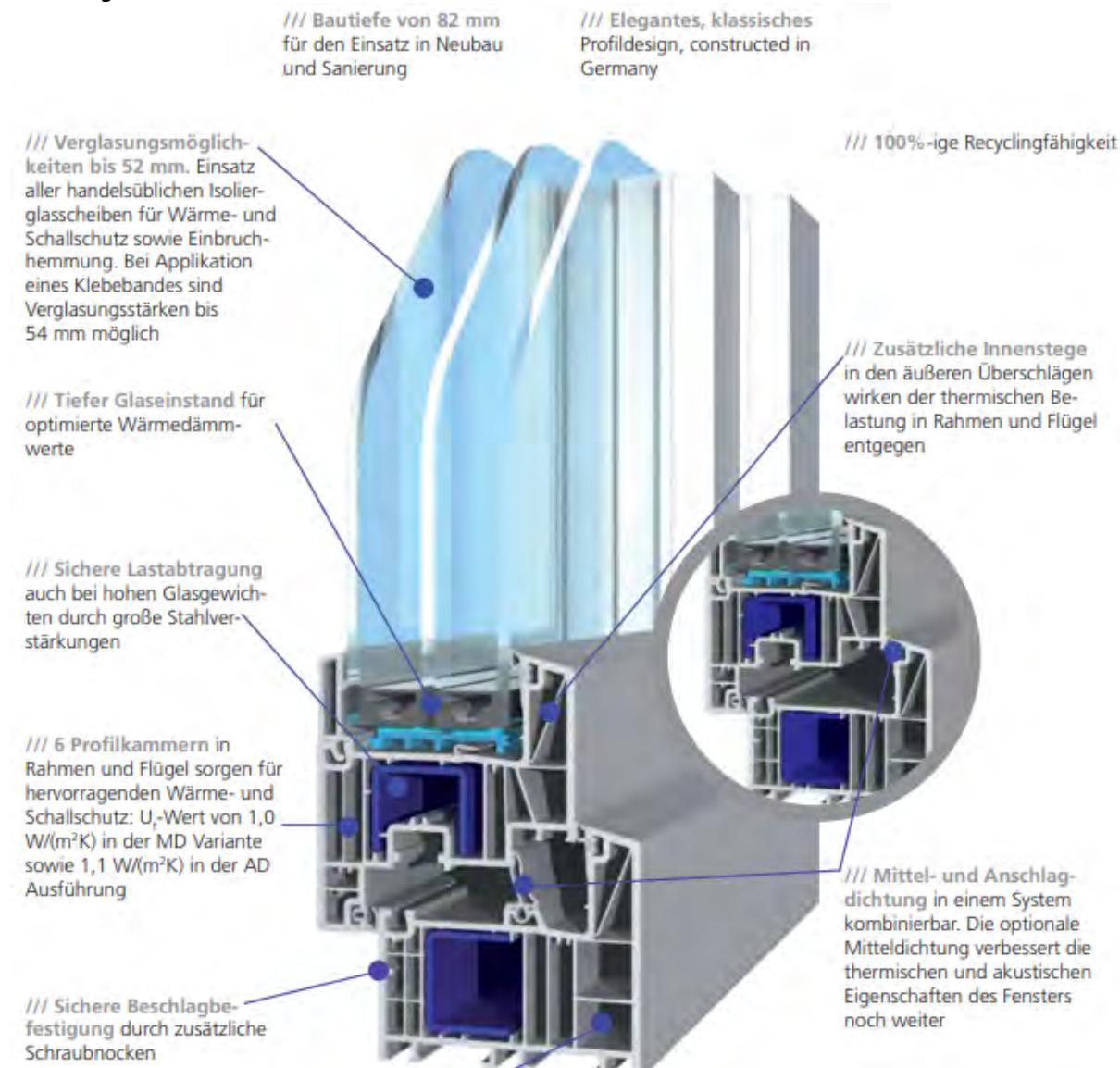
Um verschiedene Baustoffe hygrothermisch zu untersuchen, werden auswechselbare Fassadenestelemente gebaut. Diese werden im Laufe der Langzeitfeldversuche ausgewechselt.

Aufbau der Fassadentestelemente

Der Aufbau der Fassadentestelemente ist in „Systematisierung und Schichtenaufbau der Fassadentestelemente“ dargestellt.

Aufbau der Fenster

Abbildung 51 Detailaufbau des Kubusfenster



| | |
|--|--|
| | 1-Flügel-Element-gerade |
| | System: SALAMANDER bluEvolution82 |
| | Rahmen 73 mm, Flügel 85 mm |
| | Profilvariante: Classic (Be 8), flächenversetzt |
| | Farbton: weiß |
| | Glas: 3-fach Wärmeschutzglas U _g = 0,5 W/(m ² K) |
| | Beschlag: Basissicherheit GSM |
| | Drehkipp-LS |
| | 750 mm x 970 mm |

Beschreibung der baulichen Umsetzung - Einzelschritte

Die im Kapitel beschriebenen Schritte der Montage der Kuben beziehen sich auf den Umbau beider Kuben.

Konstruktion des bestehenden Kubus

Es handelt sich um eine Rahmenkonstruktion, die mittels Metallwinkel, metrischen Schrauben und Muttern verbunden ist. Zur Eckaussteifung sind zusätzlich Querstreben (Multiplex) eingeleimt. Bei den Fassadenelementen handelt es sich um Eternitpaneelle. Die Eternitpaneelle sind eingehängt und durch Edelstahlpressleisten und Dichtgummistreifen mit Edelstahlschrauben und Rampamuffen an den Rahmen geschraubt. Der Zustand der Rahmenhölzer ist je nach Expositionsgrad stark voneinander abweichend.

Abbildung 52 Zustand der alten Kubus Konstruktion

**Demontage des bestehenden Kubus**

Die Hüllelemente werden demontiert: Blechdach, Eternitfassadenelemente, pneumatisch gelagertes Türelement, Glasfront, Boden. Dabei bleibt die Rahmenkonstruktion erhalten, die eckaussteifenden Querstreben werden jedoch entfernt (Rahmen geschwächt). Die Dach- und Fassadenelemente werden zur Wiederverwertung eingelagert. Der Rahmen wird, nach dem Lösen der Haltwinkel, von zwei Personen per Hand von der Stahlkonstruktion gehoben.

