

**Einfach Bauen 2**

**Planen, Bauen, Messen**

**Schlussbericht**

## Impressum

### Autorinnen und Autoren

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Florian Nagler (Projektleitung)  
Dipl. Ing. (FH) Architekt Tilmann Jarmer, M.A.  
tilmann.jarmer@tum.de  
Dipl. Ing. Architektin Anne Niemann  
anne.niemann@tum.de

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer  
Laura Franke, M.Sc.  
laura.franke@tum.de

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter  
Zsafia Varga, M.Sc.  
zsafia.varga@tum.de

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen  
Fabian Diewald, M.Sc.  
fabian.diewald@tum.de

### Weitere Mitwirkende

Roman Ficht, B.Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)  
Arthur Coelho Debacco, B.Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)  
Dipl.-Ing. Architekt Stephan Ott, M.A. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)  
Nina Flexeder, M.Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

### Bildnachweis

Alle Abbildungen und Grafiken ©TUM, außer:  
Sebastian Schels: Seiten 37, 61, 73, 77-79, 153  
Florian Nagler Architekten GmbH: Seiten 32, 55 oben, 85, 94, 130, 136-137, 140-141

### Zitierweise

Jarmer, Tilmann; Niemann, Anne; Franke, Laura; Varga, Zsafia; Diewald, Fabian; Nagler, Florian; Auer, Thomas: Einfach Bauen 2 – Planen, Bauen, Messen. München, Juli 2021.

## Einfach Bauen 2 – Planen, Bauen, Messen

Anwendung integraler Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk in Pilotprojekten anhand der Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Einfach Bauen 1



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln der „Zukunft Bau“.

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-20.09

Projektlaufzeit: 01.2019–12.2020



Dieses Projekt wurde gefördert aus den Mitteln der bayerischen Bauwirtschaft.



## Zusammenfassung

In einem Pilotprojekt errichtete die B&O Gruppe in Bad Aibling drei Forschungshäuser aus Massivholz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk. Dabei kamen die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt “Einfach Bauen, Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion” kurz “Einfach Bauen 1” zur Anwendung. Das Projekt “Einfach Bauen 2 – Planen, Bauen, Messen; Anwendung integraler Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk in Pilotprojekten anhand der Ergebnisse aus SWD-10.08.18.7-16.29” begleitet das oben genannte Pilotprojekt unabhängig.

Ziel war es sicherzustellen, dass die Ergebnisse aus “Einfach Bauen 1” in die Konzeption und in die Ausführung der Forschungshäuser einfließen. Weiterhin wurde eine Befragung von acht am Bauprozess Beteiligten durchgeführt. Es zeigt sich, wie wichtig die Erprobung des Konzepts Einfach Bauen anhand der Forschungshäuser war. Einerseits werden diese aber immer noch als „Prototypen“ oder Leuchtturm-Projekte“ gesehen, andererseits konnten während des Bauprozesses wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, die in die weitere Anwendung einfließen sollten. Wichtig scheint auch die frühzeitige Kommunikation der Strategie an alle am Planungs- und Bauprozess Beteiligten zu sein, um Missverständnisse und Unsicherheiten zu vermeiden und Bedenken ausräumen zu können. Insgesamt scheint das Konzept auf großes Interesse zu stoßen, sowohl bei Planern als auch Bauherren und Handwerkern (siehe dazu Kapitel 2.1).

Die Planung und der Bauprozess wurden dokumentiert. Die Ergebnisse wurden aufgearbeitet und in Form von Plänen, Baustellenbildern zur Verfügung gestellt (siehe dazu Kapitel 2.2).

Am Bauteil der Infraleichtbeton-Außenwand sowie an parallel beim Betonierprozess entnommenen Prüfwürfeln wurden Bauteilmessungen zu z. B. Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Feuchteintrag durchgeführt. Insgesamt decken sich die Ergebnisse mit vergleichbaren Untersuchungen (siehe dazu Kapitel 3).

Erste Probemessungen des Innenraumkomforts wurden durchgeführt und daraus ein Messkonzept für eine Langzeitmessung abgeleitet, welche ab Januar 2021 bis Ende 2022 erfolgen soll. Gleichzeitig wurde parallel dazu ein Simulationsmodell erstellt, um einen Abgleich von Theorie und Praxis durchführen zu können. Die Testmessung ermöglichen, das Messkonzept für die nächste Projektphase zu optimieren. Dieser Prozess sowie erste Messergebnisse sind nun dokumentiert. (siehe dazu Kapitel 4).

Eine spezifische Ökobilanz sowie eine Lebenszykluskostenanalyse der drei Forschungshäuser wurde durchgeführt, um die drei Bauweisen auf dieser Ebene bewerten zu können. Neben dem Vergleich mit den Ergebnissen aus Einfach Bauen 1 wurden für die Außenwandbauteile aus Infraleichtbeton und Massivholz noch die Ökobilanz von Transport und Errichtung, welche bisher nicht Teil Betrachtung war, beispielhaft untersucht. Als Ergebnis kann festgestellt werden:

Verglichen mit der Herstellungsphase (A1-3), dem Austausch (B4) und der Entsorgungsphase (C1-4) des Materials, sind Transport (A4) und Errichtung (A5) allerdings zweitrangig. (siehe dazu Kapitel 5).

Die Ergebnisse der Forschung und die Erfahrungen aus dem Bauprozess wurden in einem Leitfaden zusammengefasst. Dieser soll Interessierten die Möglichkeit geben, die Strategie des Einfachen Bauens nachzuvollziehen und anzuwenden. Der Leitfaden ist nicht Teil dieses Berichts, da er als eigenständiges Werk veröffentlicht und auf [www.einfach-bauen.net](http://www.einfach-bauen.net) zum download angeboten wird.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
1.1	Hintergrund des Forschungsvorhabens .....	8
1.2	Projektziele .....	8
2	Planung und Bauprozess .....	10
2.1	Erfahrungsberichte der Projektbeteiligten .....	10
2.2	Dokumentation von Planung und Bauprozess .....	19
3	Gebäudehülle .....	84
3.1	Wärmestrommessungen .....	84
3.2	Feuchtemessungen .....	89
3.3	Bauteilmessung Infrarleichtbeton .....	90
4	Komfort und Energie .....	101
4.1	Ziel des Monitorings .....	101
4.2	Messkonzept .....	105
4.3	Messergebnisse .....	110
4.4	Simulationsmodell .....	116
4.5	Simulationsergebnisse .....	123
5	Ökologie und Lebenszykluskosten.....	129
5.1	Ökobilanzierung der drei Forschungsgebäude Bad Aibling .....	130
5.2	Ergebnisse LCA der drei Forschungsgebäude .....	131
5.3	Ökobilanzierung Prozesse A4&A5 .....	134
5.4	Lebenszykluskostenanalyse drei Forschungsgebäude Bad Aibling .....	144
6	Fazit.....	153
	Tabellenverzeichnis .....	155
	Abbildungsverzeichnis .....	156
	Anhang.....	163

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund des Forschungsvorhabens

Die Komplexität der Konstruktionen und Gebäudetechnik steigt seit Jahrzehnten stetig. Dies betrifft die Anforderungen an Standsicherheit, Wärme-, Feuchte-, Brand- und Schallschutz, Hygiene und Gesundheit wie auch den allgemeinen Nutzerkomfort. Das äußert sich in der fast unüberbrückbaren und weiter steigenden Zahl an Normen und Baugesetzen. Das anvisierte Ziel der Qualitätssicherung wird oft nicht erreicht: Die Folge der Komplexität ist eine hohe Fehlerquote in Planung und Ausführung sowie eine Überforderung von Bauherren und Nutzern. Hinsichtlich der Raumqualität ist der Standard in weiten Bereichen sogar gesunken.

Einfach Bauen 2 soll mit drei Pilotprojekten vor diesem Hintergrund den Anfangspunkt zu einer neuen, gegenläufigen Entwicklung markieren und so einen wichtigen Impuls in der deutschen Bauwirtschaft setzen. Dabei wird das Ziel verfolgt, Wohnungsbau preiswert und wirtschaftlich zu realisieren und reduzierte Haustechnikkonzepte einzusetzen, die einen Nutzereingriff ermöglichen und sich gegenüber diesem und den Umwelteinflüssen robust darstellen.

Das Forschungsvorhaben ist Teilarbeitsschritt des Gesamtprojekts "Einfach Bauen", das sich aufteilt in:

- **Einfach Bauen 1:** Forschung zu den Prinzipien des einfachen Bauens
- **Einfach Bauen 2:** Praktische Anwendung in drei Pilotbauten und Entwicklung eines Leitfadens
- **Einfach Bauen 3:** Konkrete Überprüfung der Qualitäten durch Messungen während der Nutzungsphase, um die Potentiale des einfachen Bauens konkret nachzuvollziehen.

## 1.2 Projektziele

Die erforschten Prinzipien des einfachen Bauens aus dem Forschungsvorhaben „Integrale Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk - Untersuchung der Wechselwirkungen von Raum, Konstruktion und Gebäudetechnik“ (kurz: Einfach Bauen 1) sollen in dem Anschlussprojekt "Einfach Bauen - Planen, Bauen, Messen" (kurz: Einfach Bauen 2) auf drei Wohngebäude (Pilotprojekte) angewandt und die Ergebnisse evaluiert werden.

Dabei verfolgt das Projekt drei Hauptziele:

1. "Einfach Bauen" konkret umsetzen: Der Bau der Prototypen soll durch das Forschungsprojekt begleitet werden, um sicher zu stellen, dass die Erkenntnisse aus der Forschung aus "Einfach Bauen 1" in den Bauten Umsetzung finden.
2. Einen Leitfaden "Einfach Bauen" erstellen: Die Erkenntnisse aus der praktischen Anwendung vom einfachen Bauen sollen unter Rückkopplung mit den Ergebnissen der Forschung aus "Einfach Bauen 1" zu einem allgemeinen Leitfaden zusammengefasst werden.

3. Ein Messkonzept für die Prototypen erstellen und erste Raummessungen durchführen: Ein Konzept für die Messung von Gebäudeparametern während der Nutzungsphase soll erstellt werden, um notwendige Vorbereitungen im Planungs- und Bauprozess nicht zu versäumen. Nach Fertigstellung der Bauten sollen erste Komfortmessungen von Testräumen stattfinden (abhängig vom zeitlichen Ablauf der Bauprojekte).

## 2 Planung und Bauprozess

MS 3 | Bearbeiter: Tilmann Jarmer / Anne Niemann

### 2.1 Erfahrungsberichte der Projektbeteiligten

#### Vorgehen

Das leitfadengestützte Interview ist eine Methode aus der empirischen Sozialforschung, die qualitative Daten liefert. Ziel ist es, Erfahrungen und Sichtweisen von Akteur\*innen in einem mündlichen Gespräch zu erheben und damit tiefere und breitere Einblicke in das Forschungsthema zu gewinnen. Anhand von Interviews wurden die Erfahrungen der am Planungs- und Bauprozess Beteiligten eingeholt. Insgesamt wurden acht Personen befragt, die als Handwerker, Techniker, Planer und Bauherrenvertreter tätig waren. Bei der Auswahl der Interviewpartner\*innen wurde versucht, eine möglichst heterogene Gruppe abzubilden.

*Tabelle 1: Übersicht der Interviewpartner und ihrer Beteiligung am Planungs- und Bauprozess (HM: Holzmassivhaus, LB: Leichtbetonhaus, MW: Mauerwerkshaus)*

<b>Gewerk</b>	<b>Gebäude</b>
HLS-Planer	LB / HM / MW
Qualitätssicherung Leichtbeton	LB
Bauleiter Rohbau	HM / MW
Rohbau	LB / HM
Zimmerer	HM und Dachstühle
Fenster / Türen	LB
Installation HLS	HM / MW
Bauherrenvertreter	LB / HM / MW

Die telefonisch geführten Gespräche wurden mit Einverständnis der Befragten digital aufgezeichnet. Im Anschluss daran wurde das Gesagte vom Forschungsteam durch wörtliches Abschreiben transkribiert und den Befragten zur Korrektur und Freigabe vorgelegt.

#### Fragestellung

In den Interviews wurden stichprobenartig die Erfahrungen hinsichtlich des Konzepts Einfach Bauen bei Planung und Baudurchführung und damit verbunden die persönliche Wahrnehmung und Bewertung abgefragt. Der Interviewleitfaden umfasst folgende Themen, die je nach Schwerpunkt des Befragten angepasst wurden:

- Einstieg / Vorstellung
- Beteiligung am Projekt
- Das Konzept Einfach Bauen:

- Persönliches Verständnis
- Erfahrungen bei der Durchführung
- Vor- und Nachteile gegenüber des normalen Bauprozesses
- Besonderheiten bei der Ausführung Holzbau
- Besonderheiten bei der Ausführung Leichtbeton
- Weitere Besonderheiten (je nach Schwerpunkt)
- Persönliche Bewertung der entstandenen Architektur
- Abschluss / Empfehlungen

Der komplette Interviewleitfaden und die transkribierten Interviews befinden sich in Anhang 1.

### **Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse**

#### **Der Begriff Einfach Bauen**

Fragestellung:

Der Begriff „Einfach Bauen“ ist im allgemeinen Sprachgebrauch nicht eindeutig definiert. Im Leitfaden wird er folgendermaßen beschrieben:

*Einfach Bauen bedeutet...*

- *die Komplexität im Hochbau zu reduzieren. Schon im Entwurf werden die Mittel der Architektur genutzt, um ein Gebäude zu schaffen, das von sich aus wenig Heizenergie benötigt und im Sommer nicht überhitzt. Dadurch kann die notwendige Gebäudetechnik auf wenige robuste Systeme reduziert werden.*
- *nach Möglichkeit einschichtige Bauteile aus nachwachsenden oder mineralischen Rohstoffen zu verwenden und unter Berücksichtigung der Materialeigenschaft robuste und langlebige Konstruktionen zu entwerfen.*
- *die technischen Systeme sowie die Arbeitsschritte der verschiedenen Sparten des Bauhandwerks möglichst sauber voneinander zu trennen. Das vereinfacht den Bauprozess enorm und auch zukünftige Änderungen lassen sich mit einem Minimum an Zerstörung realisieren.*
- *die Umwelt über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes hinweg zu schonen. Das Ergebnis sollen Gebäude sein, die einfach zu bauen und einfach zu nutzen sind.*

Diese Inhalte wurden den am Planungs- und Bauprozess Beteiligten in Projektbesprechungen und durch die Übermittlung von Planunterlagen und Beschreibungen vermittelt. Die Frage zielte darauf ab, inwieweit die Befragten den Begriff „Einfach Bauen“ ähnlich wie das Forscherteam interpretierten.

Als ein Ziel wurde gesehen, mit wenig Materialeinsatz zum größtmöglichen Erfolg zu kommen.

*„Es ist ein Pluspunkt, wenn man möglichst wenige Baustoffe für unterschiedliche Bauteile verwenden kann.“*

(Bauleiter Rohbau)

*„Einfach Bauen bedeutet, dass kostengünstig, ressourcensparend und mit kürzerer Bauzeit gebaut wird.“* (Bauleiter)

Zudem kam die Rückkehr zu alten Bautraditionen zur Sprache:

*„Ich verstehe da ein ehrliches Bauen darunter – man darf ruhig sehen, wie etwas entstanden ist.“*

(Fenster / Türen)

*„Einfach Bauen ist für mich „zurück zu den Wurzeln“, mit nicht übermäßig großem technischem und finanziellem Aufwand ein Gebäude zu erstellen, das keinen unnötigen Schnickschnack hat, sondern die wesentliche notwendige Gebäudetechnik aufweist, die im Zuge der Nutzung wichtig ist.“*

(Qualitätssicherung Leichtbeton)

Auch die Flexibilität für der Häuser für zukünftige Umnutzungen und Umbauten wurde als Vorteil gesehen:

*„Die Flexibilität ist hier sehr gut gegeben, weil die Badzellen und Schächte zentral angeordnet sind. Dadurch kann man Trinkwasserleitungen oder Heizkörperanbindungen von dort aus gut an andere Punkte ziehen, eventuell auch über die Decke. So wäre auch ein Aufputzanschluss möglich.“*

(TGA-Planer LB/HM/MW)

Fazit:

Der Begriff Einfach Bauen wurde von allen Befragten ähnlich interpretiert im Sinne der Reduktion der Materialien, der Steigerung der Effizienz und Flexibilität, und der ressourcenschonenden Bauweise. Der erste Schritt, die Kommunikation des Konzepts Einfach Bauen, war damit zumindest bei den Interviewpartnern erfolgreich. Dass sich die Vermittlung der Strategie nicht bei allen am Bau Beteiligten durchgesetzt hat, zeigt der Punkt „Erfahrung im Bauprozess – Hemmnisse“.

## **Erfahrungen im Bauprozess**

Fragestellung:

Ansatzpunkt war, dass sich durch gezielte Maßnahmen der Bauprozess vereinfachen und dadurch schneller, reibungsloser und weniger fehleranfällig werden sollte:

- die Reduktion der Schichten in der Außenwand durch die Verwendung monolithischer Konstruktionen (s. Abb. 5, 21, 54)
- die generelle Vereinfachung von Details (siehe z.B. Abb. 49, 59)

- das Verzichten auf Bauteile (Keller, Balkone)

Zudem wären weniger Gewerke beteiligt und ihre Präsenz auf der Baustelle zeitlich entzerrt. Ziel war es herauszufinden, ob diese Annahme zugetroffen hat.

### **Vorteile**

Positiv wurde bewertet, dass durch den Verzicht auf viele Bauteilschichten der Bauablauf nicht durch andere Gewerke unterbrochen wurde. Zudem haben sich durch die einfache Bauweise mit nur wenigen Decken- und Wanddurchbrüchen die Nacharbeiten reduziert.

*„Es waren keine Abstimmungen mit anderen Gewerken nötig, weil: Die waren ja am Bau noch nicht relevant, die mussten noch nicht kommen, irgendwelche Leitungen verlegen und so weiter: Das war eine Vereinfachung.“*

(Bauleiter Rohbau)

Der Einsatz monolithischer Außenwandkonstruktionen wurde mehrheitlich als Vorteil gesehen. Vor allem der Leichtbeton konnte hier seinen Vorteil ausspielen:

*„Die Wände werden geschalt, der Beton wird eingefüllt, und damit ist die Außenwand fertig. Da muss nicht mit Dämmung zusätzlich gearbeitet werden, also mit in ihrer Nachhaltigkeit problematischen Isolierschichten. (...) Er wird im Fahrmischer fix und fertig auf die Baustelle geliefert – verarbeitungsfertig und komplett ohne dass Verpackungsmüll oder Abfall entsteht.“*

(Qualitätssicherung Leichtbeton)

Zudem wurde die materialgerechte Planung der Fenster mit ihrer jeweils an den Baustoff angepassten Form hervorgehoben:

*„Die runde Form der Fenster sehe ich beispielsweise als Vorteil. Welcher andere Baustoff lässt sich in jede beliebige Form bringen? Insofern schalbar, kann man Beton und natürlich auch den Infralichtbeton in jede beliebige Form gießen, wo er erhärtet und damit die gewünschte Form annimmt.“*

(Qualitätssicherung Leichtbeton)

Bei den Forschungshäusern wurde aufgrund der Vereinfachung auf eine Unterkellerung verzichtet. Neben der Kostenersparnis führte dies auch zu einer Verkürzung der Bauzeit um einen Monat. Durch zentrale Schächte und wohnungsnaher Frischwasserstationen konnten lange Warmwasser- und Zirkulationsleitungen vermieden werden, was sowohl hygienisch als auch materialsparend ist.

### **Erfahrungen im Bauprozess: Hemmnisse**

Da das Konzept Einfach Bauen neu und noch wenig erprobt ist, gaben viele der Befragten an, dass eine tatsächliche Vereinfachung in vielen Punkten noch nicht stattgefunden hat:

*„Das, was man sich auf der Baustelle gespart hat, hat man vorher in sehr viel Planung und Vorbereitung investiert. Beispielsweise bei den Fenstern: Man hat sich natürlich dadurch, dass mit Fensteranschlag und Kompriband gearbeitet wurde, die Putzarbeiten oder eine Verleistung oder Abdichtung gespart. Dafür haben wir vorher viel Zeit investiert um herauszufinden: Wie kriegt man es – obwohl es eine Sonderkonstruktion ist – hin, dass es am Ende schlagregendicht ist. Und wie schaut es am Ende noch ordentlich aus.“*

(Fenster / Türen)

Teilweise wurde sogar von einem Mehraufwand durch die Planung berichtet:

*„Normalerweise verziehen wir unsere Leitungen im Bodenaufbau. Das ist für uns einfacher und schneller. Und bei diesem Projekt wurde viel an der Decke verlegt. Das war für uns ein Mehraufwand. Wir mussten immer auf die Leiter rauf. Wir haben da schon 30 % länger gebraucht. Am Boden kann man die Leitungen allein verlegen. Auf der Leiter braucht man immer einen Zweiten, der etwas hält oder etwas festmacht, sonst wird man nicht froh.“*

(Installation HLS)

Obwohl von Beginn des Projekts an die Besonderheiten der Bauaufgabe und die Einbindung in ein Forschungsvorhaben allen Beteiligten klar kommuniziert wurde, gab es offensichtlich aufgrund des Abweichens von einer „normalen“ Bauaufgabe eine Reihe von Missverständnissen auf der Baustelle. Dies bezog sich vor allem auf die vereinfachte Bauausführung, die den gewohnten Abläufen widersprach:

*„Wir haben allerdings auch gegen gewisse Windmühlen gekämpft, sowohl auf handwerklicher Weise – manchmal sind die Handwerker einfach losgerannt. Ich erinnere da nur ans erste Dach, da hat er alles nach Regeln der Kunst gemacht, und eigentlich war die vereinfachte Bauweise der Plan. Da bist du manchmal von Handwerkern vor vollendete Tatsachen gestellt worden, dass wir uns beide angeguckt haben und gesagt haben, das war jetzt eigentlich nicht der Plan.“*

(Bauherrenvertreter)

*„Wir mussten uns stärker mit den Nachunternehmern abstimmen. Zum Beispiel beim Thema anerkannte Regeln der Technik. Wir mussten sie überzeugen, dass sie mitmachen. Manche haben Bedenken angemeldet, die mussten wir ausräumen.“*

(Bauleiter)

*„Das war das tägliche Brot hier auf der Baustelle, dass die meisten Handwerker gesagt haben: „Ja, aber so kann man es ja nicht bauen, weil es nicht meiner Bauvorschrift entspricht.“*

(Bauherrenvertreter)

Fazit:

Grundsätzlich haben sich einige unserer Erwartungen bestätigt. Die einfachen Details und die überschaubare Anzahl an Gewerken, die selten zeitgleich auf der Baustelle arbeiteten, haben für

einen störungsfreieren Ablauf und in der Folge für weniger Nacharbeiten gesorgt. Die Forschungshäuser werden als Prototypen oder „Experimentalbauten“ gesehen. Um die Vorteile des Konzepts Einfach Bauen auszunutzen, müsse „serieller gebaut“ werden. Mehr Erfahrungen mit „einfachen“ Bauten würden den Firmen sicherlich helfen, die Bedenken auszuräumen. bzw. eine neue Arbeitsroutine zu schaffen.

## **Besonderheiten Leichtbeton**

Fragestellung:

Das Material Leichtbeton ist ein relativ neuer Baustoff. Wir wollten erfahren, wie praxistauglich er wirklich ist.