Abbildung 53 Zustand der Konstruktionen Ost und West**Montage Unterkonstruktion, Boden und innere OSB – Beplankung (18mm)**

Es wird eine neue Unterkonstruktion aus Konstruktionsvollholz (KVH) direkt auf die Stahlkonstruktion montiert, wofür die alten Haltewinkel wieder verwendet werden. Anschließend wird der Holzrahmen wieder auf die Stahlkonstruktion gehoben und mit der Bodenkonstruktion aus LVL (Laminated Veneer Lumber) durch den Rahmen verschraubt. Als innere Beplankung dienen OSB-Paneele. Diese werden mittels zusätzlicher Halteleisten (Kanthölzer Fichte) montiert, um eine mit dem Rahmen bündige Fläche für den Einbau der VIP-Elemente (Vakuumdämmung) zu erzeugen. Die OSB-Paneele haben jeweils Eckausklinkungen, die als Revisionsöffnungen der Rahmeneckverbindungen dienen, sodass die Blechverkleidung des Daches erneut entfernt werden könnte. Der Rahmen ist teilweise verzogen, wodurch die Montage und Passgenauigkeit erschwert werden. Die Teile werden daher untermaßig geschnitten. Durch die Witterung unbrauchbare Rahmenenteile werden ersetzt, v.a. an den Ecken.

Abbildung 54 Montage der neuen Bodenplatte

Abbildung 55 Montage OSB**Montage Rahmendoppel, Ständer für Fenster, Zusatzschwelle, Riegel, weitere Innenverkleidung und Außenfassade**

Ein Rahmendoppel aus LVL wird auf der Seite der Fassadentestelemente montiert. Auf Seite des Fensters werde zwei Ständer aus LVL montiert, deren Zwischenraum wiederum mit OSB Paneelen verkleidet wird. Es werden eine Zusatzschwelle aus LVL und einer Siebdruckplatte sowie ein Riegel aufgedoppelt. Daraufhin wird auch das Dach von Innen mit OSB-Paneelen verkleidet. Die Eternitplatten werden an den Außenseiten bis auf die Seite der Testelemente und der des Fensters wieder eingesetzt. Der Rahmen wird abschließend auf der Bodenkonstruktion befestigt (danach sind nicht mehr alle Schrauben erreichbar, da sie durch das Stahluntergestell blockiert sind). Das Dachblech wird mittels der alten Verbinder remontiert. (Stahlwinkel, Gewindestange und Muttern)

Abbildung 56 Rahmendoppel (links) und Fensterlaibung (rechts)**Abbildung 57 Remontage des metallenen Dachrahmens (links) und fertig beplankter Innenraum (rechts)****Bau und probeweise Montage der Rahmen der Fassadentestelemente**

Die Rahmenteile werden formatiert, mit Dübelbohrern gebohrt, mit Dübeln versehen und anschließend verleimt und verschraubt. So soll die nötige Stabilität der Eckverbindung gewährleisten werden. Zwei Rahmen aus LVL werden in die Öffnung gestellt und verkeilt.

Abbildung 58 Rahmen der Testelemente verleimt



Abbildung 59 Testweise verklebt der Rahmen (Vollbild)



Abbildung 60 Testweises verkleben der Rahmen (Detail)**Bau der ersten Fassadenteilelemente**

Vorgefertigte Rahmen werden mit den einzelnen Wandaufbauten versehen. Einzelteile werden formatiert und eingebbracht. Dies geschieht bei den Teilen aus Holz maschinell mit Hilfe der Kreis- und Bandsäge. Die Dämmstoffe werden teilweise per Hand, mit der Dämmstoffssäge zurechtgeschnitten. Die Bestandteile werden jeweils materialgerecht fixiert. Im Anschluss werden die Übergänge zwischen Wandaufbau und Elementrahmen dampfdicht verklebt. Einbringen der Randputzleisten und Auftrag der Putzschichten von Hand mit Hilfe einer Putzkelle. Auftrag und der jeweiligen Oberflächen.

Abbildung 61 Testelemente Holzrahmenbau (links) luftdichte Abklebung (rechts)**Abbildung 62 Holzrahmenbauwand teilbefüllt (links) mit Dämmfaserplatte (rechts)**

Abbildung 63 Einlegen der Holzfaserdämmung in die Holzrahmenbauwand (links) und Holzfaserplatte auf das Element (rechts)

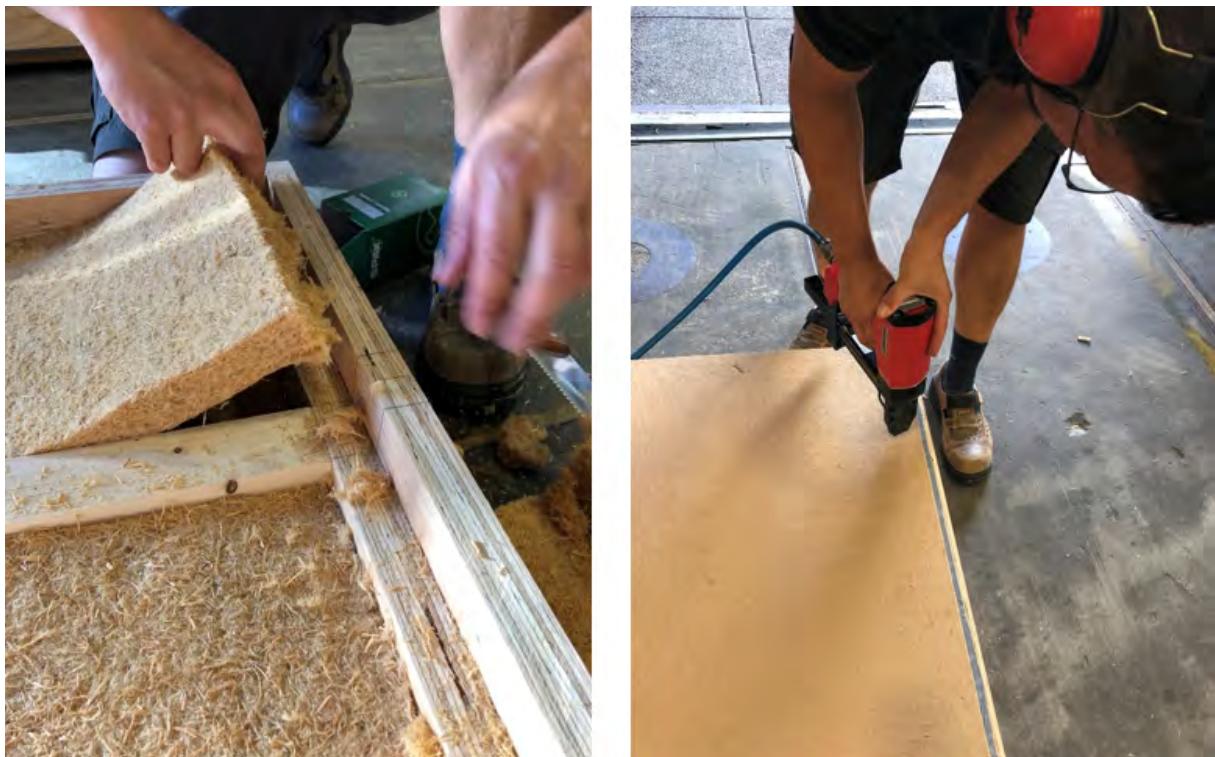


Abbildung 64 Holzrahmenleichtbauwand mit Putzschicht



Installation der Vakuumisolationspaneele

In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma Variotech werden die VIP-Elemente in die Kuben eingebracht. Die Revisionsöffnungen zu Montage des Dachbleches werden abgeklebt. Die seitlichen Elemente werden zuerst mit Fugendichtband umgeben und mittels eines PU-Klebers fixiert. Das Deckenelement durch einen Putzmörtel an die oberen OSB-Platten geklebt. Der Putzmörtel erweist sich jedoch als ungeeignet und die Deckenpaneelle werden ebenfalls mit PU-Kleber befestigt. Während der Trockendauer werden alle Elemente verspreizt. Die Stöße werden mit Steinwolle ausgefüllt, um die Dämmung zu gewährleisten

Hinweis zu den VIP-Elementen:

Die Perforation der Elemente, etwa durch Schrauben oder Bohren, ist unter allen Umständen zu verhindern!

Abbildung 65 Montage der Vakuumisolationspaneele in die Kuben



Einbau Aluminiumskelet und Abkleben des Innenkubus

Für das Innengerüst der Kuben wurden Standard ITEM-Profile verwendet (vorwiegend 40x 40 mm). Das Gerüst stabilisiert die Vakuumdämmpanneele, stützt die eingebauten Fassadentestelemente und bietet zusätzlich Befestigungsmöglichkeiten für Sensoren. Direkt an den beiden Testelementen liegen die zwei kleinen 20 x 40 mm Profile an. Die zwei 80 x 40 mm Profile oben und unten leiten Druckkräfte der Fassadentestelemente dann in den Rahmen des Kubus.

Abbildung 66 Aluminiumrahmen**Montage der Fenster**

Die Fenster werden mit dem Kran auf die Plattform gehoben. Das Fenster werden in der Dämmebene, auf Tragklötzen positioniert und mit Hilfe von Montageankern verschraubt. Die Fensterflügel werden eingehängt und die Olive montiert. Dies erfolgt seitenverkehrt, um den Platz im Inneren bei geöffnetem Fenster besser nutzen zu können. Die das Fenster umgebenden Zonen werden mit Mineralwolle gedämmt und mit Bitumenband versiegelt. Die Seiten werden aufgedoppelt um als Auflage für die Eternitplatten zu dienen. Die vorderen Eternitplatten werden wieder angebracht und ein Fensterverschluss Spannhaken und Schlossern montiert.

Abbildung 67 Fenstereinbau (links) Fenster abkleben (rechts)



Abbildung 68: Fenster fertig eingebaut



Sensoren einbohren

Bohrungen von 32 mm Durchmesser werden 1,5 cm, 2,5 cm, 4 cm und 7 cm gesetzt.

Abbildung 69 Wandtestelement mit Bohrungen für die Sensoren**Einbau der Testelemente**

Versiegelung des Kubusrahmen, indem die exponierte Seite vollflächig mit Bitumenband beklebt wird. Das Bitumenband wird dabei um die Ecke geführt, um von den Eternitplatten überlappt zu werden. Einbohren der Rampamuffen zur Befestigung der Haltebleche. In diese werden Gewindestangen eingebracht, auf welche die Haltebleche gesteckt und mit Flügelmuttern reversibel befestigt werden können. Einheben und Verkeilen der Testelemente. Aufbringen der Regen und Haltebleche in Verbindung mit Fugendichtband. Sichern der Bleche durch Muttern und Spenglerschrauben. Ausdämmen mit Mineralwolle und versiegeln mit Steico Klebeband von Innen.