Grundsätzlich wird das Material positiv eingeschätzt, da es viele Eigenschaften in sich vereint:

*„Hier zeigen sich die einmaligen Vorzüge des Baustoffs Beton deutlich: Infraleichtbeton ist zum einen in der Lage, tragend, also statisch wirksam zu sein. Gleichzeitig weist er dämmende, also isolierende Eigenschaften auf. Und der dritte Vorteil, der den Beton auszeichnet, ist, dass er auch erhöhte gestalterische Anforderungen erfüllt, also auch ästhetisch ansprechende Oberflächen bietet – Stichwort Sichtbeton. In meinen Augen ist Infraleichtbeton ein idealer Baustoff.“*

(Qualitätssicherung Leichtbeton)

Die Verarbeitung schien allerdings nicht immer problemlos zu verlaufen. Teilweise hat die erste Füllung Beton in der Schalung schon abgebunden, bevor die nächste Lieferung aus dem weiter entfernten Werk angekommen ist, so dass es sich nicht mehr mit dem Bestehenden vermischt hat. Daher rührt die Empfehlung, ein ortsnahes Betonwerke einbinden, bzw. vor Ort mit mobilen Mischwerken zu operieren und somit den Beton direkt auf der Baustelle herstellen. Voraussetzung dafür ist, dass der Infraleichtbeton von mehreren Anbietern hergestellt wird:

*„Und dann war noch ein bisschen eine Schwierigkeit bei der Disposition der Lieferung vom Infraleichtbeton, da das Betonwerk nicht in der Gegend war, hat sich das unterschieden gegenüber anderen Bauvorhaben.“*

*„Die Kranbeschickung mit dem Kübel hat kein Problem dargestellt, nur wenn dann kein Beton mehr auf der Baustelle war, weil die nachfolgenden Mischer nicht gekommen sind, ist das Absitzen des Betons so schnell gegangen, dass der Beton schon abgebunden hatte, sodass der Beton der nach einer halben oder einer Stunde draufgekommen ist, sich dann nicht mehr mit dem Bestehenden vermischt hat.“*

(Bauleiter Rohbau)

Bemängelt wurde die aufwändige und fehleranfällige Herstellung der Öffnungen:

*„Diese Schalungen der Rundbogenfenster und Türen mit den Anschlagwinkeln. Das war natürlich sehr aufwändig. Und es verzeiht auch keinen Fehler. Wenn man da einen Fehler macht, dann kann man auch nicht nacharbeiten, wie bei einem Ziegelhaus.“*

(Bauleiter Rohbau)

Die Verarbeitung von Leichtbeton funktioniert anders als mit herkömmlichen Betonen. So ist jede Erfahrung damit hilfreich und führt evtl erst beim nächsten Projekt zum Erfolg:

*„Um Schäden nach dem Ausschalen zu vermeiden, sollte man den Beton ausreichend lang in der Schalung belassen. Bei den neuen Bauvorhaben, die wir jetzt angefangen haben, haben wir empfohlen, der Beton sollte mehrere Tage in der Schalung sein, immer in Abhängigkeit von der Temperatur. Wird die Schalung zu früh gelöst, kann es insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen zu Oberflächenschäden kommen, da der Beton noch nicht die ausreichende Zugfestigkeit hat.“*

(Qualitätssicherung Leichtbeton)

Von Bauherrenseite wurde klar der Wunsch nach Kosteneinsparung kommuniziert. Das bezieht sich zum einen auf das relativ neue Material Leichtbeton, das im Vergleich mit den anderen Bauweisen zu verhältnismäßig hohen Baukosten geführt hat:

*„Beton würde [Anm: wenn nochmal gebaut würde] komplett ausscheiden, es ist auch ein Riesenkostenthema. Da ist ein Haus hingestellt worden, das 1,5 Mio Euro gekostet hat, aber nur einen Sachwert von 800.000 Euro besitzt.“*

(Bauherrenvertreter)

Fazit:

Der Baustoff Leichtbeton wurde ambivalent bewertet: Zwar entfallen beim monolithischen Einbau weitere Arbeitsschritte wie z.B. Dämmung anbringen. Auf der anderen Seite bedeutet die Verarbeitung einen gewissen Mehraufwand und erfordert Erfahrung mit dem relativ neuen Material (s. Abb. 8). Auch ist er (zumindest derzeit) erheblich teurer als vergleichbare Konstruktionen.

## **Besonderheiten Massivholz**

Massivholzbau ist mittlerweile eine etablierte Bauweise. Uns interessierten im Kontext Einfach Bauen die Verbesserungsmöglichkeiten, die es gerade in Bezug auf den Bauprozess gibt.

Die großzügige Raumhöhe der Forschungshäuser unterscheidet sich von marktüblichen Wohngebäuden und trägt zum ausgeglichenen Raumklima bei. Doch hat dies eine direkte Auswirkung auf den Bauprozess. Es kam der Vorschlag, die Stockwerkshöhe auf die maximale Transportbreite auszulegen (max. 3 Meter):

*„Durch die große Raumhöhe mussten wir die Bauteile horizontal stoßen. Dadurch hatten wir mehr Teile und es hat deshalb etwas länger gedauert.“*

*„Wir haben bei diesem Projekt 3,15 m Transportbreite gehabt. Deshalb brauchten wir eine Sondergenehmigung und Polizeibegleitung durch den Ort.“*

(Zimmerer)

Um die Speichermassen zu erhöhen, wurden im Holzhaus Betondecken vorgesehen. Das führte sowohl zu Schwierigkeiten im Bauablauf, als auch zur Verunreinigung der Wände (s. Abb. 27, 48):

*„Durch die freistehenden Wände, die wir mit Streben absichern mussten, bis die Decken darauf betoniert wurden, brauchten wir mehr Platz. Somit wäre es dort schwierig geworden, wenn noch andere Firmen zeitgleich gearbeitet hätten.“*

*„Der Betoniervorgang hat doch dazu geführt, dass wir die Wände danach noch einmal schleifen mussten, um zum Beispiel Wasserflecken oder Betonreste zu entfernen. In derselben Zeit hätten wir eigentlich auch schon die Decken legen können. Das ganze Gebäude hätten wir so in sechs Tagen bis zur Decke über dem 2. Obergeschoss aufrichten können.“*

(Zimmerer)

Ein Verbesserungsvorschlag sieht ein alternatives Deckensystem vor:

*„Wenn man auf den thermischen Speichereffekt der Betondecken nicht verzichten möchte, müsste man eine dünne Platte einbauen die als verlorene Schalung unter der Betondecke verbleibt. Dadurch habe ich auch die Wände schon mit einander verbunden und der Kubus hält insgesamt schon besser zusammen.“*

(Zimmerer)

Fazit:

Der Massivholzbau ist eine etablierte Bauweise. Um zukünftig reibungslosere Abläufe auf der Baustelle zu ermöglichen, sollten alternative Konzepte insbesondere für die Decke angedacht werden.

## **Persönliche Bewertung**

Fragestellung:

Durch die materialgerechte Konstruktion ergibt sich eine eigene Ästhetik, z.B. in der Form der Fenster (s. Abb. 6) und durch die unverkleideten Oberflächen. Zwar ist die Wahrnehmung von Architektur sehr individuell und von vielen persönlichen Faktoren beeinflusst. Doch spielt die Akzeptanz des Designs eine wichtige Rolle in der Nachhaltigkeit und Langlebigkeit der

Gebäude – was nicht gefällt, wird irgendwann abgerissen. Um ein kleines Stimmungsbild zu erhalten wollten wir wissen, wie die Interviewten ganz persönlich die Architektur der Häuser gefällt.

*„Die Architektur ist sehr stimmig. Sie ist zeitlos von der Form und der Struktur und unterliegt keinen Modetrends – Kann man immer bauen. Kann man in der Stadt machen, kann man auf dem Land machen. Ist nicht auffällig, passt überall rein.“*

(Bauleiter Rohbau)

Das Mauerwerksgebäude wurde überwiegend als traditionell empfunden:

*„Ich bin ein bisschen altbacken – ich würde in das Ziegelhaus einziehen. (lacht) Wir sind bei uns in Bayern auf ein Ziegelhaus fixiert. Bei uns gibt es Lehmgruben, deshalb ist der Ziegel seit jeher der Favorit.“*

(Bauleiter Rohbau)

Beim Holzgebäude wurde die Haptik und Wärme des Materials hervorgehoben:

*„Von der Haptik ist es das Schönste. Man merkt die Wärme von den Wänden.“*

(Bauleiter)

Das Leichtbetonhaus scheint sehr gegensätzliche Empfindungen hervorzurufen:

*„Ich kriege ja hier das Feedback auf dem Gelände, da wird das Betonhaus ein bisschen als „Betonkirche“ verschrien. Das kommt gar nicht gut an in der Öffentlichkeit.“*

(Bauherrenvertreter)

*„Ich finde auch die Kombination von dem rustikalen Beton und der Lärche dazu gut. Das ist ja fast schon klassisch.“*

(Fenster / Türen)

Die Fensterformen mit Segment- und Rundbögen bekommen mehrheitlich positive Resonanz:

*„Ich persönlich würde den Ziegelbau vorziehen, wenn ich irgendwo einziehen würde.(...) Es ist architektonisch auch schön mit Halbrundbögen.“*

(Bauherrenvertreter)

Positiv wurde die überdurchschnittliche Raumhöhe genannt:

*„Die Deckenhöhe macht schon was her, das gibt ein gutes Gefühl.“*

(Installation HSL)

#### Fazit:

Die Meinungen gingen gerade in Hinblick auf die Materialien sehr auseinander. Durch die unterschiedliche Ästhetik der in drei Materialien gebauten Häuser konnte sich jeder der Interviewten mit zumindest einem der Gebäude anfreunden.

### Zusammenfassung

Es zeigt sich wie wichtig die Erprobung des Konzepts Einfach Bauen anhand der Forschungshäuser war. Grundsätzlich haben sich einige unserer Erwartungen bestätigt. Der Begriff Einfach Bauen wurde von allen Befragten ähnlich interpretiert wie vom Forschungsteam. Die einfachen Details und die überschaubare Anzahl an Gewerken haben für einen störungsfreieren Ablauf und in der Folge für weniger Nacharbeiten gesorgt. Die monolithischen Bauweisen wurden mehrheitlich positiv bewertet. Einige Abläufe, gerade in der Bearbeitung des relativ neuen Materials Leichtbeton, müssen allerdings noch verbessert werden. Auch die im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen hohen Kosten dafür wurden kritisiert. Der Massivholzbau in Kombination mit Ortbetondecken ist noch nicht ganz zufriedenstellend gelöst. Die persönliche Bewertung der Ästhetik der Gebäude war sehr heterogen, aber überwiegend positiv.

Insgesamt wurden während des Bauprozesses wertvolle Erfahrungen gesammelt, die in die weitere Anwendung einfließen sollten. Wichtig scheint die frühzeitige Kommunikation der Strategie an alle am Planungs- und Bauprozess Beteiligten zu sein, um Missverständnisse und Unsicherheiten zu vermeiden und Bedenken ausräumen zu können. Das Konzept scheint auf großes Interesse zu stoßen, sowohl bei Planern als auch Bauherren und Handwerkern.

## 2.2 Dokumentation von Planung und Bauprozess

Die Erkenntnisse aus Einfach Bauen 1 wurden durch Florian Nagler Architekten übernommen und im Rahmen der Planung gemäß der projektspezifischen Anforderung zusammen mit den anderen Planungsbeteiligten (Tragwerksplaner, Bauphysiker, Brandschutzplaner) entwickelt und geprüft. Beispielhaft sind im Anhang 2 die aktuellen Details (auf DIN A4 verkleinert) für den Rohbau aus der Planung angefügt.

Der Bauprozess wurde durch regelmäßige Besuche der Architekten auf der Baustelle überwacht und dokumentiert. Ein umfangreicher Auszug der Baustellenfotos mit erläuternden Texten ist auf den folgenden Seiten zusammengestellt. Dort werden Herausforderungen bei Konstruktion und Material und die gewählten Lösungswege beim Bau beschrieben.



*Abbildung 1: Das Planum für die Bodenplatte ist erstellt.*

Die Zu- und Ableitungen für die Gebäudetechnik sind in der Schotterebene verlegt und gebündelt an den Schächten positioniert. Durch den Entfall eines Kellers hat die Baustelle sehr einfach begonnen.



Abbildung 2: Die Bodenplatte ist betoniert.

Statt konventioneller Stahlbewehrung kam eine Stahlfaserbewehrung zum Einsatz. Außen umlaufend ist die Anschlussbewehrung für die Sockelaufkantung zu erkennen. Der Bereich in Hintergrund direkt vor dem LKW wird von einem eingeschossigen unbeheizten Anbau belegt, der als Abstellfläche und auch als gemeinschaftlicher Freibereich genutzt werden soll.



Abbildung 3: Die Schalung für die erste Infraleichtbeton-Wand wird aufgestellt.

Obwohl sowohl Innen- als auch Außenseite sichtbar bleiben sollen (Sichtbeton) werden keine Anforderungen an die Oberfläche, die Lage der Abstandhalter oder die Anordnung von Schalfugen gestellt. Einzig die äußere Schalfläche wird mit sägerauen Brettern unterschiedlicher Breite belegt, um durch die entstehende Struktur eine Einheitlichkeit der Fassade zu bewirken.

Die Sockelaufkantung, die die Infraleichtbetonwand vor Spritzwasser und Feuchtigkeit schützt ist hier bereits errichtet und abgedichtet.

Der Verdrängungskörper für die Fensteröffnung wird gerade positioniert.



Abbildung 4: Blick von oben in die geschalte Außenwand.

Der Infraleichtbeton breitet sich horizontal in der Schalung aus. Die Infraleichtbeton-Wände werden ohne Bewehrungsstahl erstellt. Dadurch wird die graue Energie des Bauteils gesenkt (Stahl benötigt viel Energie in der Herstellung).



*Abbildung 5: Türöffnung und Verdrängungskörper*

Dadurch ist es im Gegenzug wiederum notwendig Öffnungen mit einem Bogen zu überkragen. Im kleinen Bild ist der entsprechende Verdrängungskörper zu sehen.



*Abbildung 6: Fußpunkt der Innenwände.*

Die Innenwände wurden ebenfalls ohne Bewehrungsstahl errichtet, aber mit Normalbeton ausgeführt, um thermische Speichermasse zu schaffen und ausreichende Schalldämpfung im Gebäude zu erreichen. Damit am Fuß der Wand keine konstruktiv problematische Kältebrücke zur Bodenplatte hin entstehen, wurde ein Kimmstein dazwischengesetzt.



*Abbildung 7: Durch die poröse Struktur des Infraleichtbetons ist es beim Ausschalen zu Abplatzungen gekommen.*

Die Rohbaufirma hat dann entsprechend reagiert und die Verdrängungskörper so gestaltet (schräge Fuge), dass der Ausbau reibungsloser funktionierte.

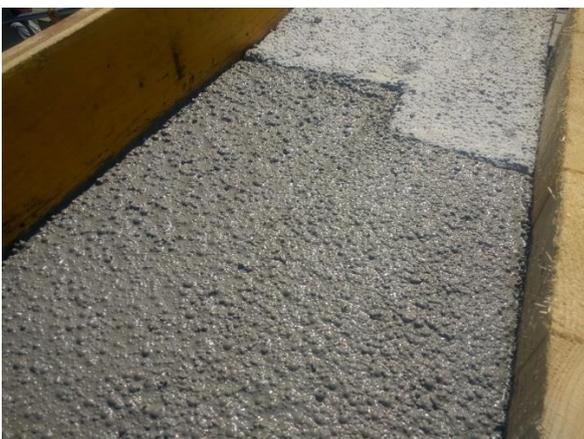


Abbildung 8: Um die Rissbildung durch das Schwinden und Kriechen des Infraleichtbetons gering zu halten, wurde in versetzten Abschnitten betoniert.

Die Arbeitsfugen wurde als Z-Fuge ausgeführt (kleines Bild, links) und mit einem Dichtband angedichtet (kleines Bild, rechts)



Abbildung 9: Eine vorgefertigte Badzelle wird in den Rohbau eingebracht. Sämtlich Bäder wurden in allen drei Forschungshäusern vorgefertigt.



Abbildung 10: Die Decken wurden ebenfalls mit Stahlfaserbeton hergestellt.

Dadurch wurde der Stahlanteil gegenüber einer Konventionen Bewehrung von 58 kg/m<sup>3</sup> auf 35 kg/m<sup>3</sup> gesenkt. Da der Anteil an nicht erneuerbarer Energie im Stahl ca. 75-mal höher ist als beim Beton, reduziert diese Senkung den Gesamtwert um ca. 13 %. Die Ausführung war kostenneutral zu einer konventionell bewehrten Stahlbetondecke.



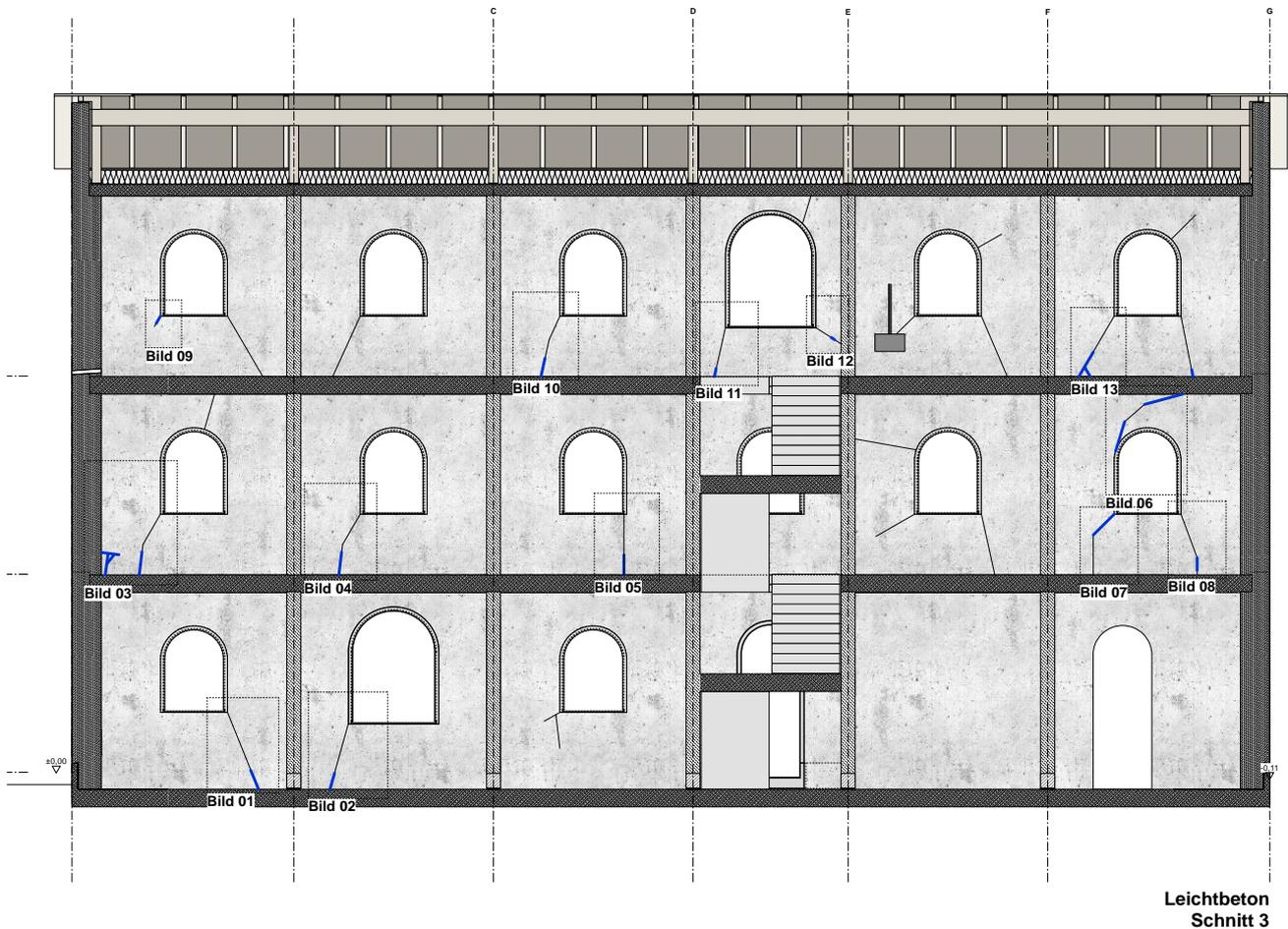
Abbildung 11: Da die Decke ohne weiteren Fußbodenaufbau direkt mit einem Bodenbelag belegt wird, kommt ein Flügelglätter zum Einsatz.



Abbildung 12: Durchfeuchtete Wetterseite am Montag 10.10.2020 um 13 Uhr hervorgerufen durch das Sturmtief Sabine.



Abbildung 13: Die Situation um 15 Uhr. Also ca. 2 Stunden später. Die Oberfläche der Wand beginnt abzutrocknen.



Aufnahme Risse Südseite von Innen 10.2.202, 13 - 15 Uhr

— Rissverlauf

— Feuchte zum Zeitpunkt der Aufnahme

Abbildung 14: Detaillierte Plan-Aufnahme der Schwindrisse. Durch den starken Wind und den damit einhergehenden Druckunterschied zwischen Wetterseite und Wetterrückseite, kam es vermutlich zu einer Sogwirkung zwischen Außenseite und Innenseite der Außenwand auf der Wetterseite

An einzelnen Schwindrissen war Feuchte auf der Wandinnenseite zu erkennen. Oben ein Plan, der die Schwindrisse und die Feuchtestellen dokumentiert. Im Folgenden die entsprechenden Bilder dazu.



Bild 01



Bild 02



Bild 03



Bild 04



Bild 05



Bild 06



Bild 07



Bild 08



Bild 09



Bild 10



Bild 11



Bild 12



Bild 13

Abbildung 15: Fotoaufnahmen (Bild 1-13) der Feuchtstellen an den Schwindrissen.

Die parallel durchgeführten Messungen über mehrere Wochen mit Feuchtesensoren, die in die Wand einbetoniert sind, zeigen, dass bei Regenereignissen die Feuchte häufig recht tief eindringt. Der Bauherr plant demnächst eine Hydrophobierung der Außenseite der Fassade mit STOSilco HC. Inwieweit diese Maßnahme den gewünschten Effekt hat, wird sich durch die Messsonden in der Wand bewerten lassen.

Versuche, größere Risse zu verpressen, wurden bei einem anderen Projekt mit demselben Infralichtbeton durchgeführt und waren erfolgreich. Es besteht also auch die Option, die Risse weiter abzudichten. Vorerst wird aber erst einmal die Hydrophobierung getestet.



Abbildung 16: Einbau der Wohnungstüren.

Die Fenster sind auch bereits eingesetzt. Ungewohnt, aber wenn jetzt noch der Bodenbelag verlegt ist, wäre der Ausbau hier schon abgeschlossen.



*Abbildung 17: Ein Blick in eine der fertig angelieferten Badzellen.*

Statt Fliesen an der Wand wurde das Produkt Fibo verwendet. Dabei handelt es sich um eine Schichtholzplatte mit einer raumseitigen Kunststoffschicht. Als Dekor wurde hier etwas selbstironisch „Cracked Cement“ gewählt.



*Abbildung 18: Die Heizkörper sind dicht am Vertikalstrang der Technik platziert und hochformatig, um viel Wandfläche für Möbel zu belassen.*



Abbildung 19: Lieferung des Wandteile für das Erdgeschoss des Holzhauses.

Im Vordergrund ist wieder die Bodenplatte zu erkennen. Die Abdichtung gegen Feuchte wurde bereits den Außen- und Innenwandstellungen folgend aufgebracht.



Abbildung 20: Schnittansicht der Außenwand des Holzhauses.

Die Einschnitte in den senkrechten Holzständer im Kern der Dreischichtplatte erhöhen die Dämmwirkung. Mit der 30 cm starken Wand wird ein U-Wert von  $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht. Die senkrechte Mittellage und die horizontalen Decklagen sind jeweils nur im Übergang zur nächsten Lage verleimt. Innerhalb der Lager erfolgt keine Verleimung.



*Abbildung 21: Hier wird die Außenwand des Erdgeschosses, welche aufgrund der Höhe einen horizontalen Stoß hat, zu einem Stück montiert.*

Unten wird noch ein Streifen Furnierschichtholz da verschraubt, wo die Wand später unten in die Dämmebene auf der Bodenplatte eintaucht. Durch diese Maßnahme ist die Wand geschützt vor Tauwasserschäden. Oben auf der Wand ist die Ausfräsung für die Innenwände zu erkennen.



*Abbildung 22: Ein 12 mm dicker Stabdübel wird oben in den Kopf der Wand gesteckt, um eine statische Verbindung zur Stahlbetondecke zu erreichen.*



Abbildung 23: Die Außenwände stehen.

Oben auf den Wandkronen der Außenwände sind wieder die Stabdübel zu erkennen, die sich später mit der Stahlbetondecke verzahnen werden. Nach außen hin ist eine Dichtband zu sehen, das die Fuge zum nächsten Bauteil füllt.