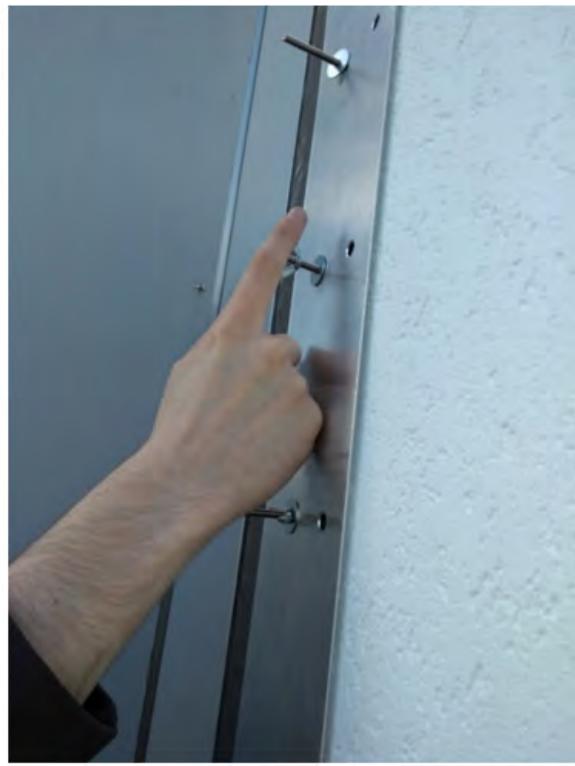
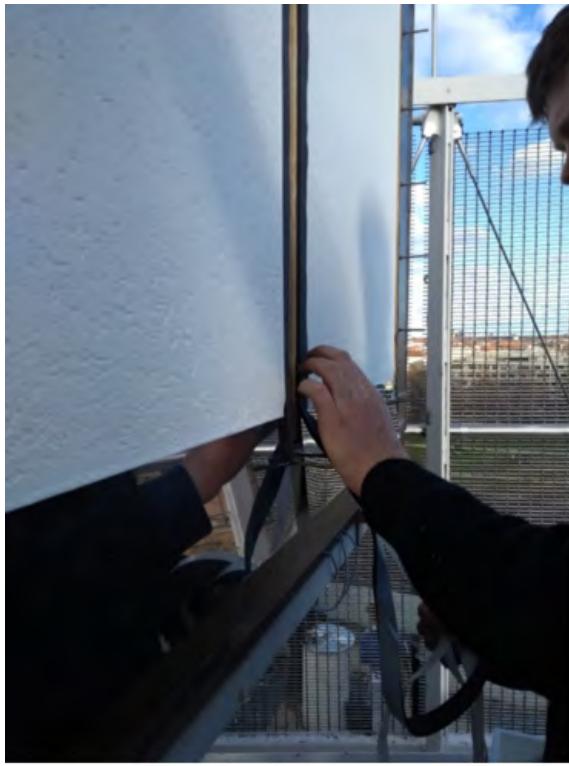
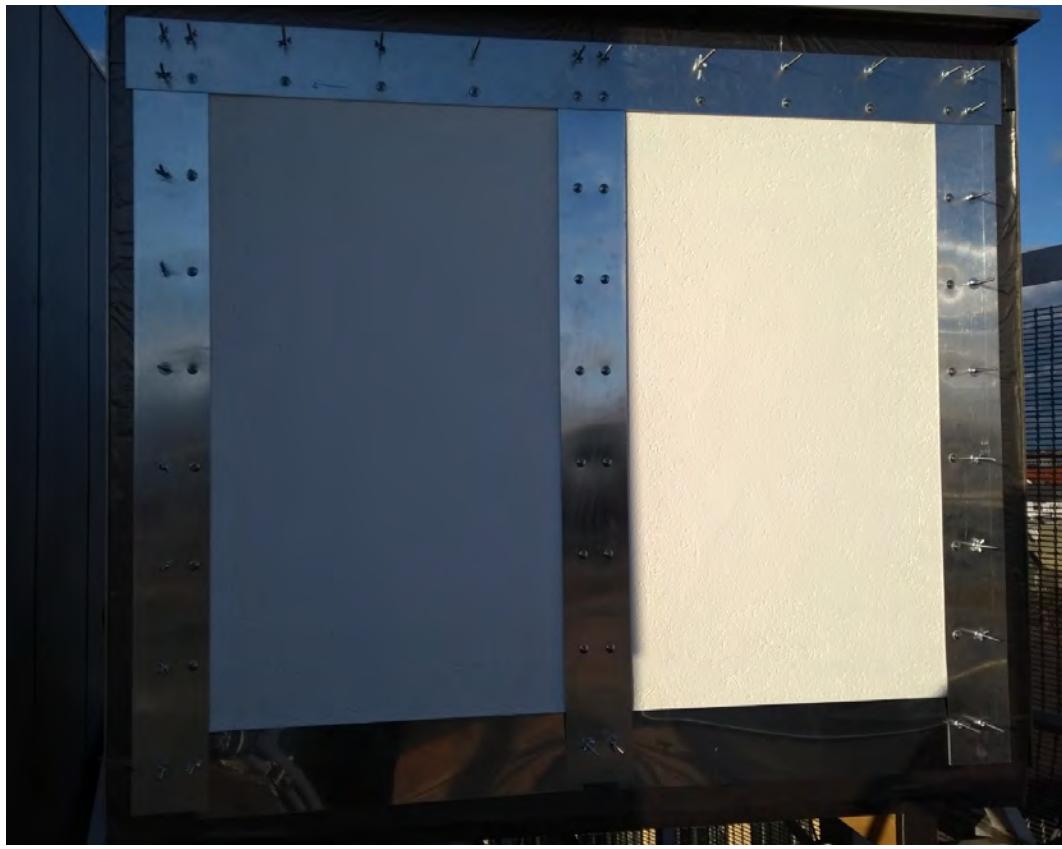
Abbildung 70 Bitumenversiegelung des Kubus (links) Bleche für den Witterungsschutz der Bauteile (rechts)**Abbildung 71 Aufbringen Fugendichtband (links) Verschraubung der Bleche (rechts)**

Abbildung 72 Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Außenansicht**Abbildung 73 Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Innenansicht**

Durchführungen

Um die Kabel und Schläuche in den Kubus einzuführen, wurde pro Kubus, je eine Platte vorgesehen an welcher Verschraubungen angebracht wurden. Die Verschraubungen gewährleisten einerseits einen dichten Verschluss und sorgen auch für die Zugentlastung der Kabel. Für die Durchführung der Daten Kabel wurde ein mehrfach Dichteinsatz verwendet welcher für insgesamt 3 Kabel ausgelegt ist.