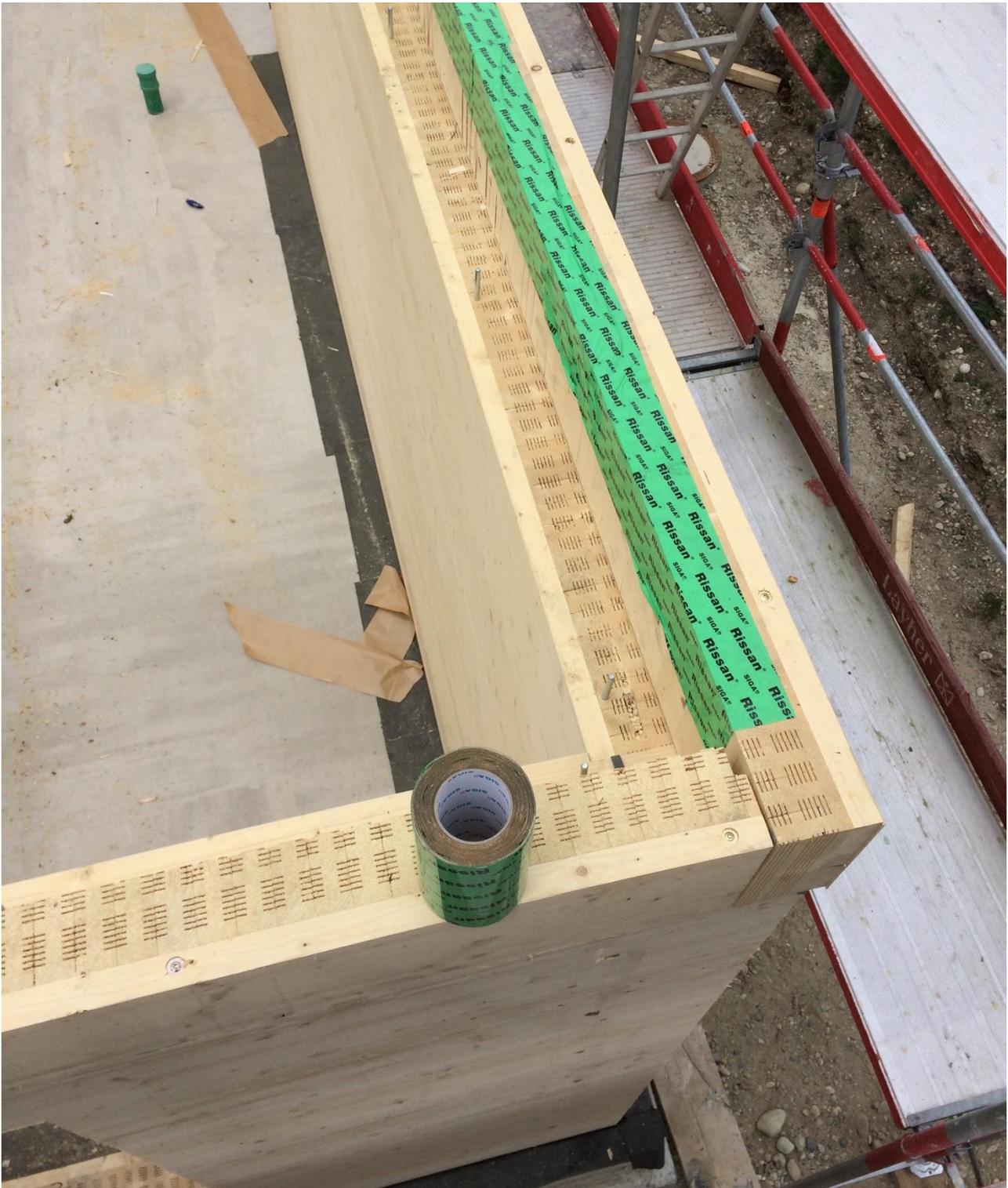


Abbildung 24: Hier ist die Aufkantung an der Außenecke zu sehen, die gleichzeitig die Randschalung für die Stahlbetondecke bilden wird.

Die Zimmerer haben hier bereits angefangen die Teile abzukleben, die mit Beton in Berührung kommen würden.



Abbildung 25: Das Ergebnis nach einem Tag Arbeit.

In den folgenden Tagen wird die Decke über dem Erdgeschoss betoniert. Halbfertigteile werden als verlorene Schalung aufgelegt und dann mit Beton verfüllt.



*Abbildung 26: Eine Woche später: Die Decke über dem Erdgeschoss wird betoniert.*

Die Aussparungen für drei Badzellen mit den Durchbrüchen für die Leitungen sind in der Mitte des Bildes zu erkennen. Abweichend vom Betonhaus sind die Badzellen in die Decke eingelassen, um einen stufenlosen Übergang von der Wohnung zum Bad zu erreichen. Im Betongebäude führt der Weg in Bad dagegen über eine kleine Stufe, außer natürlich im barrierefreien Erdgeschoss.



*Abbildung 27: Durch den Druck des Betons und vermutlich auch die Flügelglättung hat sich die Wandkrone des Erdgeschosses nach Außen bewegt.*

Unten die Wandkrone, oben die Außenwand des ersten Obergeschosses. Die Differenz wird durch die Unterkonstruktion der Holzverschalung ausgeglichen werden müssen.



*Abbildung 28: Zwischenpodest und Treppenläufe wurden vorgefertigt und durch den Rohbauer mit dem Kran eingehoben.*



Abbildung 29: Blick in das Erdgeschoss.



Abbildung 30: Ergebnis nach Tag 2.

Die Fugenbild der Unterseiten der Halbfertigteildecken zeichnet sich an der Decke ab. Leider sind teilweise Wasserflecken an den Wänden entstanden.



Abbildung 31: ca. 2 Wochen später.

Die Decke über dem ersten Obergeschoss ist inzwischen betoniert. Die Wandlieferung für das zweite Obergeschoss ist angekommen.



Abbildung 32: Blick ins Treppenhaus.

Rechts zu sehen: Die Ausgleichsfuge zwischen Decke und tragender Wand ist inzwischen mit Quellmörtel verfüllt.



*Abbildung 33: Die fertigen Badzellen sind in den entsprechenden Vertiefungen auf der Geschossdecke abgestellt und an den vertikalen Durchbrüchen positioniert.*



Abbildung 34: Die Holzprofile, auf denen die Außenwände lagern, werden in Lage und Höhe ausgerichtet und in der Betondecke verschraubt.

Leider konnten die in die Profile vorgebohrten Löcher teilweise nicht verwendet werden, da die Bewehrungseisen der Decke dies verhinderten.

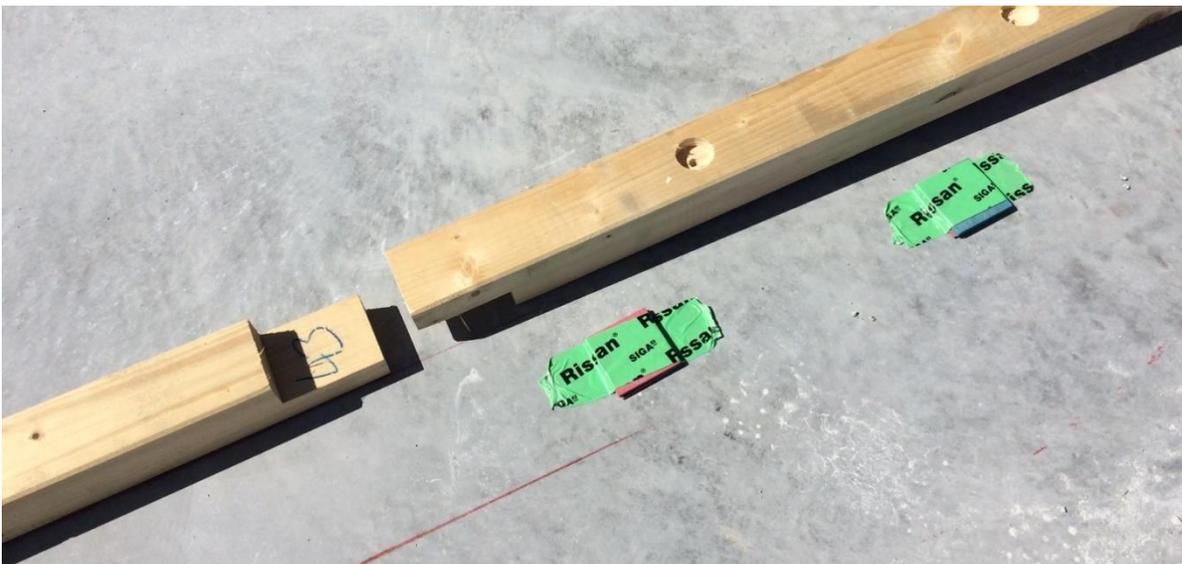
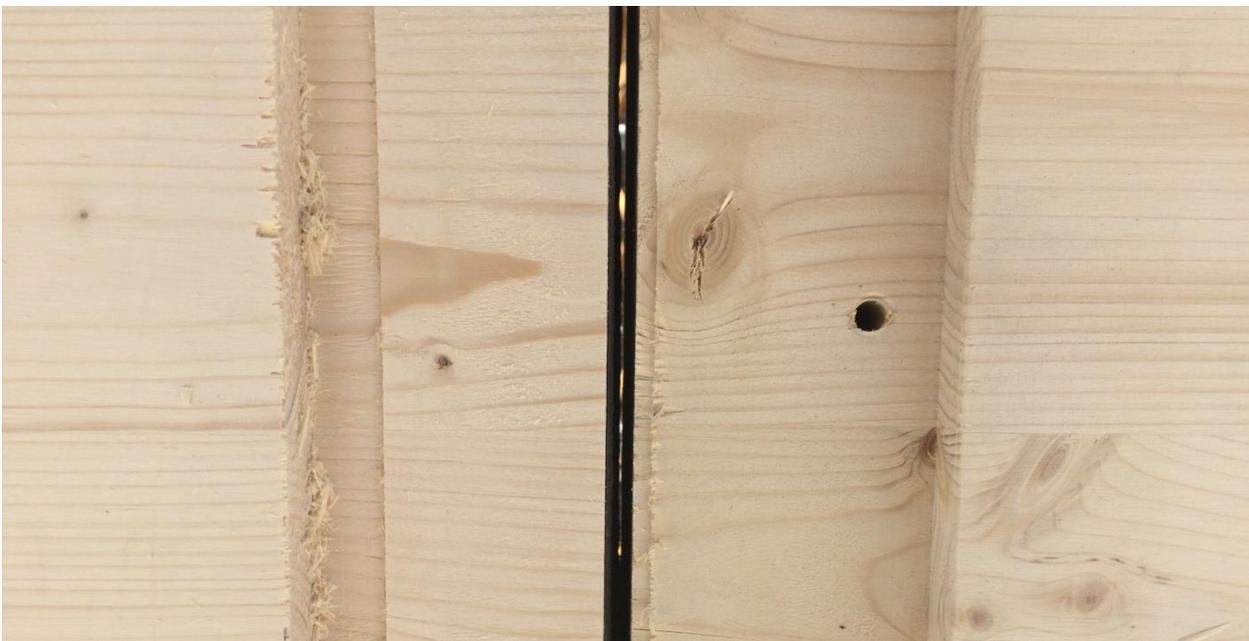


Abbildung 35: Hier liegen die Holzprofile für die Innenwände.



*Abbildung 36: Hier ist eine Außenwand montiert. Links ist das Holzprofil für die Innenwand sichtbar.*



*Abbildung 37: An den Wohnungstrennwänden sind die Außenwände auf Fuge gesetzt, um Schallübertragung über die Außenwand von einer Wohnung zur nächsten zu reduzieren.*



*Abbildung 38: Auch von Geschoss zu Geschoss wird an den Außenwänden eine Fuge ausgebildet.*

Da hier auch noch die Rohbautoleranzen ausgeglichen werden müssen, fällt diese Fuge etwas größer aus und wird deshalb mit Holzwohle verstopft.



*Abbildung 39: Hier ein Blick an der Außenwand herunter. Die Schrauben, die das Wandelement mit dem Holzprofil verbinden, werden geradegesetzt.*

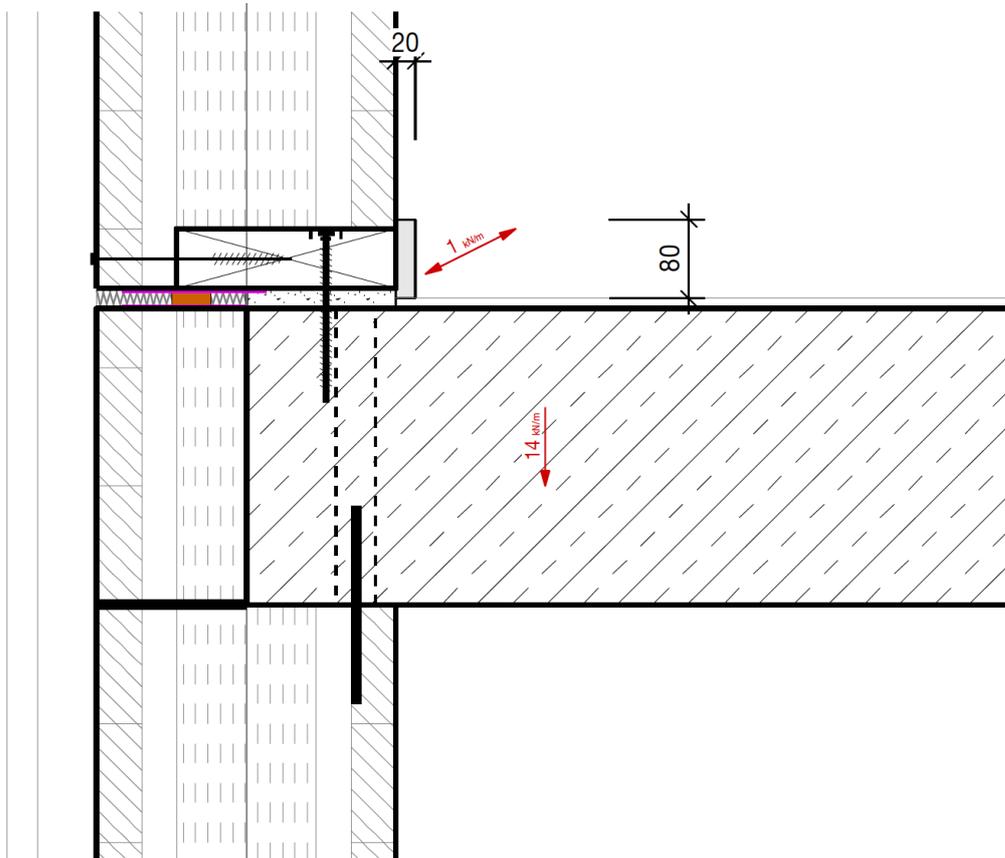


Abbildung 40: Das Anschlussdetail von Geschossdecke zur Außenwand



Abbildung 41: Das entsprechende Detail vor Ort in der Umsetzung.



Abbildung 42: Badzelle ohne Folien.

Lüftung (silber) und Abwasser (schwarz) sind bereits an den Zellen vormontiert mitgeliefert worden. Die Elektroinstallation hat begonnen.



*Abbildung 43: Die Wohnungstrennwände werden mit einer zusätzlichen Schicht aus Leichtbauplatten verkleidet, um die notwendigen Schallschutzwerte zu erreichen.*

Zum Treppenhaus hin übernehmen die Platten auch noch eine Brandschutzfunktion.



Abbildung 44: Der Dachstuhl ist aufgerichtet.



Abbildung 45: Das Dach wird eingedichtet.

Die Abluftleitungen und Fallstrangentlüftungen enden im darunterliegenden durchlüfteten Dachraum oberhalb der Dämmebene. Dadurch werden die Durchdringungen der Dachabdichtung vermieden. Das bedeutet weniger zukünftige Schadstellen und auch die Möglichkeit, das Dach z. B. mit Photovoltaik zu belegen.



Abbildung 46: Die Unterkonstruktion der Holzverschalung wird verbaut.



*Abbildung 47: Da die Holzoberflächen durch Regen und Betoniervorgang doch hier und da gelitten haben, wurde dort Trockenbauschleifgerät nachgeschliffen.*



*Abbildung 48: Eine der Lüftungsöffnungen der Speisekammern.*

Die äußere Holzverschalung ist hier einfach darübergezogen und nachträglich perforiert.



Abbildung 49: Der Bodenleger arbeitet.

Der letzte Ausbauschnitt ist damit demnächst abgeschlossen.



Abbildung 50: Außenansicht von Südosten.

Die sägerauhen Bretter aus Tanne sind mit vorvergrauender Lasur vorbehandelt und mit einem Abstand vom 5 mm geschraubt. Am Eck hat jeweils das Brett auf der stärker bewitterten Fassadenseite „Vorfahrt“.



Abbildung 51: Parallel zum Holzbau begonnen die Arbeiten am Mauerwerkshaus.

Hier wird gerade die Abdichtung unter der Außenwand und an der Aufkantung hoch verlegt.



Abbildung 52: Der Kimmstein wird gesetzt.

Dieser muss, als erster Stein, besonders exakt positioniert werden. Gleichzeitig übernimmt dieser Stein auch eine Dämmfunktion in vertikaler Richtung, da die Wand in die Dämmung einbindet, die auf der Bodenplatte verlegt wird. Dies wird hier dadurch erreicht, dass die Kammern des Ziegels mit EPS gefüllt sind, leider.



*Abbildung 53: Die Luftkammerziegel werden ohne vertikale Mörtelfuge gesetzt.*



Abbildung 54: Die Luftkammern werden in jeder Steinlage mit einer Mörtelschicht verschlossen, um eine Zirkulation über die Steinlagen hinweg zu vermeiden.



Abbildung 55: Dafür wird ein spezieller Mörtelschlitten verwendet.



Abbildung 56: Betonage der Decke.

Auch hier mit Aussparungen für die Badfertigezellen im Boden. Die Decke ist so, wie auch schon im Holzhaus mit Halbfertigteilen geschalt und konventionell bewehrt.



Abbildung 57: Der Sturz über den Fenstern wurde aus dem gleichen Stein wie die Außenwand als Segmentboden hergestellt.

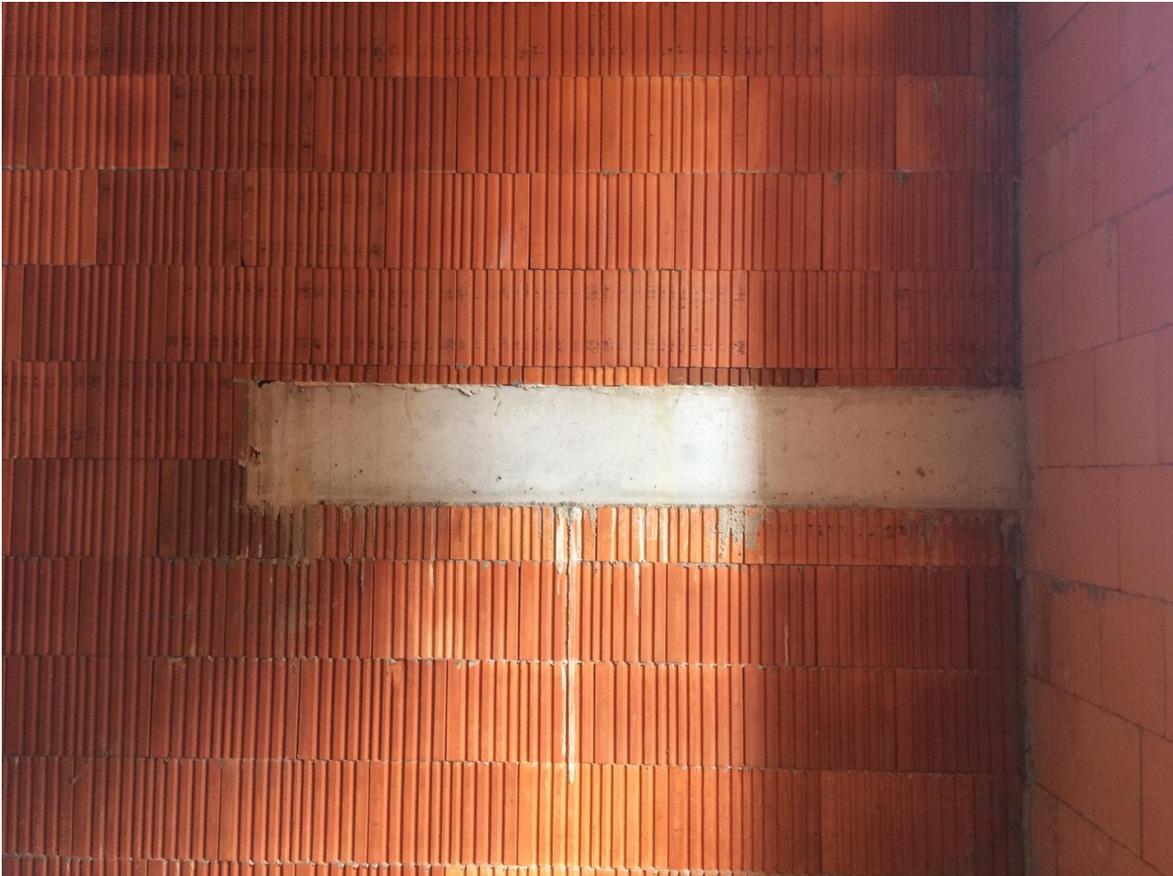


Abbildung 58: Hier noch einmal von außen.

Durch diese einfache, handwerkmäßige Überbrückung der Wandöffnungen muss kein Sonderstein mit Stahlbetonkern noch Dämmeinlage verbaut werden. Wand und Segmentbogen werden aus dem gleichen Stein hergestellt. Dadurch kann auch der Außenputz ohne Rissbewehrung darüber führen, da die üblich „Sollrissstelle“ hier nicht vorhanden ist.



Abbildung 59: Hier ein Blick ins Gebäude, links die bekannte Badfertigzelle.



*Abbildung 60: Auflager des Treppenpodests auf der tragenden Innenwand*



*Abbildung 61: Die Kalkschlämme auf der Innenwand wird getestet.*



*Abbildung 62: Der Anschlag für die Fenster ist hergestellt.*



*Abbildung 63: Die Elektroinstallation wird verlegt.*

Diese wird später durch die Sockelleiste verdeckt. Jetzt noch Bodenbelag und Sockelleiste und der Ausbau ist abgeschlossen.



Abbildung 64: Im Mauerwerkshaus befindet sich auch der einzige Technikraum des Projekts.

Im Hintergrund ist der Vor- und Rücklauf der Nahwärme zu sehen, im Vordergrund der Pufferspeicher.



Abbildung 65: Hier erfolgt die Verteilung der Wärme für Heizen und Warmwasser in die drei Häuser.

Die Verteilung erfolgt in der Schotterschicht unter den Bodenplatten.



Abbildung 66: Frischwasseraufbereitung.



Abbildung 67: Verteilung des Frischwassers in die drei Gebäude.



Abbildung 68: Das Mauerwerkshaus von Südosten gesehen.



Abbildung 69: Alle drei Häuser in einer Reihe.

## 3 Gebäudehülle

MS 2 | Bearbeitung: Fabian Diewald, Zsofia Varga, Nina Flexeder

Bei allen drei Forschungsgebäuden wurden erste bauphysikalische Messungen hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit und Feuchte durchgeführt. Dazu wurden die Nord- und Westaußenwände des 2. Obergeschosses untersucht. (siehe Abb.71, 72, 74 und 75)

### 3.1 Wärmestrommessungen

Um eine Aussage über die U-Werte der Außenwände der Forschungshäuser treffen zu können, wurden in allen drei Forschungsgebäuden im 2. Stockwerk jeweils an der West- und Nordseite der Gebäude als Vorbereitung für das 2-jährige Monitoring, bereits testweise Wärmestrommessungen durchgeführt. Für diese in-situ Messungen wurden Wärmestrommessplatten jeweils innenseitig angebracht (siehe Abb. 71 und 72). Es ist an dieser Stelle elementar, dass es sich bei allen drei Testgebäuden um vergleichsweise schwere Außenwandkonstruktionen mit einer hohen thermischen Wärmespeicherkapazität handelt. Die gemäß ISO 9869-1:2014-08 definierten Konvergenzkriterien zur Sicherstellung statistisch relevanter Messergebnisse werden unter derartigen Bedingungen in der Regel erst nach einer mehrmonatiger Messperiode mit einem signifikanten Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenklima erreicht (Flexeder et al. 2020/2021)(Desogus et al. 2011).

Das im Jahr 2021 startende Monitoring der dann teils bereits bezogenen Gebäude setzt eine störungsfreie Messdatengenerierung und –übertragung voraus. In allen drei Gebäuden wurden deshalb Vorversuche und Testmessungen durchgeführt, welche die teilweise noch großen Lücken in der Programmierung der Datenspeicherung aufzeigten.

Im Folgenden wird deswegen lediglich exemplarisch auf die Messung im Leichtbetongebäude näher eingegangen.

## Leichtbetongebäude

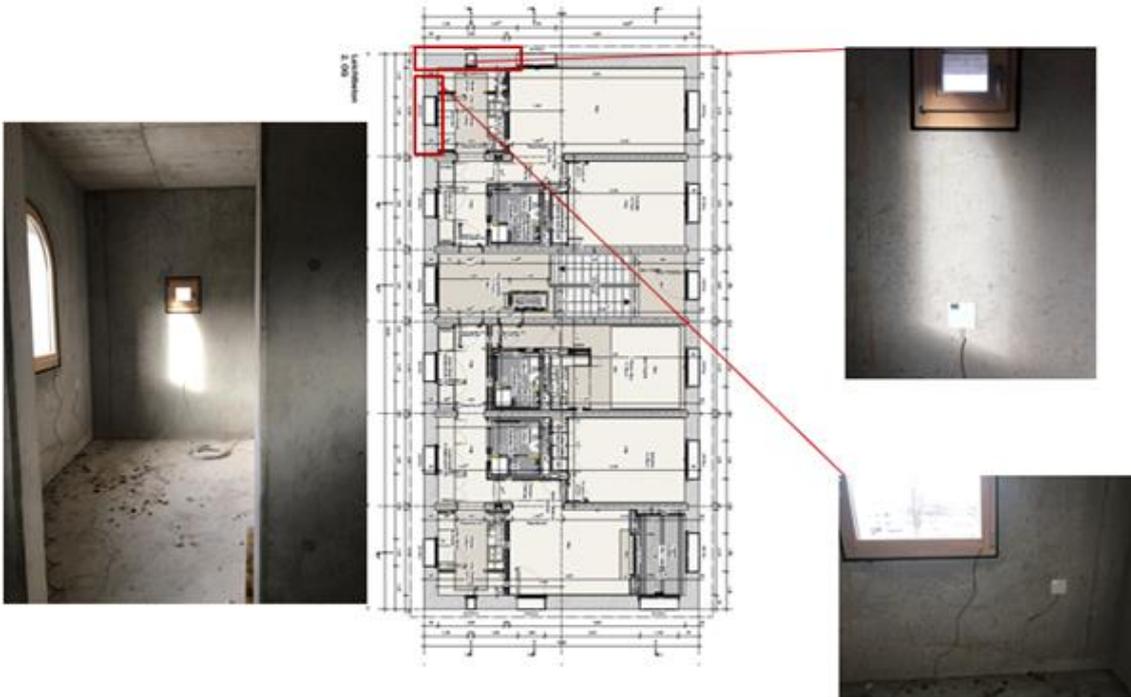


Abbildung 70: Positionierung Wärmestrommessplatten Leichtbetongebäude, 2. Obergeschoss I

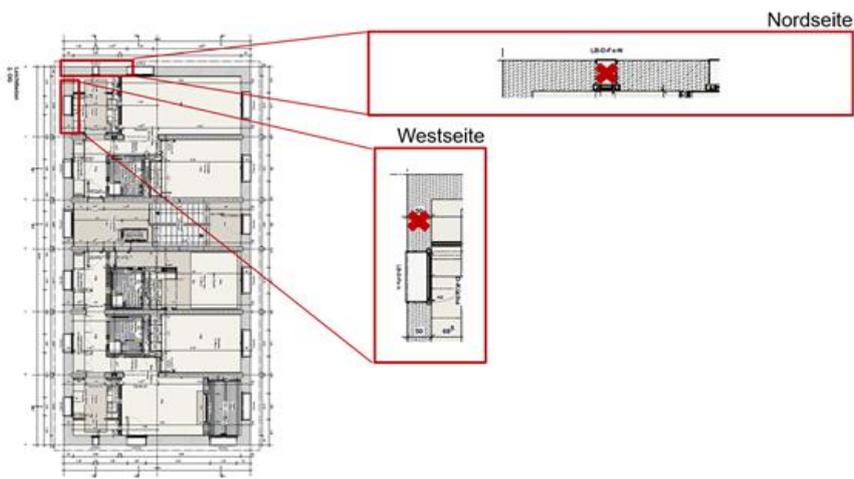


Abbildung 71: Positionierung Wärmestrommessplatten Leichtbetongebäude, 2. Obergeschoss II

Die Messungen im Leichtbetongebäude wurden im Zeitraum von 11.02.20-19.02.20 nach ISO 9869-1:2014 (ISO 9869-1:2014) durchgeführt, aufgrund von Stromausfall wurden nur Daten

über 42 Stunden aufgezeichnet. Dieser Zeitabschnitt reichte nicht aus, um die Bedingungen zur statistischen Relevanz gemäß ISO 9869-1:2014, „Average Methode“ einzuhalten:

- 1) Messdauer  $D_T$  von mindestens 72 Stunden
- 2) der R-Wert  $R_{DT}$  der letzten Messung soll, verglichen mit dem 24 Stunden zuvor durchgeführten Messung  $R_{DT-24h}$ , nicht mehr als um 5% abweichen
- 3) die Differenz zwischen den R-Werten der ersten Messperiode  $INT(2xD_T/3)$ -Tage soll max. um 5% von der gleich dauernden letzten Messperiode abweichen. Dabei sind  $D_T$  die Dauer der Testperiode; INT (ganzzahliger Anteil)
- 4) die im Wandbauteil gespeicherte Wärme soll maximal einen Bruchteil von 5 % der durch das Wandbauteil transmittierten Wärme im Testzeitraum betragen. (ISO 9869-1:2014-08)

Der thermische Widerstand  $R \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$  einer Außenwand lässt sich dabei durch Formel 1 aus der innenseitig gemessenen Wärmestromdichte  $q \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  sowie der an der direkten Innen- und Außenoberfläche gemessenen Temperaturwerten ermitteln. Im Vergleich dazu werden für die tatsächliche Messung des U-Wertes  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$  gemäß Formel 2 die Oberflächenübergangswiderstände in der Art berücksichtigt, als dass die Temperaturdifferenz aus Innen- und Außenlufttemperatur gebildet wird.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (1)$$

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (2)$$

R: Wärmedurchlasswiderstand  $\left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$ , q: Wärmestromdichte  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$ , U: Wärmedurchgangskoeffizient  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ,  $T_{si}$ : Innenoberflächentemperatur [K],  $T_{se}$ : Außenoberflächentemperatur [K],  $T_{ij}$ : Innenraumtemperatur [K],  $T_{ej}$ : Außentemperatur [K]

Zur Vermeidung direkter solarer Bestrahlung wurden die Wärmestrommessplatten im Innenraum angebracht. Durch die Montage von Temperatursensoren an der Außenfassade, wurden die Außentemperaturen ermittelt. Das treibende Potential für die innenseitig Wärmestromdicht  $q \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  stellt eine Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Messpunkten dar. Der sich somit durch den Querschnitt des Wandbauteils einstellende Temperaturgradient ist zeitlich stark fluktuierend

und unter anderem von folgenden Faktoren zeitlich abhängig: Dicke der Bauteilschichten  $d$  [m], der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien  $\lambda$  [ $\frac{W}{mK}$ ], spezifische Wärmekapazität der einzelnen Bauteilschichten  $c$  [ $\frac{J}{kgK}$ ], Feuchtegehalt des Bauteils  $u$  [%] oder [ $\frac{kg}{m^3}$ ] (respektive des instationären Feuchtestroms) (Niemz und Sonderegger 2011; Liu et al. 2017)(Liu et al. 2017)(Norm DIN EN ISO 10456:2007 + AC:2009).

Die in Abbildung 73 gezeigte vorläufigen Verrechnung der Messwerte zeigte noch kein eindeutiges Ergebnis. Die vielfache Überschreitung der definierten Konvergenzkriterien in dieser kurzen Messperiode zeigte die Notwendigkeit von längeren Messperioden. Der Wärmestrom wird somit weiterhin über eine längere Messdauer durchgeführt werden, um alle Kriterien mit stabil konvergierenden U-Werten zu erhalten und somit auch alle Vorgaben der „Average Method“ gemäß ISO 9869-1:2014 (ISO 9869-1:2014-08) einzuhalten.

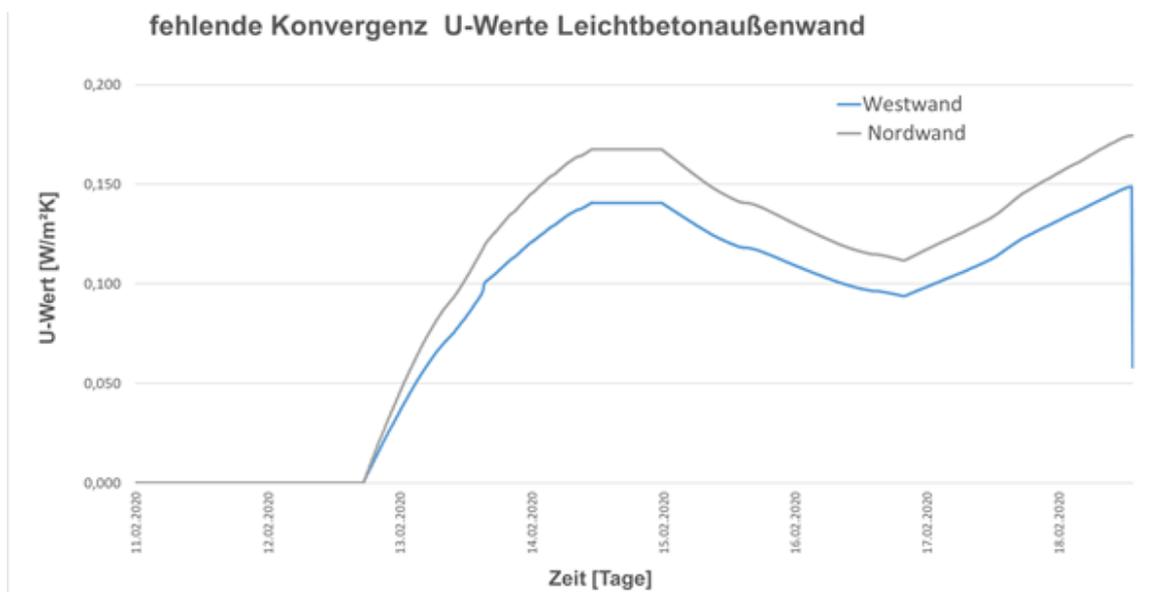


Abbildung 72: Beispiel für die fehlende Konvergenz der Messwerte bei der Berechnung des U-Wertes der Leichtbetonwandaußen. Das Ende der Messperiode ist hier willkürlich gewählt, ohne Erreichen einer statistischen Stabilität.



Abbildung 73: Aufbau Wärmestrommessung Mauerwerksgebäude, 2. Obergeschoss



Abbildung 74: Aufbau Wärmestrommessung Massivholzgebäude, 2. Obergeschoss

## 3.2 Feuchtemessungen

Um eine Aussage über die Feuchte im Einbauzustand der Außenwände des Massivholzgebäudes treffen zu können, wurden im 2. Stockwerk jeweils an der West- und Nordseite des Gebäudes Feuchtemessungen durchgeführt.

### Massivholzgebäude

Die Holzfeuchtemessung wurde mittels eines elektrischen Holzfeuchtemessgerätes nach DIN 13183-2 an vier Messstellen der West- und Nordaußenwand des Massivholzgebäudes durchgeführt. (Norm DIN EN 13183-2:2002) (siehe Abbildung 76 und 77) Die Holzfeuchte, mit Einschlagelektroden knapp unter der Oberfläche gemessen, lag dabei im Bereich von 10,1-11,1%, erfüllte so die Herstellerangaben und die Anforderungen der DIN 68800-1 (Norm DIN 68800-1) und stellt keine Gefahr für die Schimmelpilzbildung dar.

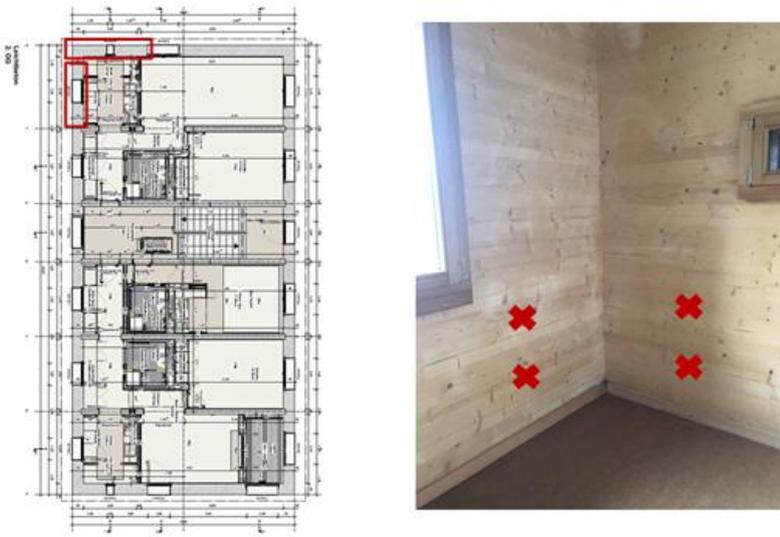


Abbildung 75: Positionierung Holzfeuchtemesspunkte Massivholzgebäude



Abbildung 76: Einstichstelle Holzfeuchtemessung

## Schlussfolgerung

Die Wärmestrommessungen erfüllten die normativen Randbedingungen nicht, deshalb werden die Wärmestrommessungen als Langzeitmessungen im Rahmen des Forschungsprojektes Einfach Bauen 3 weiter durchgeführt und ausgewertet. Ebenso wird, um eine Aussage über die Dauerhaftigkeit der Außenwandbauteile treffen zu können, eine Langzeitmessung der Feuchtegehalte im Bauteil über eine Winter- und Sommerperiode erfolgen.

## 3.3 Bauteilmessung Infraleichtbeton

Das Bauteilmonitoring überwacht die Herstellung und das Langzeitverhalten ausgewählter Bauteile zur Gewährleistung ihrer Gebrauchstauglichkeit. Ziel ist die Qualitätssicherung und Schadensvermeidung an der Baukonstruktion. Oftmals werden innovative Bauprodukte, Bauweisen oder neue Konzepte, die in dieser Form noch nicht umgesetzt wurden, überwacht und dokumentiert bzw. spezifische Fragestellungen aus der Forschung überprüft. Ziel der Messungen ist die Validierung von Gebrauchstauglichkeit des Infraleichtbetonhauses. Dazu gehören die Verifizierung der einschlägigen Materialkennwerte verwendeten Betons sowie eine quasi-kontinuierliche Überwachung der Betonfeuchte der monolithischen Außenwände. Zudem sollten Auffälligkeiten unter baupraktischen Rahmenbedingungen beobachtet werden.

### Dichte, Festigkeiten, Wärmeleitfähigkeit und -kapazität

Insbesondere die Dichte, die Festigkeiten in Bezug auf Druck und Spaltzug sowie die Wärmeleitfähigkeit sind zentrale Parameter für das Design von Gebäuden aus Infraleichtbeton. Zur Validierung der Materialkennwerte des Infraleichtbetons früherer Untersuchungen [Breit et al. 2014, Callsen et al. 2017, Knippers et al. 2014, Schlaich et al. 2017, Schwenk et al. 2014] wurden Materialprüfungen an Probekörpern im Labormaßstab durchgeführt. In Abbildung 78 ist die Infraleichtbetonmatrix der untersuchten Proben jeweils in den Zuständen Frisch- und Festbeton als gesägte Oberfläche abgebildet.



Abbildung 77: Infraleichtbeton in den Zuständen Frischbeton (links) und Festbeton, gesägte Oberfläche (rechts)

Die Rohdichte des Infraleichtbetons wurde bei verschiedener Probenkonditionierung an jeweils drei Probekörpern ermittelt. Der Mittelwert der Dichte mit einfacher Standardabweichung bei 20°C

und 65 % relativer Luftfeuchte, im wassergesättigten sowie im darrtrockenen Zustand nach dreitägiger Probentrocknung bei 105 °C ist in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Mittelwerte dreier Messungen an Proben mit unterschiedlichen Lagerungsbedingungen mit Standardabweichung in Klammern der Rohdichte von Infraleichtbeton in verschiedenen Zuständen

<b>Festbetonrohichte 20 °C/65 % rH [kg/m³]</b>	<b>Festbetonrohichte gesättigt [kg/m³]</b>	<b>Festbetonrohichte darrtrocken [kg/m³]</b>
777 (2)	900 (2)	738 (2)

Die Druckfestigkeit wurde an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge bestimmt. Das Elastizitätsmodul sowie die Spaltzugfestigkeit wurden im Anschluss an Zylindern mit 100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe bestimmt. Die Ergebnisse der Prüfungen als Mittelwert dreier Proben mit Standardabweichung in Klammern für die Probenalter 28 sowie 56 Tage nach Herstellung sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Proben waren bis zur Prüfung unter Wasser gelagert.

Tabelle 3: Mittelwerte dreier Messungen mit Standardabweichung in Klammern von Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Elastizitätsmodul von Würfeln aus Infraleichtbeton mit 150 mm Kantenlänge und Zylindern mit 100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe jeweils nach 28 und 56 Tagen

<b>Probenalter [d]</b>	<b>Druckfestigkeit [MPa]</b>	<b>Spaltzugfestigkeit [MPa]</b>	<b>Elastizitätsmodul [GPa]</b>
28	7,7 (0,2)	1,1 (0,0)	5,0 (0,5)
56	9,9 (1,1)	1,2 (0,0)	5,6 (1,2)

Die Wärmeleitfähigkeit sowie die spezifische volumetrische Wärmekapazität wurden mit der Transient Plane Source-Technik an drei Kombinationen von Grenzflächen AB, AC und BC bestimmt (Abbildung 79). Da die Sensorgröße im Bereich weniger Zentimeter liegt, ergeben sich aufgrund des heterogenen Gefüges je nach Kontaktierung entweder mit dem Zementstein, Zuschlägen niedrigere oder an beispielsweise gesättigten Luftporen höhere Wärmeleitfähigkeiten bzw. spez. Wärmekapazitäten.

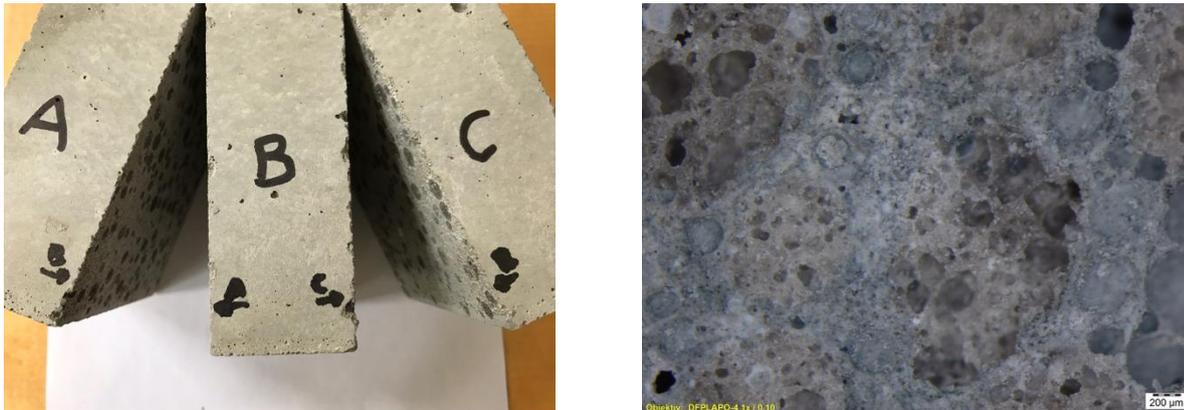


Abbildung 78: Gesägte Proben zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität (volumetrisch) und der Dichte (links). Infraleichtbetongefüge unter dem Lichtmikroskop (rechts)

Die Ergebnisse der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten und der spezifischen Wärmekapazität (volumetrisch) sind in Tabelle 4 bis Tabelle 6 zusammen mit der einfachen Standardabweichung angegeben.

Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von gesättigtem Infraleichtbeton als Mittelwert von Messungen an drei Flächen mit einfacher Standardabweichung

Messwert, gesättigte Proben	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Spez. Wärmekapazität [MJ/m <sup>3</sup> K]
Grenzfläche AB	0,240	2,505
Grenzfläche AC	0,369	1,186
Grenzfläche BC	0,333	0,947
<b>Mittelwert (σ)</b>	<b>0,314 (0,066)</b>	<b>1,546 (0,839)</b>

Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von bei 20 °C und 65 % rH konditioniertem Infraleichtbeton als Mittelwert von Messungen an drei Flächen mit einfacher Standardabweichung

Messwert, 20 °C / 65 % rH	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Spez. Wärmekapazität [MJ/m <sup>3</sup> K]
Grenzfläche AB	0,245	0,753
Grenzfläche AC	0,232	0,754
Grenzfläche BC	0,240	0,770
<b>Mittelwert (σ)</b>	<b>0,239 (0,007)</b>	<b>0,758 (0,008)</b>

Tabelle 6: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von darrtrockenem Infraleichtbeton als Mittelwert von Messungen an drei Flächen mit einfacher Standardabweichung

Messwert, darrtrockene Proben	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Spez. Wärmekapazität [MJ/m <sup>3</sup> K]
Grenzfläche AB	0,177	0,581
Grenzfläche AC	0,177	0,604
Grenzfläche BC	0,158	0,570
<b>Mittelwert (σ)</b>	<b>0,171 (0,011)</b>	<b>0,585 (0,017)</b>

Alle in diesem Kapitel ermittelten mechanischen und thermischen Materialkennwerte liegen in Bereichen, die vergleichbar zu früheren Untersuchungen [Breit et al. 2014, Knippers et al. 2014, Schlaich et al. 2017] sind. Die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit sowie der spez. Wärmekapazität ist maßgeblich abhängig vom Sättigungszustand. Bei hoher Sättigung steigen einerseits die Wärmeleitfähigkeit sowie die spez. Wärmekapazität mind. um den Faktor 2 an, andererseits vervielfacht sich die Streuung der Werte, anhand der Standardabweichung gemessen, teilweise um den Faktor 100 aufgrund von unterschiedlichen Ankopplungsbedingungen und einem kleinen Verhältnis von Sensorfläche zu Zuschlags-, bzw. Porengröße.

### **Feuchte in der Außenwand**

Neben der Ermittlung der Materialkennwerte im Labor wurde ein Messsystem zur Ermittlung der Feuchte am Infralichtbetonhaus in Betrieb genommen. Das Messsystem besteht aus Multiringelektroden (MRE), die mit einer Multiringensensorelektronik (MRSE) angesteuert werden. Die elektrolytische Widerstandsbestimmung zwischen den einzelnen Ringen der MREs erfolgt mittels des MRSE. Die Bedienung sowie das Auslesen der Daten ist über einen Schnittstellenwandler realisiert. An zwei Messpositionen wurden in der Nord- und in der Westwand jeweils drei Multiringelektroden in verschiedenen Tiefenlagen an der Wandaußenseite, in Wandmitte und an der Wandinnenseite eingebaut (Abbildung 81). Abbildung 80 zeigt die beiden Messstellen im 2. Obergeschoss, die Kabelführung in der Mitte der Wandhöhe bei 1,55 m sowie die Position des Datenloggers.

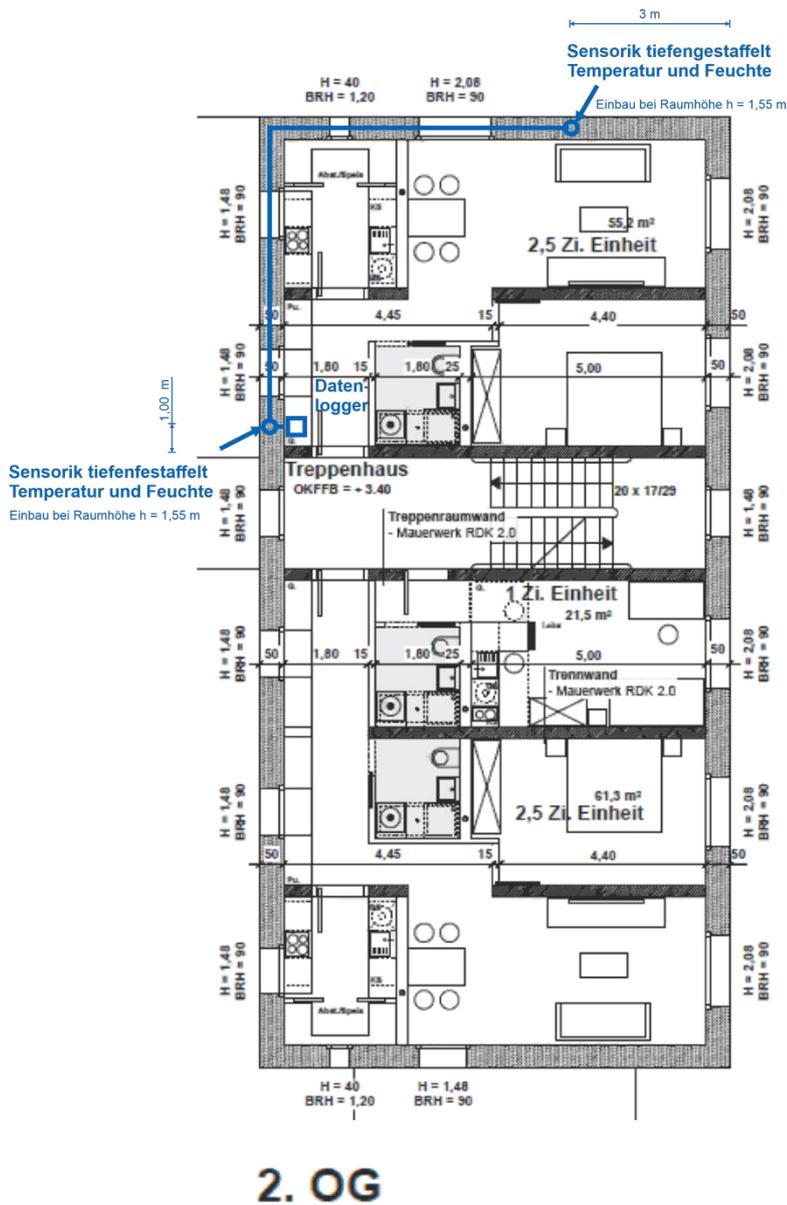


Abbildung 79 Messpositionen der Multiringelektroden (MRE) jeweils an drei Stellen der West- und Nordseite sowie Position des Datenloggers an der Innenwand der Westseite.