Abbildung 74 Aluminiumplatte mit eingebauten Verschraubungen



Abbildung 75 Durchführung für 2x Luft 1x Strom 1x Daten 1x Reserve Blindstopfen



Abbildung 76 Durchführungsplatte im eingebauten Zustand



Verzeichnisse zu den Anlagen

Literaturverzeichnis

- AHLBORN Mess-und Regelungstechnik GmbH, Dr. Birgit Seitz & Dipl. Ing. (FH) Christian Schmidt. (2020). *ALMEMO®HandbuchFür alle ALMEMO®Messgeräte und Sensoren.*
- Arnold, M., Dietsch, P. & Winter, S. (2021). *MECHANICAL PROPERTIES OF INNOVATIVE MULTIFUNCTIONAL CROSS LAMINATED TIMBER.*
- Auer, T. & Nagler, F. (2017). *Edition Detail: Bd. 2. Zukunftsfähiger Schulbau: 12 Schulen im Vergleich* (S. Djahanschah, Hg.). DETAIL - Business Information GmbH.
- AVIA Semiconductor. *HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales.* <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1836471/0/0/1/hx711.html>
- Binderholz GmbH. *Massivholzhandbuch.* <https://www.massivholzhandbuch.com/>
- Böhm, F. (2021). *Ökobilanzierung eines thermisch aktivierten Wandbauteils* [Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science an der]. Technische Universität München, München.
- Böswirth, L. & Bschorer, S. (2014). *Technische Strömungslehre.* Springer Verlag.
- Brüninghoff, H. & Dietsch, P. (Hrsg.). (2010). *Berichte aus dem Bauwesen. Assessment of timber structures: COST action E55 modelling of the performance of timber structures ; [is the result of a task group meeting, held in September 2009 at the Chair for Timber Structures and Building Construction, Technische Universität München.* Shaker-Verl.
- Bundesamt für Wirtschaft und Energie. „*Efficiency first“ – Energieeffizienz als zentrale Säule der Energiewende: Überblick über Ausrichtung, Maßnahmen und Programme der Energieeffizienzpolitik.* machts-effizient.de
- Bundesgesetzblatt Teil 1; Nr. 24 (2006).
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamtes für Justiz (2020). AltholzV, 1–16.
- Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (2020).
- Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden, Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze (2020).
- Bundesverband Baustoffe Steine und Erden e.V. (2018). *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018. und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018.: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018.* Berlin.
- Burkhardt, W., Kraus, R. & Ziegler, F. J. (2006). *Projektierung von Warmwasserheizungen: Mit CD-ROM: Verordnungstexte, Programme, Berechnungsbeispiele, Hinweise* (7., überarb., erw. u. aktualisierte Aufl.). Oldenbourg Industrieverl.
- Christof Richter, Binderholz GmbH (7. Juli 2020). Interview durch Nils Schumacher. D-Kösching.
- Collet, F. & Pretot, S. (2014). Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. *Building and Environment*, 82, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.018>

Europaeisch Technische Bewertung ETA-06/0009 (2017).

Deutsches Institut für Normung e.V. (Juni 2012). *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz* (DIN 4074-1). 10772 Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (2021). Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise.

Dimitrios Kraniotis, Kristine Nore, Christoph Brückner & Anders Q. Nyrud (2015). Thermography measurements and latent heat documentation of Norwegian spruce (*Picea abies*) exposed to dynamic indoor climate. *Journal of Wood Science*, 62, 203–209.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Juli 2014). *Rund- und Schnittholz -Umweltproduktdeklarationen: – Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen* (DIN EN 16485).

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (März 2020). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen: Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte* (DIN EN ISO 15804). Berlin.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Mai 1998). *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen* (DIN 4102-1). 10772 Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Dezember 2010a). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008* (DIN EN 1995-1-1). 10772 Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Dezember 2010b). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009* (DIN EN 1995-1-2). 10772 Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Januar 2018). *Schallschutz im Hochbau: Teil 1: Mindestanforderungen* (DIN 4109-1). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Juni 2019). *Holzschutz – Teil 1: Allgemeines* (DIN 68800-1). 10772 Berlin. Beuth Verlag GmbH.

Dupleix, A., van Nguyen, T., Vahtikari, K. & Hughes, M. (2018). The anisotropic temperature rise on wood surfaces during adsorption measured by thermal imaging. *Wood Science and Technology*, 52(1), 167–180. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0968-8>

EastRising Technology Co., L. (2012). *ER-OLED013-1 Series OLED Display Datasheet*. https://www.buydisplay.com/download/manual/ER-OLED013-1_Series_Datasheet.pdf

Eckel, S. (2021). *Untersuchung der Sandkornrauigkeit ks von unterschiedlichen Holzoberflächen und Holzwerkstoffen* [nicht veröffentlichte Studienarbeit]. Technische Universität München, München.

Eckermann, W. & Ziegert, C. (2006). Auswirkungen von Lehmbaustoffen auf die Raumluftfeuchte.

Emmel, A.-C. (2017). *Untersuchung ausgewählter Anwendungsszenarien thermisch aktiverter Massivholzelemente* [nicht veröffentlichte Studienarbeit]. Technische Universität München, München.

Engel, T. & Lechner, M. (2020). Baurechtskonformes Planen und Bauen mit Holz - Verwendbarkeitsnachweise und technische Regeln für den Brandfall im Holzbau. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.14459/2020MD1543153>

Ertl, A. (2019). *Strömungsoptimierung von Kanalsystemen thermisch aktiverter Massivholzwände* [nicht veröffentlichte Studienarbeit]. Technische Universität München, München.