Jede der MREs besteht aus neun Ringen aus nicht-rostendem Stahl, zwischen denen der elektrolytische Widerstand über die Ankoppelung an die Betonmatrix ermittelt werden kann. Bei jeder MRE können somit acht Messwerte erfasst werden. Als Intervallbreite zwischen zwei Abtastungen für die Widerstandsbestimmung wurde ein Fenster von 30 Minuten gewählt. Die MRE zusammen mit dem Schnittstellenwandler sind in einer Schutzbox an der Innenwand gelagert.



Abbildung 80 Einbaupositionen der MRE an je drei Positionen jeweils an West- und Nordwand vor der Betonage (links). Multiring-Sensorelektronik zum Loggen der Daten (rechts).

Die Feuchteverläufe bis Ende April 2020 sind in Abbildung 82 und Abbildung 83 als Mittelwerte aller Messungen der acht Widerstände der einzelnen MRE dargestellt. Trotz einer größeren Schwankungsbreite der außenliegenden MREs stellen sich zum Ende der Messung hin Feuchten im Bereich von etwa 25 M.-% ein. Dabei wurden für alle Feuchteangaben in M.-% Regressionsparameter sowie eine Näherungsformel früherer Untersuchungen an Infrarleichtbeton verwendet [Breit et al. 2014], die jedoch nicht für diesen speziellen Beton ermittelt wurden. Daher handelt es sich bei den Feuchteangaben, im absoluten Sinn, lediglich um eine Näherung. Die Bestimmung der wahren Regressionsparameter erfolgt in der Regel an Proben im Labor, indem die elektrolytischen Widerstände für bekannte Feuchten bestimmt werden. Durch die gegebene Proportionalität zwischen elektrolytischem Widerstand und Feuchte eignet sich die Darstellung unabhängig von den absoluten Messwerten zur Bestimmung von Änderungen oder konstanten Feuchtegehalten.

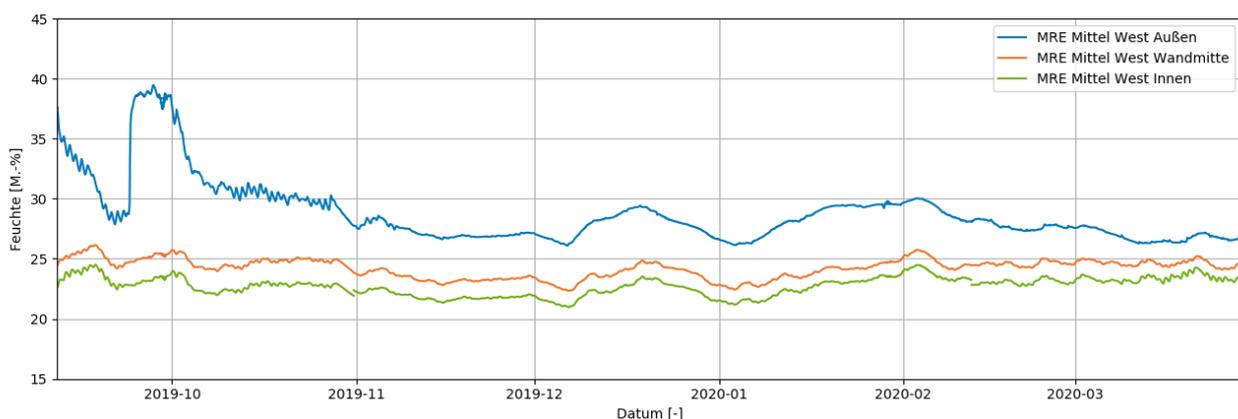


Abbildung 81 Feuchteverläufe an drei verschiedenen Positionen der Westwand als Mittelwert aller Widerstände der jeweiligen Multiringelektrode

Für die Sensorik an der Nordseite wurden Kabellängen von 27 m, an der Westseite von 5 m verwendet. Die Ergebnisse der Nordseite weisen deutlich größere Streuungen in Bezug auf höhere Frequenzen (Messrauschen) auf. Zudem konnte am Innenwandsensor kein Widerstand

ermittelt werden. Auch an der Nordseite wurden Ende April Feuchten im Bereich von 25 M.-% ermittelt.

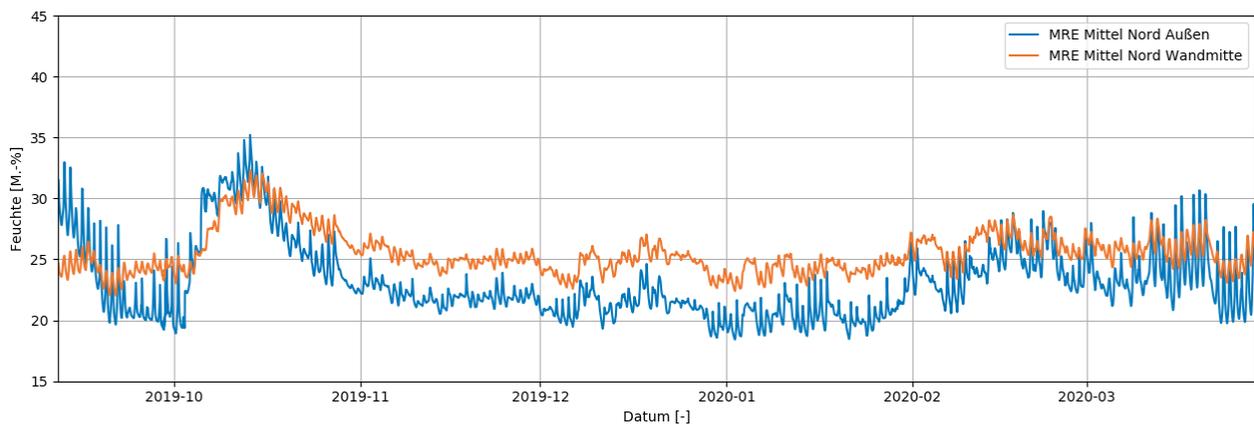


Abbildung 82 Feuchteverläufe an zwei verschiedenen Positionen der Nordwand als Mittelwert aller Widerstände der jeweiligen Multiringelektrode

In Abbildung 84 sind die Einzelwerte der Widerstände exemplarisch für die MRE in der Mitte der Westwand dargestellt. Dabei zeigen sich ähnliche Verläufe der Einzelwiderstände mit Abweichungen deutlich unterhalb von 1 M.-%.

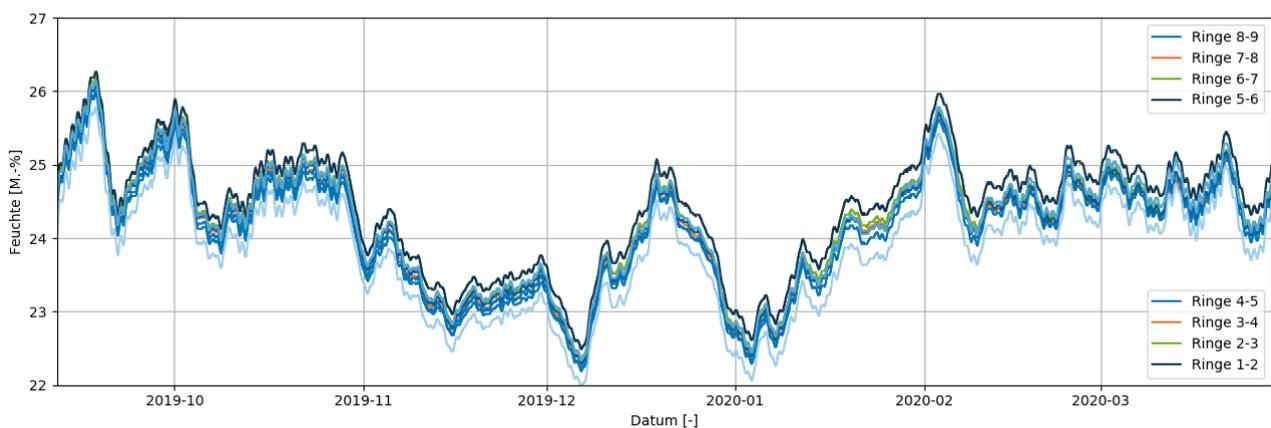


Abbildung 83 Feuchteverläufe, berechnet aus den Einzelwiderständen der Multiringelektrode in der Mitte der Westwand

Die Messung wird fortgeführt, um den Jahreszyklus des Infraleichtbetons abzubilden, auch der Effekt einer möglicherweise noch folgenden Hydrophobierung der Infraleichtbetonoberfläche könnte damit untersucht werden.

## Wärmebildthermografie am Infraleichtbetonhaus

Mithilfe der Wärmebildthermographie sollte die Struktur auf eventuelle Wärmebrücken untersucht werden. Die Messungen wurden am 20.05.2020 um 7:00 Uhr bei einer Außentemperatur von 12 °C ermittelt. Für trockenen Infraleichtbeton wurde ein Emissionsgrad von 0,95 abgeschätzt. Die Oberflächentemperaturen wurden anhand des Koeffizienten ermittelt und farbcodiert in Abbildung 85 abgebildet. Im Rahmen der Untersuchungen an allen Gebäudewänden wurden keine Wärmebrücken an der Struktur gefunden. An den Bögen der Fenster konnte die an der Fassade aufsteigende warme Luft mittels der Wärmebildthermografieaufnahmen nachgewiesen werden. Diese verursachte zum Messzeitpunkt eine Temperaturerhöhung an diesen Stellen von im Mittel etwa 2 °C.

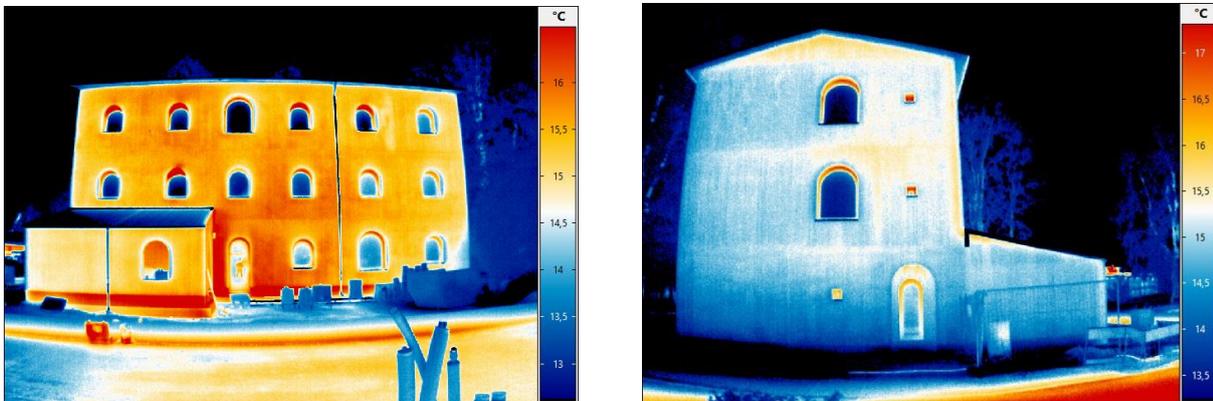


Abbildung 84 Thermographieaufnahmen mit Oberflächentemperaturen von in beiden Fällen etwa 15 °C mit unterschiedlicher Auflösung und Farbcodierung

## Weitere Auffälligkeiten

In diesem Unterkapitel werden Auffälligkeiten am Infraleichtbetonhaus zusammengefasst. Während der Herstellung wurden Verdichtungen mit Innen- bzw. Außenrüttler angewendet, um den Einfluss der Verdichtung auf die Bauteiloberfläche zu untersuchen. In beiden Fällen blieben offene Poren an der Oberfläche des Infraleichtbetons zurück. Abbildung 86 zeigt Wandausschnitte von entsprechend verdichteten Infraleichtbetonwänden.



Abbildung 85 Ausschnitt der Außenwand des ersten Obergeschosses des Infraleichtbetonhauses verdichtet mit Innenrüttler (links) und Außenrüttler (rechts)

Die vergleichsweise niedrigen mechanischen Festigkeiten des Infraleichtbetons, insbesondere die Zugfestigkeit, erleichtern das Auftreten von Fehlstellen und eine damit verbundene Verringerung der Oberflächenqualität. Am Gebäude wurden Fehlstellen verschiedener Art (Abbildung 87) festgestellt, mehrheitlich in Form von Kantenabbrüchen und Abplatzungen. Zudem zeigte sich eine besondere Sensitivität im Hinblick auf die Verarbeitung Frischbeton auf Frischbeton. Durch die Verzögerung eines Mischfahrzeugs innerhalb der Betonierung eines Wandbauteils wurde, durch den zeitlich versetzten Hydratationsbeginn, an dieser Stelle im Festbetonzustand eine Fuge sichtbar.



Abbildung 86: Kantenabbruch im Eckbereich (links), Abplatzungen (Mitte) und Fugenausprägung zwischen Betonchargen (rechts)

## Fazit

Im Rahmen der Herstellung eines Wohnhauses aus Infraleichtbeton konnten mechanische Kennwerte sowie die für die Einhaltung der EnEV entscheidende Wärmeleitfähigkeit aus vorhergehenden Studien [Breit et al. 2014, Callsen et al. 2017, Knippers et al. 2014, Schlaich et al. 2017, Schwenk et al. 2014] unter baupraktischen Bedingungen validiert werden. Weitere

Untersuchungen mittels Infrarotthermographie zeigten die Eignung des Werkstoffs hinsichtlich einer gleichmäßigen Dämmung sowie die Funktion der Gesamtkonstruktion. Die Hydrophobierung der Außenwände kann empfohlen werden, da mit ihr einer möglichen Durchfeuchtung über die gesamte Wanddicke entgegengewirkt werden kann. Mit dem Einbau von Multiringelektroden an der Nord- und Westseite wurde ein Messkonzept zur Dauerüberwachung im Rahmen eines Folgeprojektes entwickelt, mit dem zukünftig ein kompletter Jahreszyklus hinsichtlich der Feuchteeinwirkung auf die Außenwände abgebildet werden soll.

### Literaturverzeichnis Kapitel 3

Norm DIN EN ISO 10456:2007 + AC:2009, 05.2010: Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte.

Breit, W., Schulze, J., Heese, C., Bund, B. (2014): Hochwärmedämmende Sichtbetonaußenbauteile aus Architekturleichtbeton. Forschungsbericht F 2894. Hg. v. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart.

Callsen, B., Thienel, K.: Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte. In: Beton 2017 (04).

Desogus, Giuseppe; Mura, Salvatore; Ricciu, Roberto (2011): Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. In: Energy and Buildings 43 (10), S. 2613–2620. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.025.

Norm DIN EN 13183-2:2002, 07.2002: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren.

Flexeder, Nina; Ott, Stephan; Bodemer, Eva; Winter, Stefan (2020/2021): Monitoring of an office building in uninsulated cross laminated timber construction regarding hygrothermal component behavior. Hg. v. World Conference on Timber Engineering, (noch unveröffentlicht).

Florian Nagler Architekten GmbH (08.06.20a): Drei Forschungshäuser Bad Aibling Ausführungsplanung. Holzmassiv Rohbau. Hg. v. Florian Nagler Architekten GmbH. München.

Florian Nagler Architekten GmbH (08.06.20b): Drei Forschungshäuser Bad Aibling Ausführungsplanung. Leichtbeton Rohbau. Hg. v. Florian Nagler Architekten GmbH. München.

Norm DIN 68800-1, 06.2019: Holzschutz – Teil 1: Allgemeines.

Liu, Fang; Jia, Binguang; Chen, Baoming; Geng, Wenguang (2017): Moisture transfer in building envelope and influence on heat transfer. Hg. v. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017.

Niemz, Peter; Sonderegger, Walter (2011): Untersuchungen zur Wärmeleitung von Vollholz und Werkstoffen auf Vollholzbasis, wesentliche Einflussfaktoren. In: Bauphysik 33 (5), S. 299–305.

ISO 9869-1:2014, 01.08.2014: Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance —.

Knippers, J., Fildhuth, T., Hub, A., Degner, F., Zimmermann, G., Teichmann, T. (2014): Entwicklung eines Leichtbetons mit tragenden und hochdämmenden Eigenschaften als matrixoptimierter und gefügedichter Werkstoff aus zementgebundenem hydrophobierten Aerogelgranulat. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 28646 – 23 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen. Stuttgart.

Schlaich, Mike; Hückler, Alex (2017): Infraleichtbeton: Reif für die Praxis. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (12), S. 772–783. DOI: 10.1002/best.201700046.

Schwenk, T., Steck, J. (2014): Dämmbeton - Energie, Ökologie und Nachhaltigkeit. Zertifikatsarbeit, Muttenz.

## 4 Komfort und Energie

MS 2 und 6 | Bearbeitung: Laura Franke

Ein Messkonzept wird im laufenden Projekt analog zum Klimadesign und Energiekonzept in einem interdisziplinären Prozess entwickelt und beschreibt Art und Umfang der Messdatenerfassung und Datenaufzeichnung. In den drei Forschungshäusern soll das Konzept gleichermaßen umgesetzt werden.

### 4.1 Ziel des Monitorings

Langfristiges Ziel ist es, durch ein Monitoring – idealerweise über zwei Jahre mit zwei kalten und warmen Jahreszeiten (Einfach Bauen 3) – untersuchen zu können, ob die Umsetzung des Konzeptes *Einfach Bauen* in den Forschungshäusern in Bad Aibling bezüglich Komforts und Energie erfolgreich war. Mit anderen Worten geht es um die Frage, ob die einfach gebauten Forschungshäuser über das ganze Jahr eine thermisch komfortable Aufenthaltsqualität schaffen und die dafür benötigte Energie verhältnismäßig ist. Für die Betrachtung werden folgende Themen unterschieden:

#### **Bauklimatisches Verhalten**

Um das bauklimatische Verhalten der drei Bauweisen bewerten und vergleichen zu können, wird der thermische Komfort in den Innenräumen gemessen. *Abbildung 88* zeigt die Parameter, die den thermischen Komfort beeinflussen.

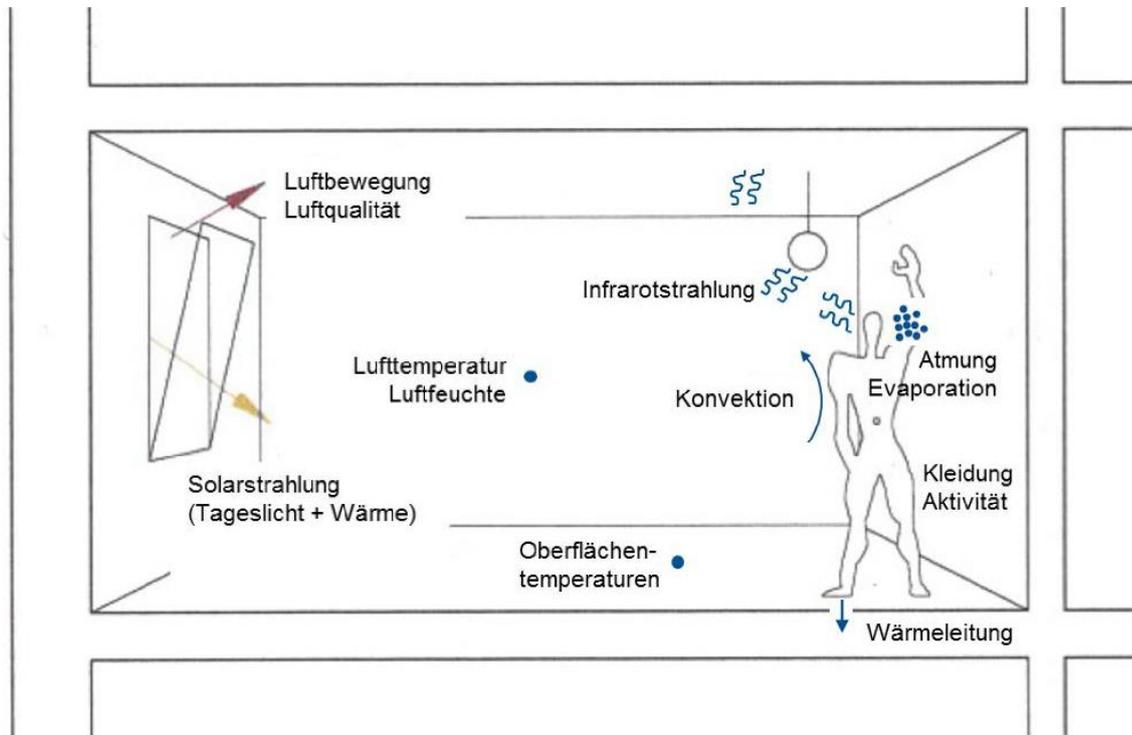


Abbildung 87 Thermische Komfortparameter

Um die Performance des Gebäudes ohne den Einfluss der Nutzer\*innen zu messen, werden in den drei Forschungshäusern im 2. OG die 1-Zimmer-Wohnungen nicht vermietet, so dass – neben den Messungen der bewohnten Wohneinheiten – zum Vergleich auch Leerstandsmessungen durchgeführt werden können. Es werden die Komfortparameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlungstemperatur, CO<sub>2</sub>-Gehalt, und Beleuchtungsstärke aufgezeichnet. *Abbildung 89* zeigt die in Raummitte an einem Stativ angebrachten Sensoren.

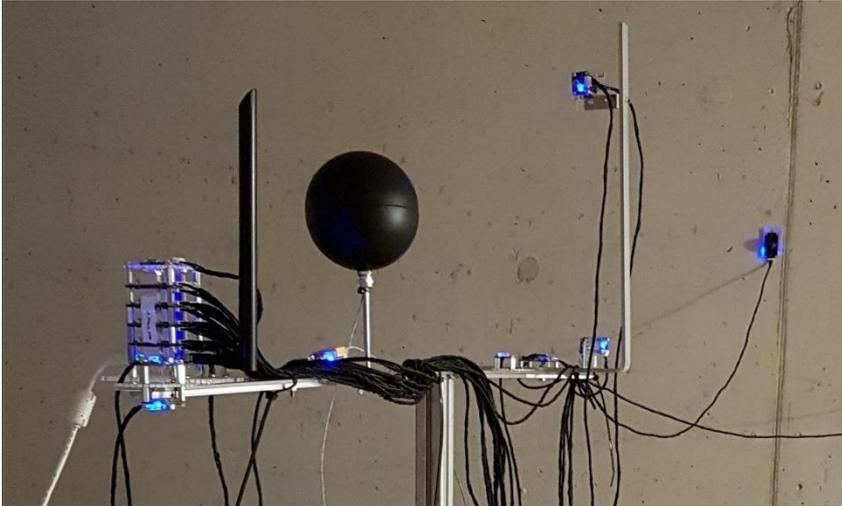


Abbildung 88 Sensoren in Raummittel der 1-Zimmer-Wohnung im 2. OG des Leichtbetonhauses in Bad Aibling

## Nutzerverhalten

Um das Komfortempfinden der Nutzer\*innen zu untersuchen, soll in Einfach Bauen 3 eine Nutzerbefragung durchgeführt, sowie in den bewohnten 2,5-Zi-Wohneinheiten im 2. OG der Forschungshäuser die Temperatur, Feuchte und der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft gemessen werden. Um Aussagen über das Lüftungsverhalten der Nutzer\*innen, werden Fensterkontakte an allen Fenstern der genannten Wohnungen angebracht, die das Öffnen der Fenster aufzeichnen sollen. *Abbildung 90* zeigt die Planung der Anbringung der Fensterkontakte in der Süd-Wohnung im 2. OG des Leichtbetonhauses.



*Abbildung 89 Planung der Anbringung der Fensterkontakte am Holzrahmen*

### **Realer Energieverbrauch**

Die Verbrauchsmessung untersucht die jeweiligen Verbräuche an Energie bzw. Energieträgern. Mit der Erfassung und Auswertung der Daten lässt sich überprüfen, ob der zuvor berechnete Energiebedarf in der Praxis erreicht wird. Im 2.OG der Forschungshäuser ist geplant, die Wärmemengen für Heizen und Warmwasser sowie den Stromverbrauch je Wohneinheit zu erfassen. Die Stromzähler wurden bereits in den Wohneinheiten des Leichtbetonhauses getestet. *Abbildung 91* zeigt den Strommesser für den Stromführenden Leiter (hier: schwarze Phase), der im Sicherungskasten der Wohnung eingebaut wird.

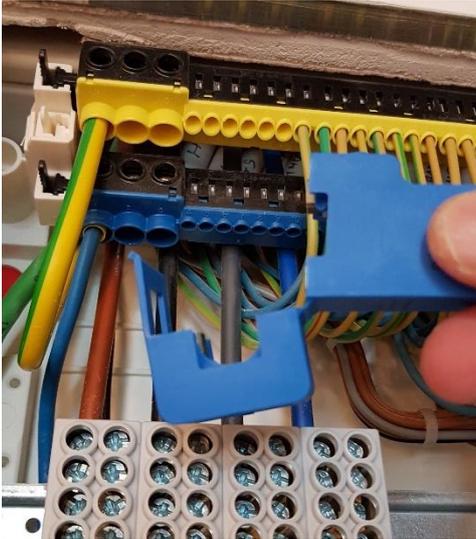


Abbildung 90 Geöffneter Strommesser für die Erfassung der schwarzen Phase

Die Integration der Wärmemengenerfassung wird aktuell mit Bauherr und Planer abgestimmt (Zählerkonzept, Erfassung der Betriebszustände und Messdaten etc.). Ziel bezüglich der technischen Gebäudeausrüstung ist ein robustes einfaches Technikkonzept, das keinem Anlagenmonitoring bedarf. Deshalb werden bezüglich des Themas Betriebszustände lediglich technische Komponenten wie die Schaltzustände von Kunstlicht, Fensteröffnung, etc. untersucht, sowie der Gesamtenergieverbrauch der Häuser erfasst.

## Umsetzung

Das ursprüngliche Vorhaben in Einfach Bauen 2 war, die 1-Zimmer-Wohnungen im 2. OG der drei Forschungshäuser als Testräume heranzuziehen und erste Testmessungen durchzuführen. Aufgrund der zeitlich verschobenen Bauphasen der drei Gebäude – wodurch nur das Leichtbetonhaus ab Frühsommer 2020 zugänglich war – wurde das Konzept der Testmessung angepasst: Statt einer 1-Zimmer-Wohnung je Gebäude wurden alle drei Wohnungen im 2. OG des Leichtbetonhauses mit Messsensoren versehen. Dies hatte den Vorteil, dass somit die Funktionalität der Datenübertragung über die Reichweite des gesamten Stockwerks getestet werden konnte. Es stellte sich heraus, dass diese Untersuchungsmöglichkeit zu einer Änderung des Messkonzepts führte, das im Folgenden Unterkapitel erläutert wird.

## 4.2 Messkonzept

### Messkonzept für das 2.OG

In *Abbildung 92* ist das Messkonzept anhand des Grundrissplans des 2.OG des Leichtbetonhauses dargestellt. Der Grundriss zeigt auf der linken Seite des Treppenhauses die nach Norden orientierte 2,5-Zimmer-Wohnung, auf der rechten Seite zunächst das 1-Zimmer-Apartment, mit Ausrichtung nach Osten, und anschließend die zweite 2,5-Zimmer-Wohnung, nach Süden orientiert. Die roten Kreuze markieren stellen an denen Sensoren angebracht sind.

Welche Sensoren wo gemessen werden, ist unten aufgeführt. Die blauen Kreuze markieren die Stellen in den Wohnungen, an denen über Sicherungs- und Verteilerkästen die Verbrauchsmessung stattfindet.

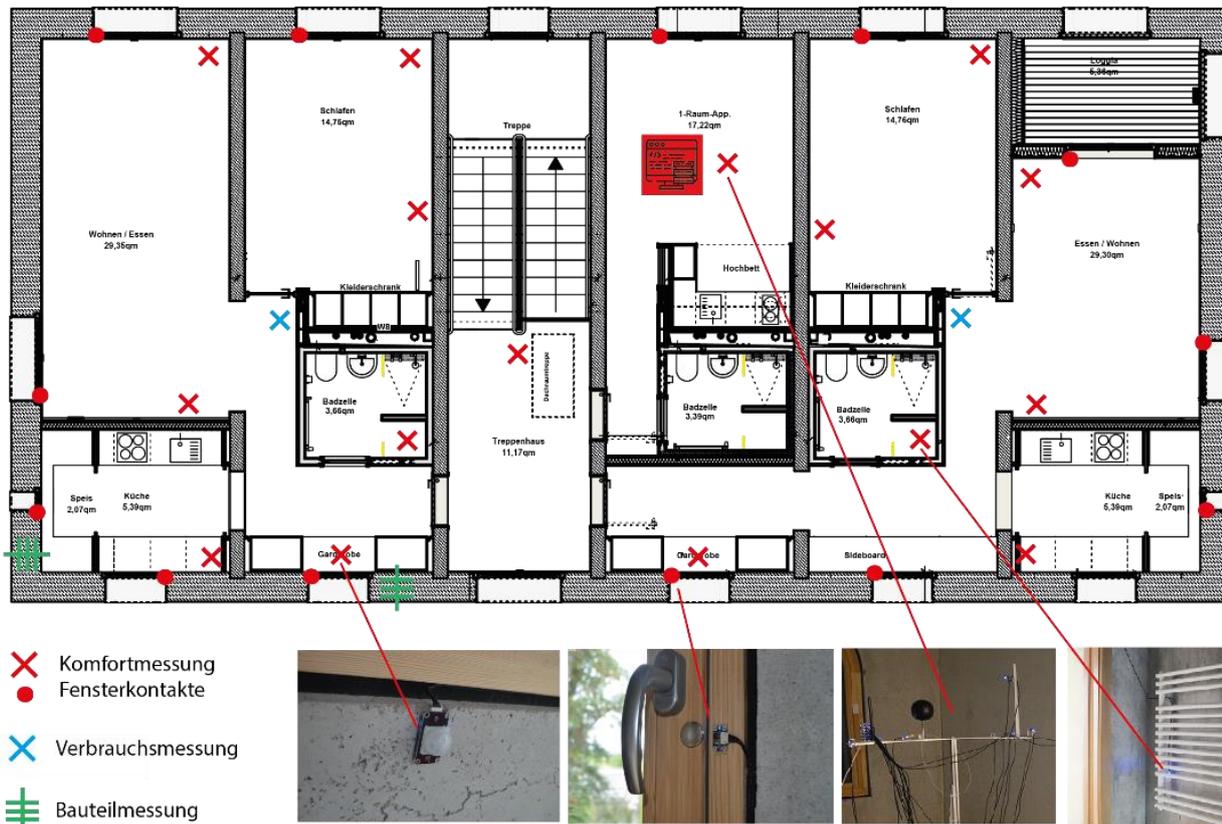


Abbildung 91 Messsensorenkonzept anhand des Grundrissplans für den 2.OG des Leichtbetonhauses

In der unbewohnten 1-Zimmer-Wohnung des 2.OG werden folgende Parameter gemessen:

- Raumlufttemperatur [°C]
- Strahlungstemperatur [°C]
- Oberflächentemperaturen [°C]
- Raumluftfeuchte [%]
- CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft [ppm]
- Beleuchtungsstärke [Lux]

In den bewohnten 2,5-Zimmer-Wohnungen des 2.OG werden folgende Parameter gemessen:

- Raumlufttemperatur [°C]
- Raumluftfeuchte [%]
- Oberflächentemperatur des Heizkörpers [°C]
- CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft (nur im Schlafzimmer) [ppm]
- Fensteröffnung [1/0]

- Anwesenheit [1/0]

### Messtechnik und Dateninfrastruktur

Aus technischen und finanziellen Gründen, sowie aus Gründen der Datensicherheit wurde für die Messtechnik das Baukastensystem der Firma Tinkerforge GmbH gewählt. Mit dieser Entscheidung ergibt sich ein Messaufbau, bei dem alle Sensoren in den Räumen verteilt werden können und ihre Messdaten an eine zentrale Stelle leiten. In der 1-Zimmer-Wohnung befindet sich ein Microcomputer (Red Brick), die Zentrale des Netzwerkes, an den die Sensoren senden und von dort ihre Befehle zur Datenerfassung erhalten (z.B. Zeitintervall). Der Microcomputer ist verbunden mit einem PC, der die Daten über LAN-Verbindung an die TUM sendet. Über den PC kann gleichzeitig via Remote-Verbindung von der TUM aus auf das Sensornetzwerk vor Ort zugegriffen werden, beispielsweise, um Fehler zu beheben oder Sensoren neu zu starten.

Vorgabe ist ein temporäres Technikkonzept, das nach der Monitoringphase von zwei Jahren vollständig rückgebaut werden kann. Zusammen mit der bewohnten Situation fiel die Entscheidung auf die Wi-Fi-Verbindung als Art der Vernetzung, um ein Sensornetzwerk zu schaffen, ohne Löcher durch Wände bohren und Kabel im Gebäude verlegen zu müssen. Die Sensoren werden als Knotenpunkte zu einem Netz (engl.: mesh) für die Kommunikation verbunden, welches die stabilste und robusteste Lösung zur Erweiterung drahtloser Netzwerke ist. *Abbildung 93* zeigt das Netzwerk, bestehend aus dem Mesh-Router und den Mesh-Knoten (Mesh-Root-Node). Jeder Knoten fungiert in diesem System als Signalverstärker. Die WiFi Frequenz von 2,4 GHz wurde gewählt, um eine bessere Durchdringung als bei 5 GHz zu erreichen. Die Signalreichweite liegt zwischen 18 und 125 Metern pro Knoten (IEEE 802.11, 2020). In jedem Raum befindet sich mindestens ein Kommunikationsknoten, einige Räume haben bis zu drei Knoten.

Das gesamte Sensornetzwerk mit Zentrale für die drei Wohneinheiten im 2.OG des Leichtbetonhauses wurde an der Technischen Universität München aufgebaut und störungsfrei getestet. Nach der Installation vor Ort traten jedoch konstante Übertragungsprobleme auf. Gründe dafür sind die Auswirkungen von Latenz, Signalstörungen und Echtzeit-Protokollierung der Daten. Zudem wurde erkannt, dass einzelne Sensoren trotz Aufklärung der Nutzer\*innen ausgesteckt werden, denn jeder Knoten des Netzwerkes braucht eine Stromversorgung. Das Ausschalten unterbricht die Kommunikation im Netzwerk und damit die Datenübertragung aller vorangeschalteten Sensoren.

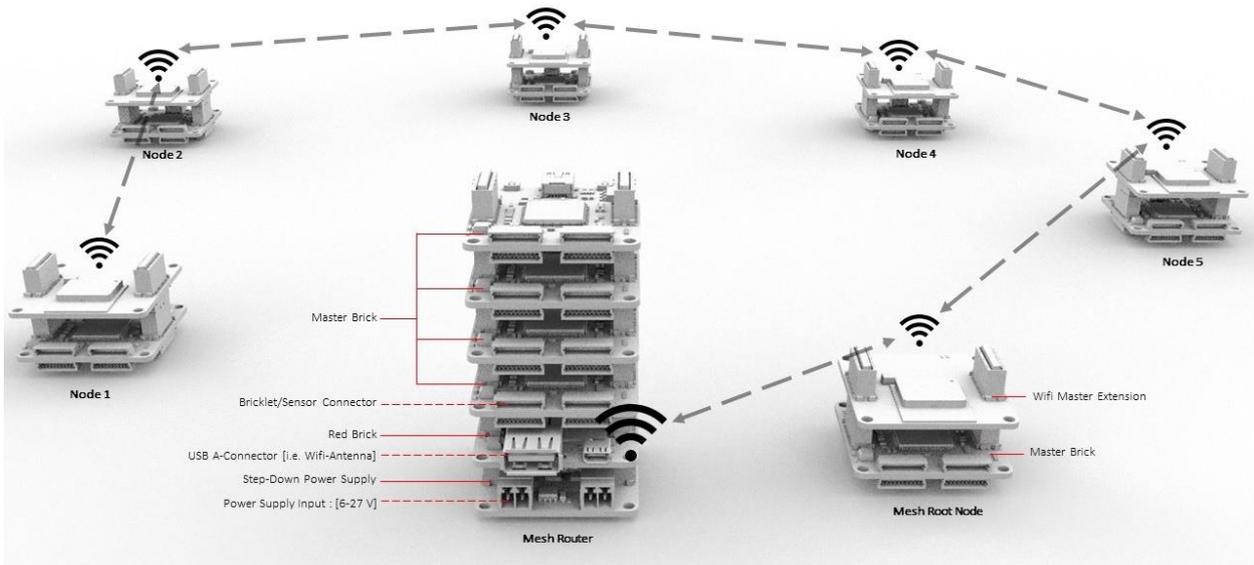


Abbildung 92 Sensornetzwerk mit Wifi-Datenübertragung

Aus diesen Gründen wurde das Konzept auf die Übertragung via Datenkabel (Modbus-Kommunikation) umgestellt. Derzeit findet die Abstimmung mit dem Bauherrn statt, um in den noch leerstehenden Gebäuden (Bauweise Massivholz und Mauerwerk) die Verlegungsarbeiten durch den Elektriker noch vor Bezug ab Januar 2021 fertigzustellen. *Abbildung 94* zeigt den aktuellen Stand des Messplans mit Datentransfer via Kabelverbindung.

**Forschungshäuser Bad Aibling**  
 Leichtbetonhaus  
 2. OG



Abbildung 93 Aktueller Stand des Messplans mit Datentransfer via Modbus-Kommunikation

## Wetterstation

Die Planung sah vor, die Wetterstation auf das Dach des mittleren Gebäudes – dem Holzhaus – zu installieren. Dadurch wäre die Station frei von Baumschatten gewesen. Durch den verzögerten Baufortschritt wurde im Frühjahr 2020 die Wetterstation auf dem Dach des Leichtbetonhauses angebracht. Da das Haus an seiner Ostseite von hohen Bäumen gesäumt ist, ist ein Baumschatten nicht vollständig auszuschließen. Dies betrifft die Übergangsmonate, in denen die Laubbäume (noch/schon) Blätter tragen und die Sonne (noch/schon) tiefer steht. Durch die Anbringung der Wetterstation in 2m Höhe über dem First und mittig in Firstrichtung, nahe dem Dachfenster, wird versucht, die Verschattung zu minimieren, wenn nicht sogar ganz zu vermeiden. *Abbildung 95* zeigt die Installation der Wetterstation auf dem Dach des Leichtbetonhauses.



*Abbildung 94* Installation der Wetterstation auf dem Dach des Leichtbetonhauses

Die Station erfasst folgende Parameter:

- Lufttemperatur [°C]
- Relative Luftfeuchte [%]
- Niederschlagsmenge [mm]
- Windrichtung [0-360°]
- Windgeschwindigkeit [m/s]

- Solare Globalstrahlung [W/m<sup>2</sup>]
- Solare Diffusstrahlung [W/m<sup>2</sup>]

### 4.3 Messergebnisse

Wie in Kapitel 4.2 erläutert, konnten aufgrund des Baufortschritts nicht wie geplant Kurzzeitmessungen der 1-Zimmer-Wohnungen in allen Forschungshäusern durchgeführt werden, sondern nur der Testraum im 2. OG des Leichtbetongebäudes. Dafür konnte zusätzlich die Wetterstation installiert und auch die anderen Wohnungen des 2.OGs mit Sensoren ausgestattet werden, um die technische Auslegung des Messkonzeptes zu testen. Die erhobenen Wetter- und Komfortdaten wurden in 5-Minuten-Schritten aufgezeichnet, auf ihre Plausibilität hin überprüft und ausgewertet. In *Abbildung 96* ist die Auswertung für eine warme Woche vom 24.-30. August dieses Jahres dargestellt.

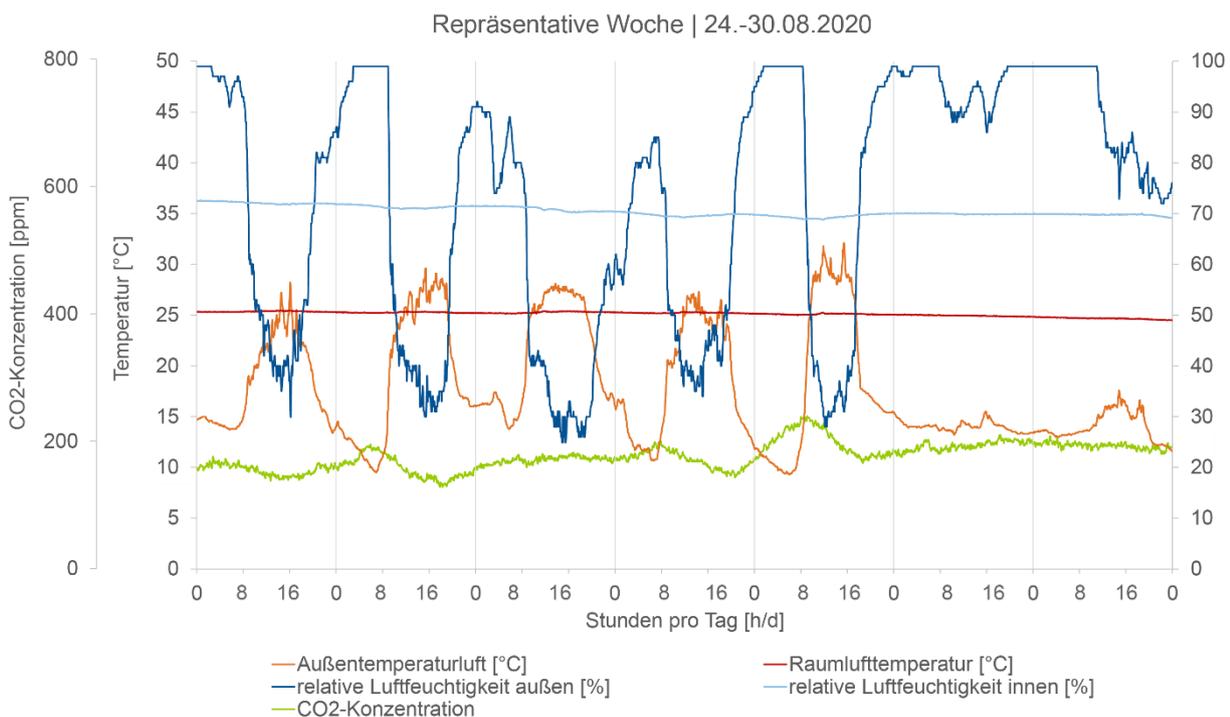


Abbildung 95 Messergebnisse im August 2020 der Außenluft und des Innenkomforts im Ost-Raum der 1-Zimmer-Wohnung

Auffällig sind die gleichmäßigen Verläufe der Raumlufttemperatur und –feuchte, trotz der schwankenden Werte der Außenluft, was auf den Effekt der thermischen Trägheit rückschließen lässt. Allerdings nicht ausschließlich, denn es gibt mehrere Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Ostorientierung des Raumes. Der Raum wird nicht bewohnt, es wurde somit das Fenster nicht geöffnet. Dies erklärt den niedrigen CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft. Auch die Grundlüftung über Fensterfalzlüfter und Badablüfter war zum Zeitpunkt der Messung noch nicht in Betrieb. Zusätzlich fand zu diesem Zeitpunkt noch der Dehydrationsprozess des Leichtbetons statt, der

den Raum an allen Wänden- und der Deckenfläche umschließt. Es ist anzunehmen, dass die hohen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit bei durchschnittlich 70 % auf die zuvor genannten Gründe zurückzuführen sind.

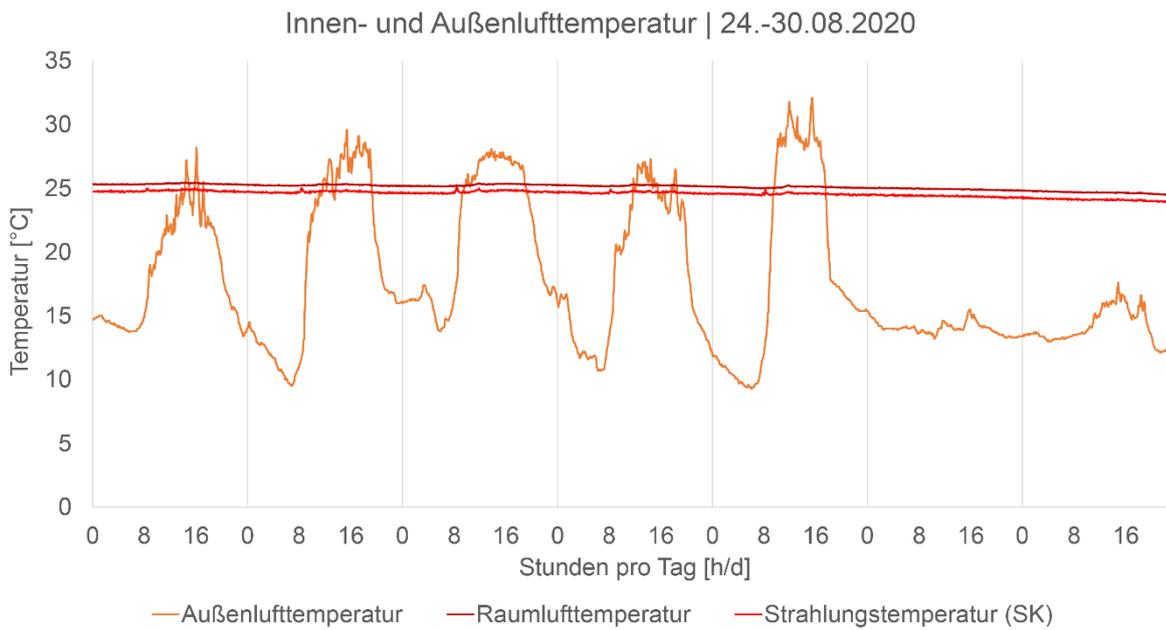


Abbildung 96 Temperaturverlauf über eine Augustwoche

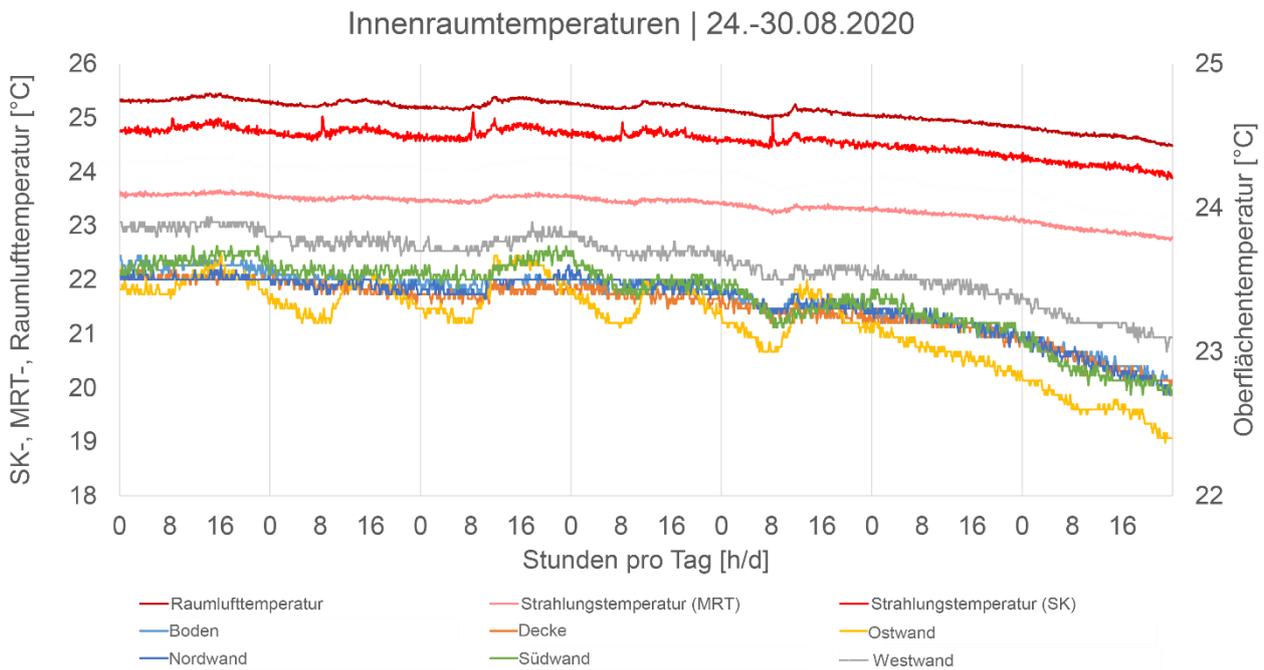


Abbildung 97 Oberflächentemperaturverläufe über eine Augustwoche

Die Abbildungen 97 und 98 untersuchen die Übereinstimmung der Schwarzkugeltemperatur in Raummitte und der über Infrarotsensoren gemessenen Oberflächentemperaturen, die als Mittelwert die mittlere Strahlungstemperatur (MRT= mean radiant temperature) darstellt. Aus ihr und der Raumlufttemperatur errechnet sich die operative Temperatur – also die gefühlte Temperatur.