- Ettenhuber, D. (2020). *Thermisch aktivierte Massivholzelemente: Systementwicklung und -vergleich energetischer Integrationsmöglichkeiten in der Gebäudetechnik* [nicht veröffentlichte Studienarbeit]. Technische Universität München, München.
- Fischer, H.-M., Freymuth, H., Homann, M., Häupl, P., Jenisch, R., Richter, E. & Stohrer, M. (2008). *Lehrbuch der Bauphysik*. Vieweg+Teubner.
- FLIR Systems, I. (2016). *Radiometric Longwave Infrared (LWIR) Camera Module*.
https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/FLIR_Lepton_Data_Brief.pdf
- Fochler. (2021). *Verformungsverhalten von thermisch aktiviertem Brettsperrholz unter nutzungsbedingten Feuchtigkeitsänderungen* [nicht veröffentlichte Studienarbeit]. Technische Universität München, München.
- Glück, B. (1999). *Thermische Bauteilaktivierung Bauteilheizung und Bauteilkühlung*. Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung.
- greenTEG AG. (2018). *AMP 2100 - User Manual*. greenTEG AG.
- Gruzlewski, M. (2019). *Potenziale der baupraktischen Verwendung von thermisch aktivierten Massivholzbauteilen* [nicht veröffentlichte Studienarbeit]. Technische Universität München, München.
- Grynnning, S., Goia, F., Rognvik, E. & Time, B [B.] (2013). Possibilities for characterization of a PCM window system using large scale measurements. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(1), 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.09.003>
- Hameury, S. & Lundström, T. (2004). Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings*, 36(3), 281–292.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.003>
- Hans Hundegger AG. *Hundegger PBA-Industry*. <https://www.hundegger.com/de-de/maschinen/plattenbearbeitungsmaschinen/pba-industry>
- Hart Keramic AG (Hrsg.). (2020). *Lemix-Datenblatt*. 95706 Schirnding.
- Hauser, G., Helm, S. & Otto, F. (1991). *Beeinflussung des hygrischen und thermischen Raumklimas durch Wand- und Deckenbekleidungen aus Holz bzw. Holzwerkstoffen*.
- Hausladen, G., Liedl, P. & Saldanha, M. de. (2012). *Klimagerecht bauen: Ein Handbuch*. Birkhäuser.
- Heraeus Nexensos GmbH. (2019). *M 222, Platinum Temperature Sensor according to DIN EN 60751*.
https://www.heraeus.com/media/media/hne/datasheets/m_sensors/en_10/m_222_e.pdf
- Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M. (2016). *Physik für Ingenieure*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-49355-7>
- Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J.-K. (2018). *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource*. Edition Detail. Detail Business Information GmbH. <http://shop.detail.de/de/atlas-recycling.html>
- IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. (2019). *EPD-binderholz-Brettsperrholz-BBS_19-03-2024*.
- Ineichen, M. (2020). *Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygrokopisch aktiven Baustoffen: Messmethoden, Kennlinienerstellung und Validierung zur feuchte- und zeitabhängigen Wasserdampfaufnahme und -abgabe ausgewählter Baustoffe* [Masterthesis].
- InnoCrossLAM. *Forschungsvorhaben: InnoCrossLAM*. ZAG Slovenian National Building and Civil Engineering Institute. <http://innocrosslam.zag.si/>
- Umwelt-Produktdeklaration. binderholz Brettsperrholz BBS - binderholz X-LAM BBS - binderholz Cross Laminated Timber CLT BBS (2019).

- Janssen, H. & Roels, S. (2009). Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures. *Energy and Buildings*, 41(4), 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.007>
- Jungwirth, J. (2014). *Lastmanagement in Gebäuden: Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden*.
- Kalz, D. & Koenigsdorff, R. (2016). Nichtwohngebäude effizient heizen + kühlen: Erfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Wärmepumpen. *Informationsdienst, BINE*, (Themeninfo II/2016).
- Khouli, S. e., John, V., Zeumer, M. & Hartmann, F. (2014). *Nachhaltig konstruieren: Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl ; Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren* (1. Aufl.). de Gruyter. <https://doi.org/10.11129/detail.9783955532185>
- Kornadt, O., Carrigan, S., Schöndube, T. & Winter, S. (2018). *Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente*.
- Kraemer & Kraus Waermetechnik GmbH. *Elektro-Raumheizgeräte Das Komplettprogramm fuer Industrie und Gewerbe*. <https://www.kraemer-kraus.de/download/elektro-raumheizgeräte-2021.pdf>
- Künzel, H. M. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtenttransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*, Universität Stuttgart.
- Künzel, H. M. (1997). Raumluftverhältnisse in Wohnräumen: IBP-Mitteilung 314.
- Künzel, H. M., Holm, A., Sedlbauer, K., Antretter, F. & Ellinger, M. (2004). An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room.
- Künzel, H. M., Holm, A., Sedlbauer, K., Antretter, F., Ellinger, M. & Vesely, J. (2006a). Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. *Bauforschung für die Praxis*(75).
- Künzel, H. M., Holm, A., Sedlbauer, K., Antretter, F., Ellinger, M. & Vesely, J. (2006b). *Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen*.
- Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. *Holzbau Ergänzungsmodul*. Holzbau Ergänzungsmodul, München.
- Li, Y., Fazio, P. & Rao, J. (2012). An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room. *Building and Environment*, 47, 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.021>
- Lite-On Technology Corp. / Optoelectronics. *LTR-329ALS-01 Digital Ambient Light Sensor*. https://www.mouser.com/datasheet/2/239/Lite-On_LTR-329ALS-01%20DS_ver1.1-348647.pdf
- Lustig-Rössler, U. (1992). *Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Lehm als Baustoff*.
- Maxim Integrated Products Inc. (2012). *MAX31865 RTD-to-Digital Converter*. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>
- Medisana AG. *Luftbefeuchter AH 660*. <https://cdn.bueromarkt-ag.de/downloads/produktdatenblaetter/60067.pdf>
- Meinlschmidt, P., Mauruschat, D. & Briesemeister, R. (2016). Altholzsituation in Europa und Deutschland. *Chemie Ingenieur Technik*, 88(4), 475–482. <https://doi.org/10.1002/cite.201500023>
- Mestek, P., Werther, N. & Winter, S. (2016). Planen und Bauen mit Brettsperrholz: R04_T06_F01_. *Informationsdienst Holz*(Reihe 4, Teil 6, Folge 1), 1–36.
- Mestek, P. & Winter, S. (2011). *Berechnung und Bemessung von Brettsperrholz – ein Überblick*. 4. Europäischer Kongress für energieeffizientes Bauen mit Holz 2011,