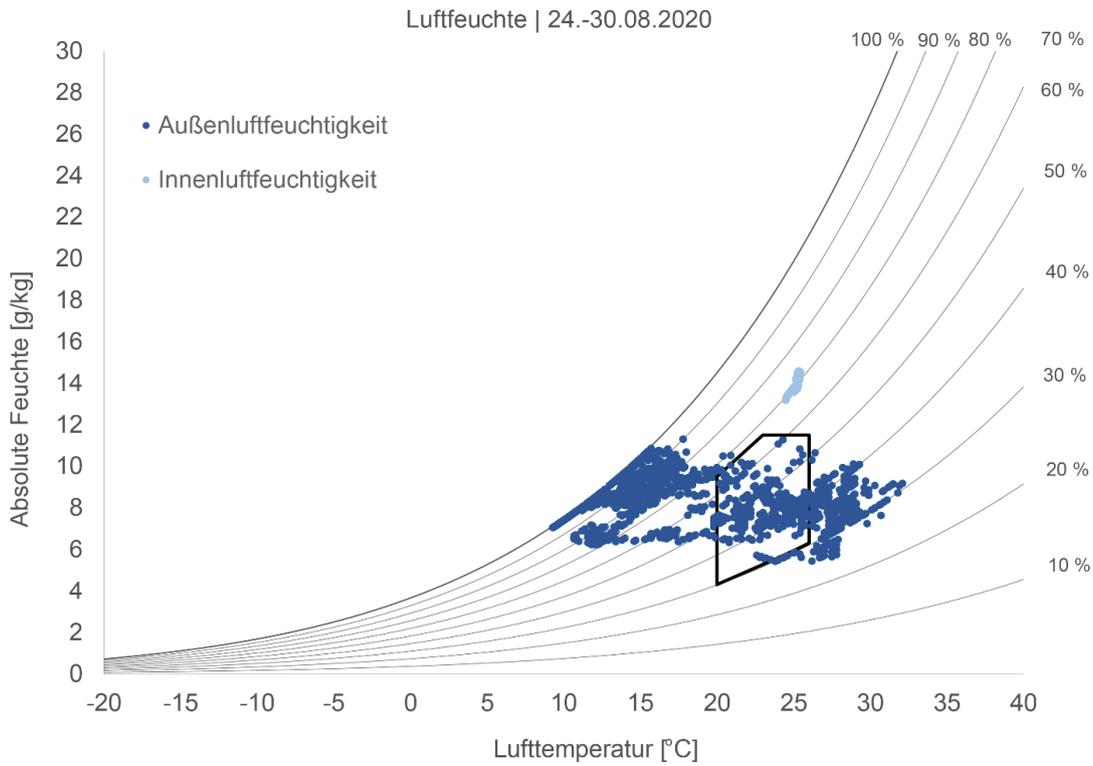


Abbildung 98 HX-Diagramm über Luftfeuchte mit Angabe des Komfortbereichs im Innenraum

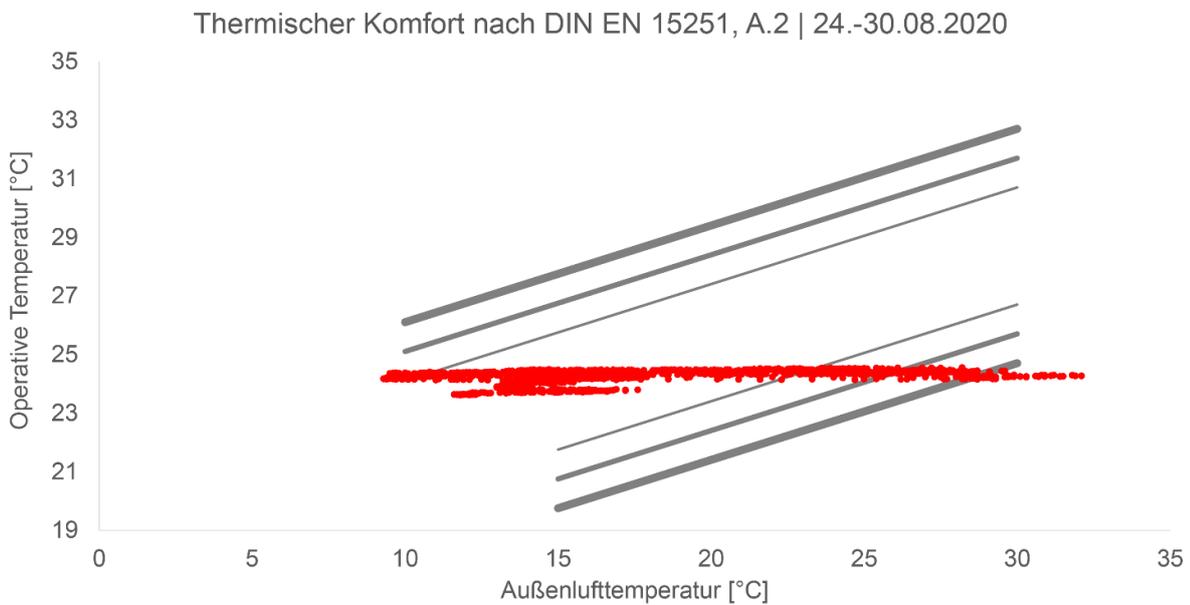


Abbildung 99 Operative Temperatur über Außenlufttemperatur mit Angabe des adaptiven Komfortbereichs nach DIN EN 15351

In der thermischen Komfortbewertung zeigt sich die Raumluft aufgrund der oben aufgeführten gegebenen Umstände, z.B. unbewohnt und keine Grundlüftung, als unkomfortabel humid, jedoch in der Temperatur konstant und meist im komfortablen Bereich. Die Raumlufttemperaturen erreichen maximal 25 °C, was bei hohen Außenlufttemperaturen von 30 °C und höher in der adaptiven Komfortbewertung schon als „unkomfortabel kühl“ gewertet wird.

Zum Vergleich der warmen Woche soll eine kühle Woche aus dem Oktober, kurz vor Beendigung der Testmessung, gezeigt werden. Aufgrund der oben erklärten Probleme der Datenerhebung, können für die kalte Woche nur drei statt sieben Tage gezeigt werden. Dafür sind erste Werte der Solarstrahlung des zwischenzeitlich eingebauten Pyranometers vorhanden.

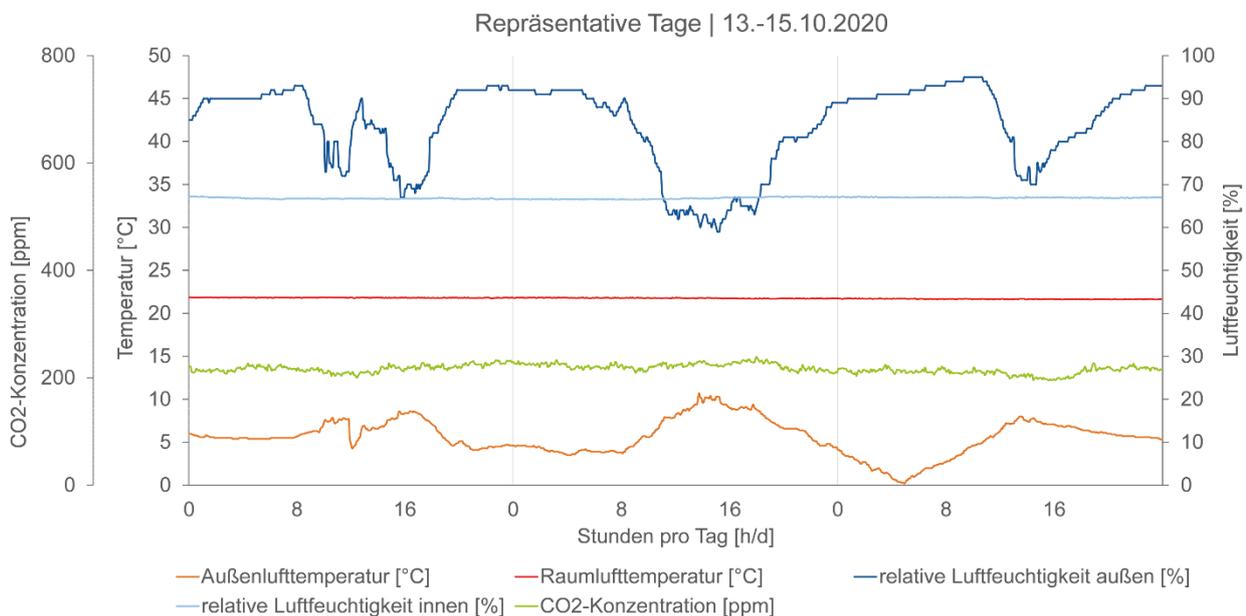


Abbildung 100 Repräsentative kühle Tage Mitte Oktober 2020

Bei niedrigen Außentemperaturen zwischen 0 und 10 °C Außenlufttemperatur wird die Innenluft auf knapp 22 °C geheizt. Die relative Raumluftfeuchte sinkt dadurch im Vergleich zur Außenluftfeuchte auf 20-30 % ab. Der CO2-Gehalt der Raumluft bleibt bei durchschnittlichen 200 ppm.

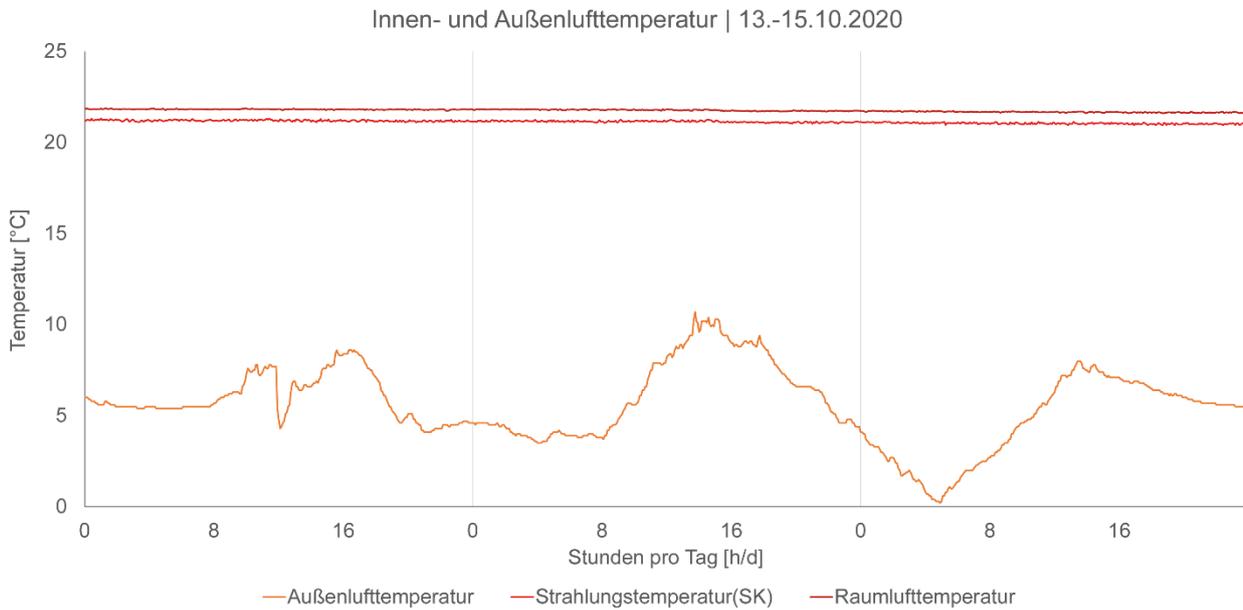


Abbildung 101 Temperaturverlauf der Daten von Mitte Oktober 2020

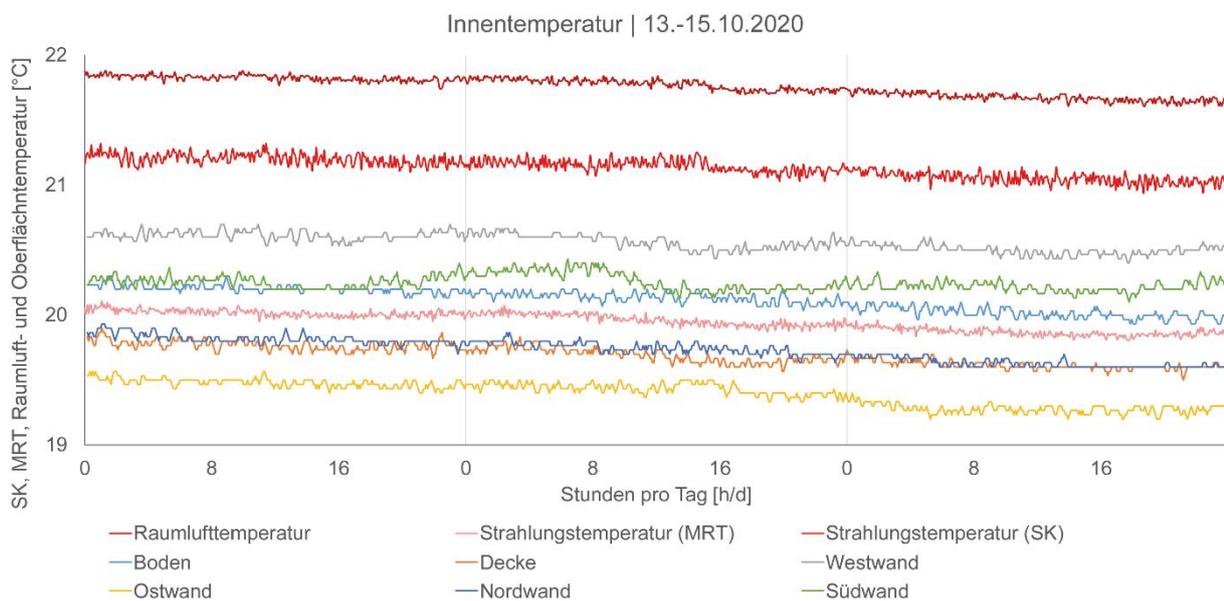


Abbildung 102 Oberflächentemperaturverläufe Mitte Oktober 2020

Die Innenoberflächentemperatur der Außenwand hat eine Temperaturdifferenz zur Raumluft von mehr als 2 Kelvin.

Die Jahresauswertung bezüglich Komforts wird aufgrund der geringen Datenmenge hier nicht gezeigt. Die operativen Temperaturen bleiben im Komfortbereich, nur die Luftfeuchte ist mit ca. 70 % gleichbleibend hoch.

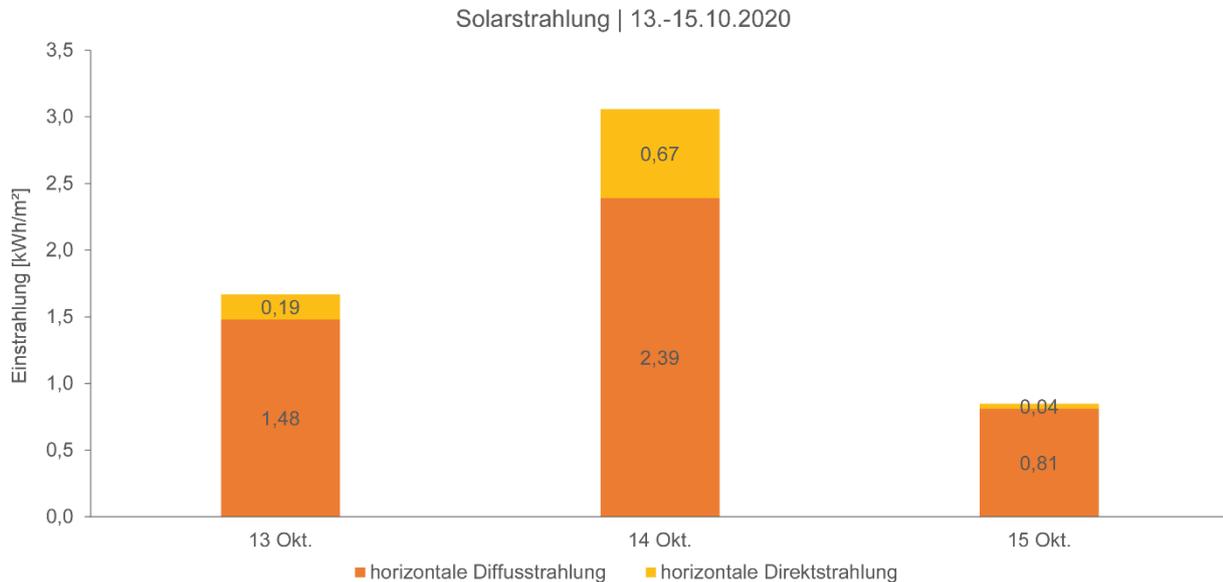


Abbildung 103 Solarstrahlung 13.-15.10.2020

Die solare Einstrahlung wird als horizontale Direkt- und Diffusstrahlung gemessen und in kWh/m<sup>2</sup> angegeben.

#### 4.4 Simulationsmodell

In einem zweiten Schritt soll das tatsächliche bauklimatische Verhalten der Räume im 2.OG mittels Vergleichs durch dynamisch thermische Simulation bewertet werden. Dazu wurde in Einfach Bauen 2 das Simulationsmodell aufgebaut, Randbedingungen, wie beispielsweise das Wetter oder Profile der Nutzer\*innen, definiert und erste Ergebnisse erzielt. Im Folgenden werden zunächst die Klimadaten, das geometrische Modell und weitere Eingangsparameter vorgestellt, bevor anschließend die Ergebnisse gezeigt werden.

##### Klimadaten

Die lokale Betrachtung der Klimadaten in Bad Aibling/Mietraching wird berücksichtigt. Nach erfolgreichem Monitoring soll in Zukunft ein Wetterdatensatz aus den Messdaten in die Simulation einfließen. Nur dann kann ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten zu Komfort und Verbrauch stattfinden.

Als vorläufiger Ersatz wird nach VDI der Testreferenzjahr-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes verwendet (VDI 6020, 2017) (BBSR, 2017). Der TRY-Datensatz 2017 zeigt den typischen Witterungsverlauf eines Jahres für ein bestimmtes Gebiet, wobei interpoliert die Messwerte der Wetterstationen und Satellitendaten auf km<sup>2</sup>-Gebiete auszuwählen sind. Geodätische Höhe und der „Urban Heat Island Effect“ (UHI) auf Lufttemperatur und relative Feuchte sind berücksichtigt. Der Datensatz beinhaltet stündliche meteorologische Daten,

bestehend aus repräsentativen Messwerten, die über den Zeitraum 1995-2012 ermittelt wurden. Für die Auslegung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen werden extrem warme und kalte Witterungsprofile aus realen Halbjahreszeiträumen der Vergleichsbasis herangezogen (Deutscher Wetterdienst, 2020). Unter der aktuellen klimatischen Veränderung mit tendenziell milderem Temperaturen im Winter ist der extreme Datensatz als ein „Worst-Case-Szenario“ bezüglich der kalten Temperaturen zu anzusehen.

Demnach wurde für die Simulation der TRY2017-Datensatz für den Bad Aiblinger Stadtteil Mietraching mit extremen Wetterdaten gewählt - genannt „TRY2017\_Mietraching\_extrem“. Folgende Parameter fließen durch den Datensatz *TRY2017\_Mietraching\_extrem* in die Simulation ein:

- Lufttemperatur [°C]
- Relative Luftfeuchte [%]
- Absoluter Luftdruck [Pa]
- Direkte und diffuse Horizontalstrahlung [W/m<sup>2</sup>]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Windrichtung [N = 0°]
- Bedeckungsgrad [0-8]

Folgende Abbildungen zeigen die Datenverläufe für Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung und Windsituation für den Standort Mietraching über das Jahr.

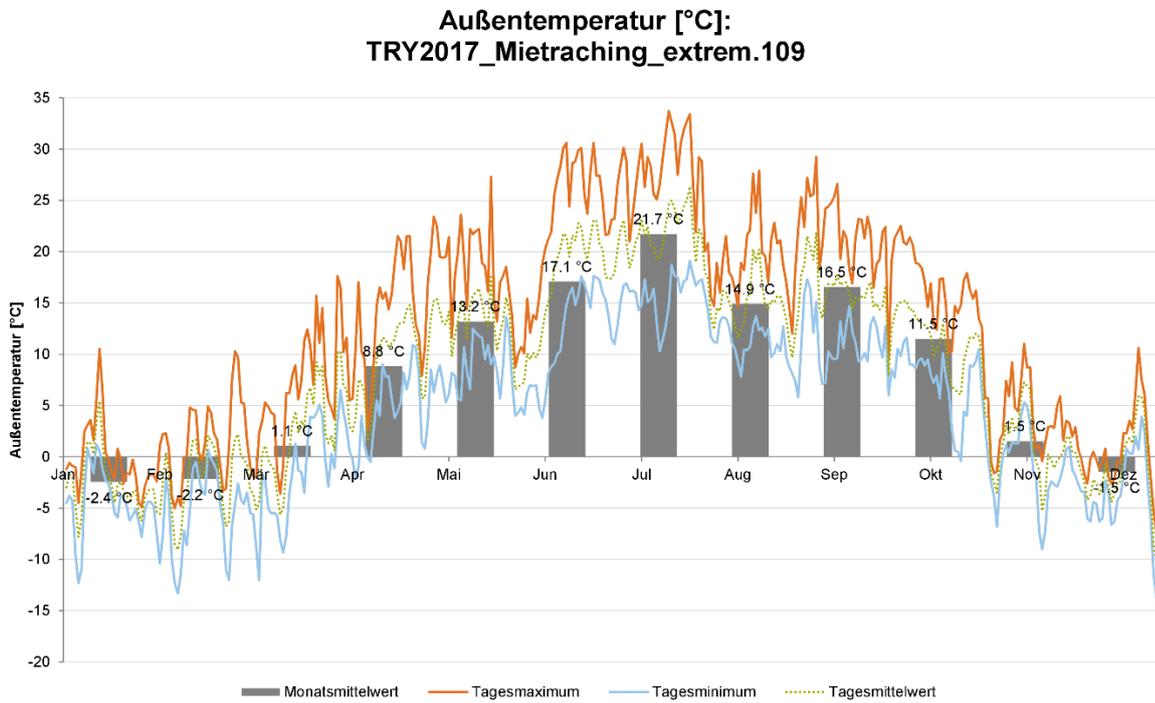


Abbildung 104 Verlauf der Außenlufttemperatur (y-Achse) über die Monate eines Jahres (x-Achse)

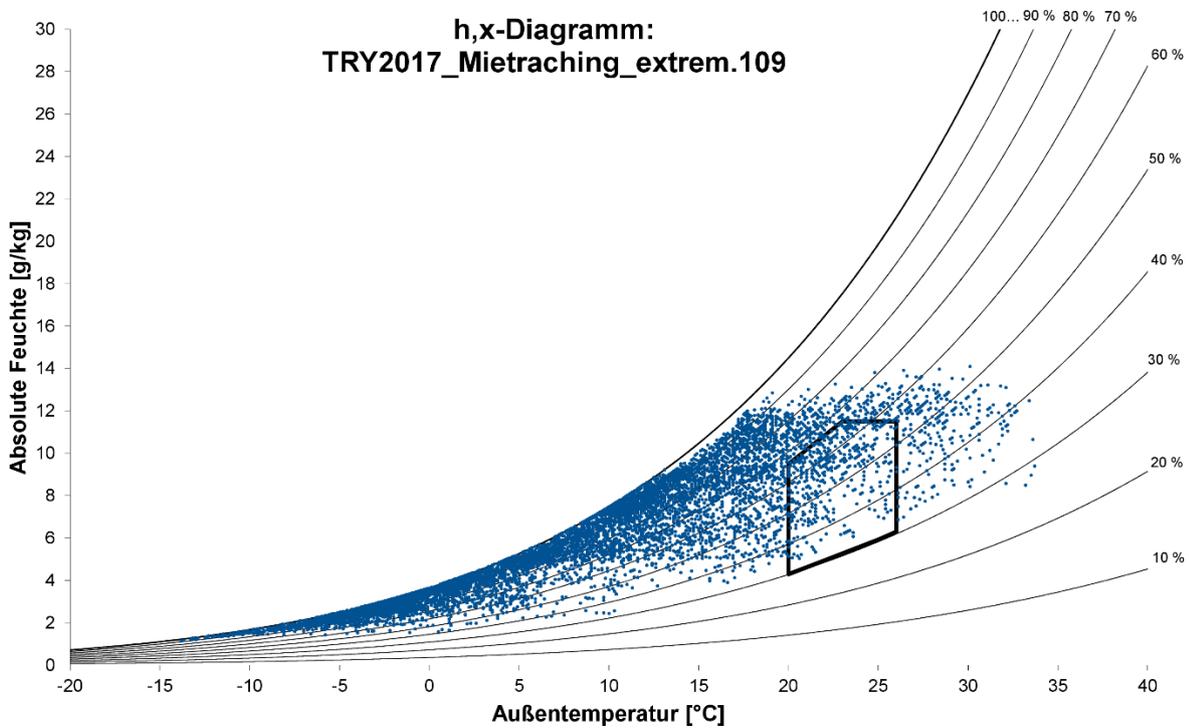


Abbildung 105 HX-Diagramm der absoluten Feuchte (y-Achse) über die Außenlufttemperatur (x-Achse)