- Mets, T. de, Tilmans, A. & Loncour, X. (2017). Hygrothermal assessment of internal insulation systems of brick walls through numerical simulation and full-scale laboratory testing. In Geving S. & Time B. (Hrsg.) (S. 753–758). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.022>
- Microchip Technology Inc. (2012). *MCP3911 3.3V Two-Channel Analog Front End*. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP3911-3.3V-Two-Channel-Analog-Front-End-DS20002286D.pdf>
- Mindrup, K. (2019). *Raumklimatisierung durch thermisch aktivierte Massivholzelemente: Konzeptentwicklung, Leistungsbetrachtung und Ableitung von Auslegungswerkzeugen* [Dissertation]. Technische Universität München.
- Molter, P. (2016). *Technikintegration in offenen Fassadensystemen*.
- MUSTERBAUORDNUNG (2019).
- Niemz, P. & Sonderegger, W. U. (2017). *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe : mit zahlreichen Bildern und Tabellen*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446445260>
- Nikuradse, J. Strömungsgesetze in rauen Rohren. In *VDI-Forschungsheft 361* (Ausgabe B Bans 4).
- Nore, K. (2016, 16. Juni). *Hygrothermal mass - potential improvement of indoor climate using building materials*. Wood Forum Building Nordic, Alto.
- Nore, K., Nyrud, A. Q., Kraniotis, D., Skulberg, K. R., Englund, F. & Aurlien, T. (2017). Moisture buffering, energy potential and volatile compound emissions of wood exposed to indoor environments. *Science and Technology for the Built Environment*, 23, 512–521.
- NXP Semiconductors N.V. (2021). *PCF85263A Tiny Real-Time Clock/calendar with alarm function, battery switch-over, time stamp input, and I2C-bus*. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF85263A.pdf>
- Osanyintola, O. F., Talukdar, P. & Simonson, C. J. (2006). Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture buffering capacity of spruce plywood. *Energy and Buildings*, 38(10), 1283–1292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.024>
- Europäisch Technische Bewertung (2017).
- Europäisch Technische Bewertung ETA-14/0349 (2020).
- Otto, F. (1995). *Einfluss von Sorptionsvorgängen auf die Raumluftfeuchte*.
- Pape, L. (2020). *Weiterentwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente anhand eines Prototyps* [nicht veröffentlichte Studienarbeit]. Technische Universität München, München.
- Pfafferott, J., Kalz, D. & Koenigsdorff, R. (2015). *Bauteilaktivierung. Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen*. Fraunhofer-IRB-Verl.
- Phymeas GbR. *Phymeas Heat Flux Sensors with temperature sensor (PT 100 Kl. A DIN IEC 751)*. https://www.phymeas.de/?page_id=2&lang=en
- Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen, Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer. (2014). *Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme*.
- Rode, C., Peuhkuri, R. H., Hansen, K. K., Time, B [Berit] & Svennberg, K. (2005). NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials. *AIVC 26th conference: Ventilation in relation to the energy performance of buildings. Air Infiltration and Ventilation*, 47–52.
- Rode, C., Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B [Berit], Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K. & Arvidsson, J. (2005). Moisture Buffering of Building Materials.

- Rotho Blaas SRL (Hrsg.). *WZU Zuganker*.
<https://www.rothoblaas.de/produkte/verbindungstechnik/holzbauverbinder/standard-winkelverbinder/wzu>
- Rüter, S. & Diederichs, S. (April 2012). *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. Hamburg.
- Saint-Gobain Rigips GmbH. (2021). *Verarbeitungsrichtlinien Trockenbau. Anleitung für das Fachhandwerk*.
- Saint-Gobain Rigips GmbH, BBU (Hrsg.). (2015, 30. Juni). *Produktdatenblatt - Rigips Climapit 10*.
- Saint-Gobain Rigips GmbH, HS (Hrsg.). (2015, 8. Juli). *Produktdatenblatt - Rigips Bauplatte RB 12,5*.
- Schild, K. & Willems, W. M. (2013). *Wärmeschutz*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-02571-7>
- Schmidt, S. & Gertis, K. (2015). Zur Ermittlung der Sorptionsenthalpie von Baustoffen. *Zur Ermittlung der Sorptionsenthalpie von Baustoffen*(37), Artikel 2.
- Schnider, T., Niemz, P., Steiger, B. & Arx, U. von (2011). Untersuchungen zum Versagen von Klebfugen unter klimatischer Langzeitbeanspruchung. *Bauphysik*, 33(1), 27–32.
<https://doi.org/10.1002/bapi.201110003>
- Seifert, J. H. (1970). *Untersuchungen über Sorption und Quellung von Holz und Holzwerkstoffen*.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2020). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen*.
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.html>
- STMicroelectronics. (2016). *LPS22HB MEMS nano pressure sensor: 260-1260 hPa absolute digital output barometer*. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00140895.pdf>
- Texas Instruments Inc. (2015). *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor*.
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1623761841515&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FHDC1080
- Thermal mass. (2021). https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_mass
- thinkstep AG. (2020). *GaBi ts* (Version Version 9.2.1.68) [Computer software].
- Umweltbundesamt Dessau-Roßlau. (2020). *Emissionen von Wärmekraftwerken und anderen Verbrennungsanlagen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie>
- van Belleghem, M [M.], Steeman, M [M.], Willockx, A., Janssens, A [A.] & Paepe, M. de [M.] (2011). Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials. *Building and Environment*, 46(4), 884–898. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.018>
- van Belleghem, M [Marnix], Steeman, M [Marijke], Paepe, M. de [Michel] & Janssens, A [Arnold]. Design of a test chamber for the investigation of moisture transport in air flows and porous materials.
- Volhard, F. & Röhlen, U. (2002). *Lehmabau Regeln*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-96899-9>
- Winkler, M., Nore, K. & Antretter, F. (2014). Impact of the moisture buffering effect of wooden materials on energy demand and comfort conditions.
- Woods, J. & Winkler, J. (2018). Effective moisture penetration depth model for residential buildings: Sensitivity analysis and guidance on model inputs. *Energy and Buildings*, 165, 216–232.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.040>
- Xiamen Jinxinrong Electronics Co., Ltd. *KS15 Solid State Relay*.
<http://www.relttech.de/mediapool/143/1439080/data/Datenbaetter/Jinxinrong/KS15.pdf>

XiDi Technology. (2015). *YHDC Split core current transformer*.
https://www.mciedronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf

Zanke, U. (2013). *Hydraulik für den Wasserbau*. Springer Verlag.

Zehfuß, J. (März 2020). *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*.

Ziegert, C. (2004). In Balance - Das Feuchtesorptionsvermögen von Lehmstoffen.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildung 1 Vergleich der gemessenen Sorptionsisothermen aller untersuchten Baustoffgruppen | A3 |
| Abbildung 2 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A4 |
| Abbildung 3 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A5 |
| Abbildung 4 Vier Baustoffproben #3 a - d | A6 |
| Abbildung 5 Vier Baustoffproben #4 a - d | A7 |
| Abbildung 6 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A8 |
| Abbildung 7 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A9 |
| Abbildung 8 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A9 |
| Abbildung 9 Vier Baustoffproben #8 a - d | A10 |
| Abbildung 10 Vier Baustoffproben #9 a - d | A11 |
| Abbildung 11 Vier Baustoffproben #10 a - d | A12 |
| Abbildung 12 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A13 |
| Abbildung 13 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A14 |
| Abbildung 14 Beispiel für eine der vier Baustoffproben | A15 |
| Abbildung 15 Vier Baustoffproben #15 a - d | A17 |
| Abbildung 16 Vier Baustoffproben #16 a - d | A18 |
| Abbildung 17: Zeitliche Abfolge der im Folgenden dargestellten Thermographien | A19 |
| Abbildung 18 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Gipskartonplatte #3 | A20 |
| Abbildung 19 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A21 |
| Abbildung 20 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Gipsfaserplatte #4 | A22 |
| Abbildung 21 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A23 |
| Abbildung 22 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #4 + #14 | A24 |
| Abbildung 23 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A25 |
| Abbildung 24 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Lehmbauplatte #5 + #14 | A27 |
| Abbildung 25 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A28 |
| Abbildung 26 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #5 + #14 + Kalkanstrich | A29 |
| Abbildung 27 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A29 |
| Abbildung 28 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Lehmbauplatte #8 | A30 |
| Abbildung 29 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A31 |
| Abbildung 30 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit tangentialem Brettschichtholz #9 | A32 |
| Abbildung 31 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A33 |
| Abbildung 32 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit stirnseitigem Brettschichtholz #10 | A34 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 33 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A35 |
| Abbildung 34 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Holzweichfaserplatte #13 | A37 |
| Abbildung 35 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A38 |
| Abbildung 36 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit lehmverputzter Holzweichfaserplatte (#13 + #14) | A39 |
| Abbildung 37 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A39 |
| Abbildung 38 a-i:Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Porenbetonstein #16 | A40 |
| Abbildung 39 Probekörper links, Referenzkörper rechts | A41 |
| Abbildung 40 Widerstandskennline Pt 1000 und Pt 100 | A42 |
| Abbildung 41 Abweichung des Luftfeuchtesensors in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte | A50 |
| Abbildung 42 Abweichungen der Temperaturmessung | A51 |
| Abbildung 43 Farbcodierung Verbindungskabel | A57 |
| Abbildung 44 Messverstärker | A58 |
| Abbildung 45 Messtechnik Schaltschrank mit Sensoren | A59 |
| Abbildung 46 Schaltschrank für Stromversorgung | A59 |
| Abbildung 47 Gehäuse für die Redbricks "Red-Box" | A60 |
| Abbildung 48 Luftbilder des Hauptgebäudes der TUM mit Standort der Solarstation | A62 |
| Abbildung 49 Solarstation auf dem Dach des TUM Hauptgebäudes | A63 |
| Abbildung 50 Darstellung des Kubus mit Außenabmessungen | A64 |
| Abbildung 51 Detailaufbau des Kubusfenster | A66 |
| Abbildung 52 Zustand der alten Kubus Konstruktion | A67 |
| Abbildung 53 Zustand der Konstruktionen Ost und West | A68 |
| Abbildung 54 Montage der neuen Bodenplatte | A68 |
| Abbildung 55 Montage OSB | A69 |
| Abbildung 56 Rahmendoppel (links) und Fensterlaibung (rechts) | A69 |
| Abbildung 57 Remontage des metallenen Dachrahmens (links) und fertig beplankter Innenraum (rechts) | A69 |
| Abbildung 58 Rahmen der Testelemente verleimt | A70 |
| Abbildung 59 Testweises verklotzen der Rahmen (Vollbild) | A70 |
| Abbildung 60 Testweises verklotzen der Rahmen (Detail) | A71 |
| Abbildung 61 Testelemente Holzrahmenbau (links) luftdichte Abklebung (rechts) | A72 |
| Abbildung 62 Holzrahmenbauwand teilbefüllt (links) mit Dämmfaserplatte (rechts) | A72 |
| Abbildung 63 Einlegen der Holzfaserdämmung in die Holzrahmenbauwand (links) und Holzfaserplatte auf das Element (rechts) | A73 |
| Abbildung 64 Holzrahmenleichtbauwand mit Putzschicht | A73 |
| Abbildung 65 Montage der Vakuumisolationspaneele in die Kuben | A74 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 66 Aluminiumrahmen | A75 |
| Abbildung 67 Fenstereinbau (links) Fenster abkleben (rechts) | A77 |
| Abbildung 68: Fenster fertig eingebaut | A77 |
| Abbildung 69 Wandtestelement mit Bohrungen für die Sensoren | A78 |
| Abbildung 70 Bitumenversiegelung des Kubus (links) Bleche für den Witterungsschutz der Bauteile (rechts) | A79 |
| Abbildung 71 Aufbringen Fugendichtband (links) Verschraubung der Bleche (rechts) | A79 |
| Abbildung 72 Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Außenansicht | A79 |
| Abbildung 73 Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Innenansicht | A79 |
| Abbildung 74 Aluminiumplatte mit eingebauten Verschraubungen | A80 |
| Abbildung 75 Durchführung für 2x Luft 1x Strom 1x Daten 1x Reserve Blindstopfen | A80 |
| Abbildung 76 Durchführungsplatte im eingebauten Zustand | A80 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Im Feuchtesprungversuch untersuchte Materialien beziehungsweise Materialkombinationen | A19 |
| Tabelle 2: DIN EN 60751:2008 S.15 Genauigkeitsklassen für Messwiderstände | A43 |
| Tabelle 3: Angaben für Berechnungen des Leitungswiderstands | A44 |
| Tabelle 4: Daten des Analog Digital Wandlers | A45 |
| Tabelle 5: Messwerte für Wärmeeintrag durch Messstrom | A47 |
| Tabelle 6: Berechnung Erwärmung des Sensors Daten aus Datenblatt (Heraeus, 2019) | A48 |
| Tabelle 7: Farbcodierung der Temperatursensoren | A55 |
| Tabelle 8: Farbcodierung Verbindungsleitung | A57 |