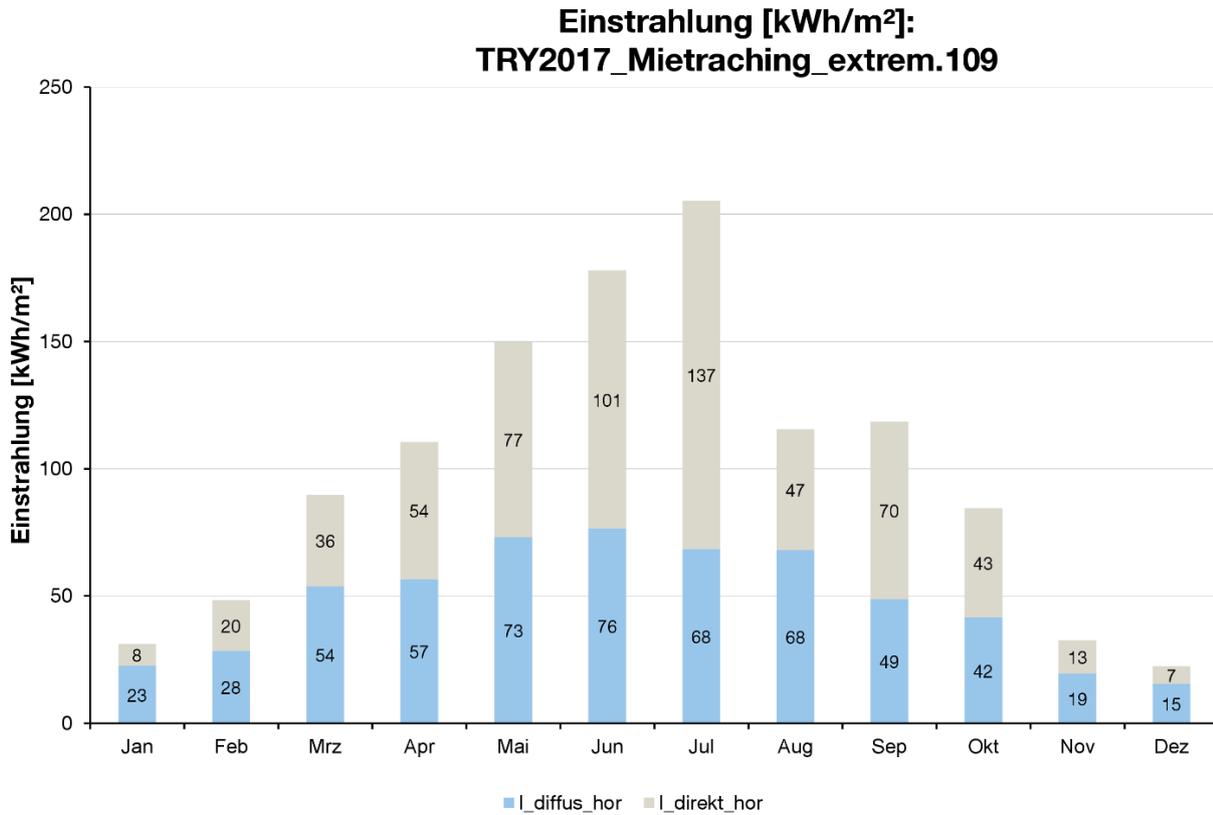


Abbildung 106 Monatssummen der direkten (grau) und diffusen (blau) Horizontalstrahlung

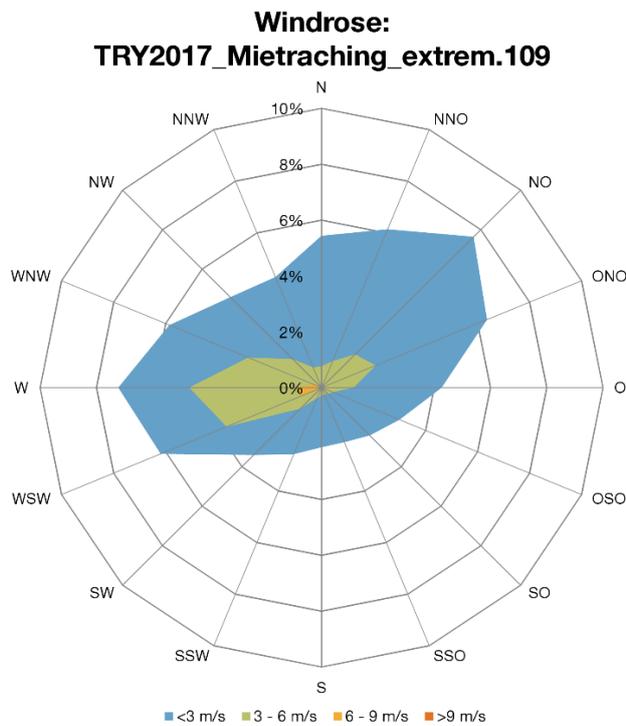


Abbildung 107 Windrichtung mit Farbskala nach Windgeschwindigkeit

### Geometrisches Modell

Das Simulationsmodell für das 2.OG der drei Forschungshäuser wurde als 11-Zonen Modell in der Softwareumgebung Rhinoceros®6 angelegt und über das Grasshopper Plug-In TRNLizard mit den Inputdaten zur thermischen Simulation versorgt (Frenzel und Hiller, 2014).

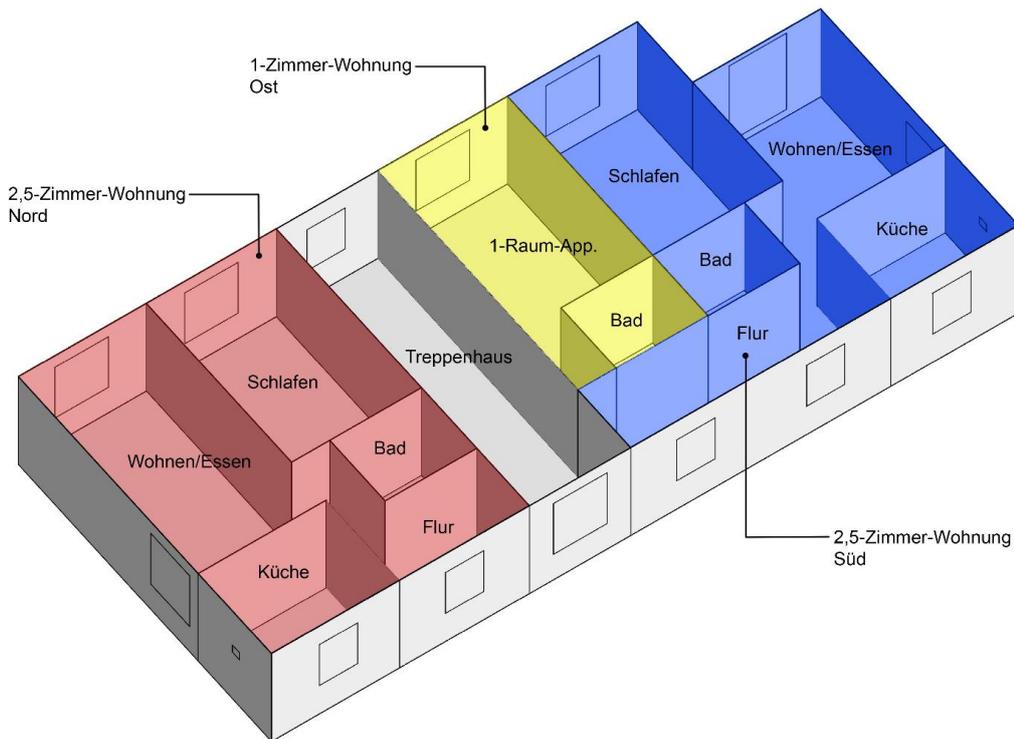


Abbildung 108 11-Zonen-Modell des 2.OG der Forschungshäuser in Rhinoceros®6

Die Simulation liefert Ergebnisse zu jeder einzelnen der 11 Zonen. Die in *Abbildung 109* gleichfarbig markierten Zonen zusammengefasst ergeben Ergebnisse zu einer Wohneinheit.

### Dreifach-Verglasung

Die bauphysikalischen Parameter der in den Forschungshäusern eingesetzten Drei-Scheiben Wärmeschutzverglasungen wurden wie folgt in der Simulation berücksichtigt:

- Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert: 0,49
  - Lichttransmissionsgrad T-Vis: 0,71
  - Rahmenanteil 20 %
  - Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert Glas: 0,63 W/m<sup>2</sup>\*K
- U-Wert Rahmen: 1.50 W/m<sup>2</sup>\*K
- Fenster gesamt U-Wert Fenster: 1,00 W/m<sup>2</sup>\*K**

## **Baukonstruktion**

Die Aufbauten der Außenwand-, Innenwand-, Boden- und Deckenkonstruktionen für Infraleichtbeton, Massivholz und gelochter Ziegel werden nach Planung berücksichtigt. Eine Bauteiltabelle mit Angaben der bauphysikalischen Parameter befindet sich im Anhang. Die drei Außenwandstärken erfüllen den U-Wert von  $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  nach EnEV 2016 (Baugenehmigung vor dem 1. Nov. 2020), mit Ausnahme des Infraleichtbetons. Hier wurden die vor Ort gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit  $\Lambda 0,239 \text{ W/m}^2\text{K}$  und der Wärmekapazität  $c 0,758 \text{ MJ/kg}$  verwendet.

## **Verschattung**

Eine Verschattung durch die Fensterlaibungstiefen wurde berücksichtigt. Hingegen die Verschattung durch Nachbarbauten bzw. hier zutreffender die Baumverschattung – als worst-case Szenario – wurde nicht modelliert. Ein aktiver außenliegender Sonnenschutz wird zunächst nicht herangezogen.

## **Orientierung**

Die solaren Einträge in den Raum sind abhängig von dem jahreszeitlichen Sonnenstand und der Orientierung. Die Nord-Süd Ausrichtung der Baukörper mit einer Abweichung nach Nordost von  $3^\circ$  wurde berücksichtigt.

## **Interne Lasten**

Die 2,5-Wohneinheiten werden mit zwei Personen, die 1-Zimmer-Wohnung mit einer Person belegt. Je Person werden gekoppelt mit ihrer Anwesenheit konstant  $70 \text{ W}$  Wärme sowie  $40 \text{ g/h}$  Feuchte an den Raum abgegeben. Für die Anwesenheit wurde nach SIA 2024 das 24h-Personen-Profil für Wohnen mit gemittelter Jahresgleichzeitigkeit gewählt (SIA 2024, 2015).

Für elektrische Geräte (Laptop, Radio, etc.) wurde eine Grundlast von  $8 \text{ W/m}^2$  und zusätzlich  $5 \text{ W/m}^2$  installierte Lichtleistung für das Kunstlicht angesetzt und an das 24h-Geräte-Profil für Wohnen nach SIA 2024 gekoppelt (SIA 2024, 2015).

In der Küche beträgt die Grundlast  $20 \text{ W/m}^2$  und die Feuchteabgabe  $8 \text{ g/m}^2\text{h}$ , verknüpft mit dem Küchen-Profil nach SIA 2024 (SIA 2024, 2015).

Im Bad wird das Trinkwarmwasser mit einer Vorlauftemperatur von  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $40 \text{ Litern}$  pro Person und  $2 \text{ Vollaststunden}$  je morgens und abends (7-8 und 20-21 Uhr) angesetzt.

Der Hilfsstrom für Pumpen und Ventilatoren wird mit  $0,5 \text{ W/m}^2$  konstant berücksichtigt.

## Heizung

Der ideale Heizer zur Ermittlung der Heizenergie wendet die notwendige Energie auf, um den Raum auf eine operative Solltemperatur von 21°C, mit einer Nachtabsenkung von 2 K, zu heizen. Im Treppenhaus ist die Solltemperatur auf 18 °C gesetzt. Der ideale Heizer gleicht absolute Spitzenlasten aus, d.h. ein kurzfristiges Absinken der Raumtemperatur wird ausgeglichen, was den „worst case“ des Heizenergiebedarfs darstellt. Heizkriterium ist, dass der Raum beheizt wird, sobald sich Außentemperaturen von unter 12°C/24h einstellen.

## Lüftung

Die Lüftungsstrategie nutzt die Effekte der natürlichen Lüftung, der freien Nachtlüftung (Speichermasse), und der Grundlüftung über Fensterfalzlüfter in Kombination mit Badablüfter. Um den Feuchteschutz gewährleisten zu können, wird eine konstante Luftinfiltration von 0,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h) angesetzt (Einfach Bauen 1).

Es wird von einem intelligenten Nutzer ausgegangen, der bis zu einer Raumlufttemperatur von 24°C die Fenster so öffnet, dass ein notwendiger hygienischer Luftwechsel von 1,25 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h) gewährleistet wird. Das entspricht einer mittleren Raumluftqualität von 30 m<sup>3</sup>/(h\*Person), wie sie in der DIN EN 13779 (IDA 2) für Nichtwohngebäude und in der Schweizer Norm für Wohngebäude aufgeführt ist (DIN EN 13779:2007) (SIA 2024, 2015).

Ab Außenlufttemperaturen über 5 °C und einer operativen Temperatur von 24°C im Raum wird von einer zusätzlichen Wärmeablüftung durch das Öffnen der Fenster ausgegangen. Die Luftwechselraten werden nach Fensterfläche und -höhe, Öffnungsanteil, Höhenunterschied – bei mehreren Fenstern im Raum – und Temperaturdifferenz in der Simulation dynamisch berechnet. Dabei sind die maximal auftretenden Luftwechselraten tagsüber auf einen 3-fachen, nachts auf einen 4-fachen Luftwechsel gedeckelt. Ab einer gefallenen Raumlufttemperatur auf 22 °C findet keine Wärmeablüftung statt.

In der Küche wird eine Stoßlüftung dreimal am Tag in Kombination mit den angesetzten internen Lasten durch die Benutzung der Küche berücksichtigt. Während der Stoßlüftung wird innerhalb von 15 Minuten das Raumvolumen einmal gewechselt, was einem 4-fachen Luftwechsel entspricht.

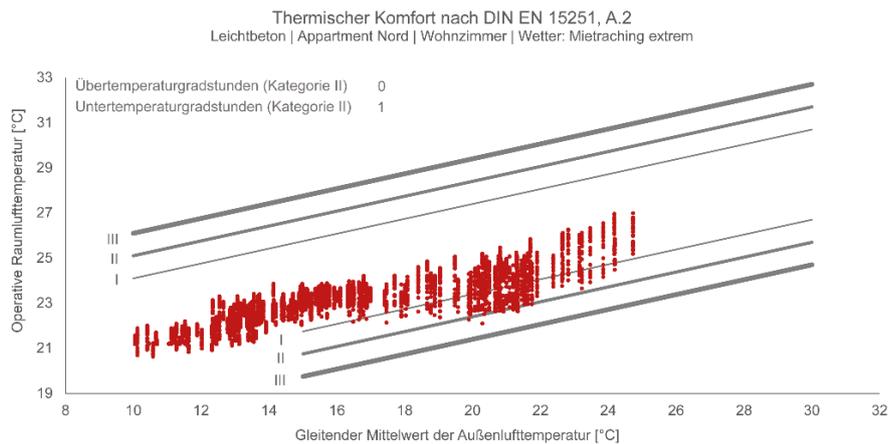
Im Lüftungskonzept des Ingenieurbüros Scheerer ist für die Abluft im Bad ein Luftwechsel von 60 m<sup>3</sup>/h bei Anwesenheit und 30 m<sup>3</sup>/h für ein Nachlüften von 10 Minuten vorgesehen. Im Simulationsmodell wurde stattdessen ein konstanter Wert von 0,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h) angesetzt. Damit ergibt sich ein mittlerer Luftwechsel von 0,57/h, der mit dem berechneten Luftwechsel im Lüftungskonzept übereinstimmt.

## 4.5 Simulationsergebnisse

### Sommerlicher Komfort

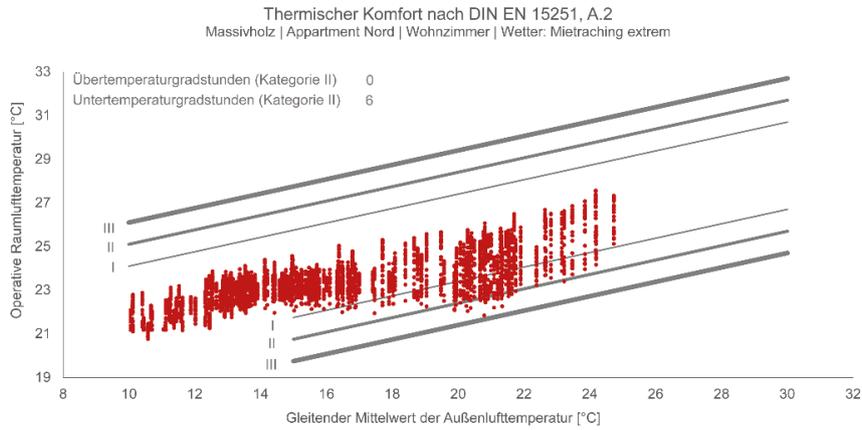
Der sommerliche Komfort wird nach Norm in allen drei Baukonstruktionen und Orientierungen der Räume eingehalten (DIN EN 15251:2012-12.A2). Alle Auswertungen sind dem Anhang zu entnehmen. Als Beispiel wird das Wohnzimmer der 2,5-Wohneinheiten in den Orientierungen Nord-Ost und Süd-Ost für die drei Baukonstruktionen gezeigt.

Auf den Einsatz eines Sonnenschutzes kann aufgrund der Einhaltung des Komforts in der Simulation verzichtet werden. Interessant wird der künftige Vergleich mit den Ergebnissen der Messung in Einfach Bauen 3.



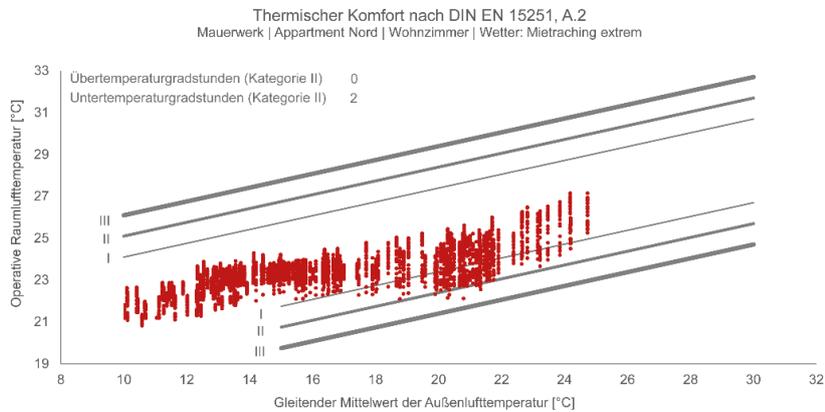
Leichtbeton Nord-Ost

Abbildung 109 Sommerlicher Komfort, Leichtbetonhaus, 2.OG Apartment Nord-Ost, Wohnzimmer



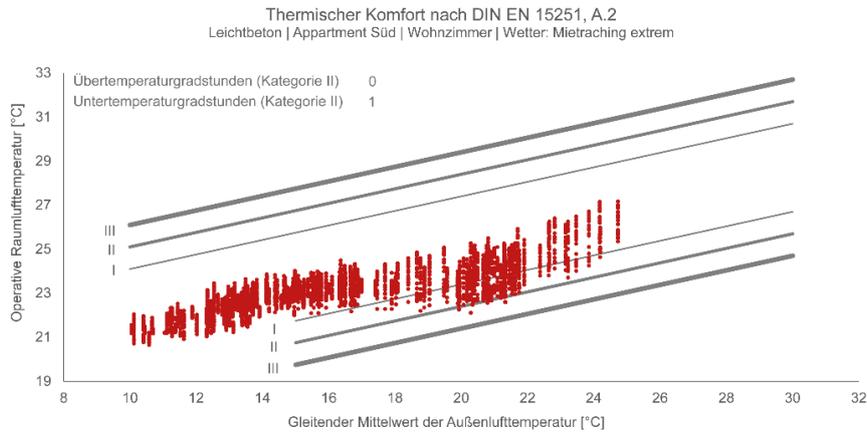
Massivholz Nord-Ost

Abbildung 110 Sommerlicher Komfort, Massivholzhaus, 2.OG Apartment Nord-Ost, Wohnzimmer



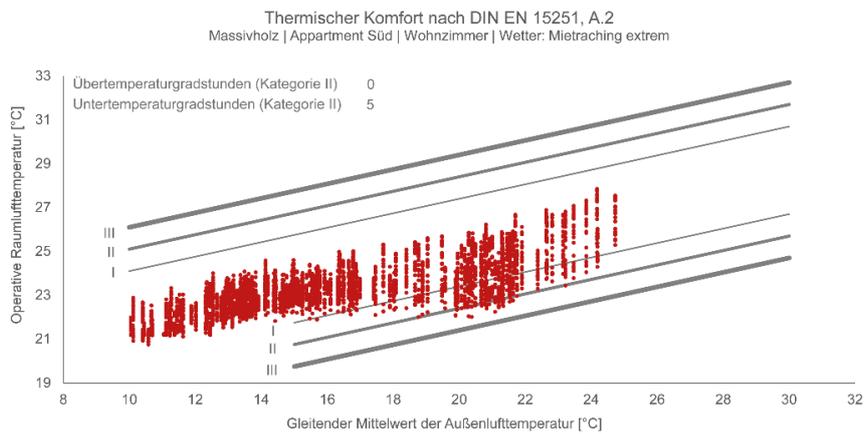
Mauerwerk Nord-Ost

Abbildung 111 Sommerlicher Komfort, Ziegelhaus, 2.OG Apartment Nord-Ost, Wohnzimmer



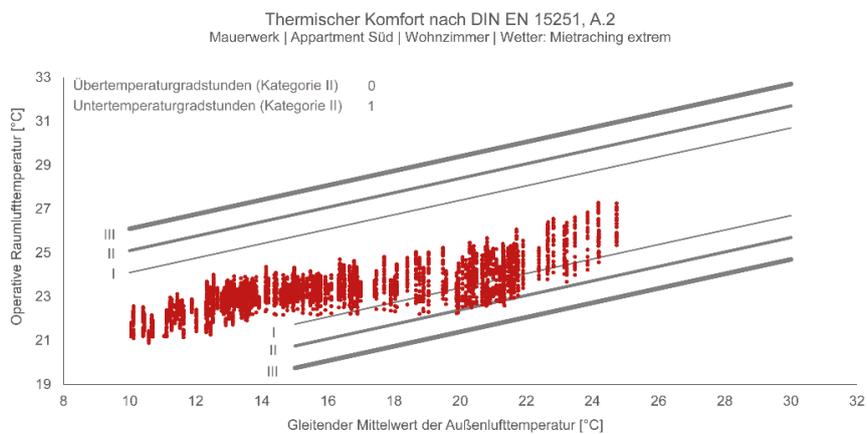
Leichtbeton Süd-Ost

Abbildung 112 Sommerlicher Komfort, Leichtbetonhaus, 2.OG Apartment Süd-Ost, Wohnzimmer



Massivholz Süd-Ost

Abbildung 113 Sommerlicher Komfort, Massivholzhaus, 2.OG Apartment Süd-Ost, Wohnzimmer



Mauerwerk Süd-Ost

Abbildung 114 Sommerlicher Komfort, Ziegelhaus, 2.OG Apartment Süd-Ost, Wohnzimmer

## **Energiebedarf**

Die Ergebnisse der Nutzenergie für Brauchwasser, elektronische Geräte, Kunstlicht, Lüfter und Pumpen liegen im durchschnittlichen Bereich (SIA 2024, 2015). Eher hoch fällt der Heizenergiebedarf aus. Im Leichtbetonhaus beeinflusst hier der aktuell gemessene Wert der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Infraleichtbetons das Ergebnis. Es ist nun die Frage, ob die in der Simulation getroffenen Annahmen (Nutzerverhalten, interne Lasten, etc.) sich in der Realität einstellen werden. Über die Zeit der Messung sollen die Annahmen durch Erfahrungswerte in den Häusern ersetzt werden, um so das Modell validieren zu können.

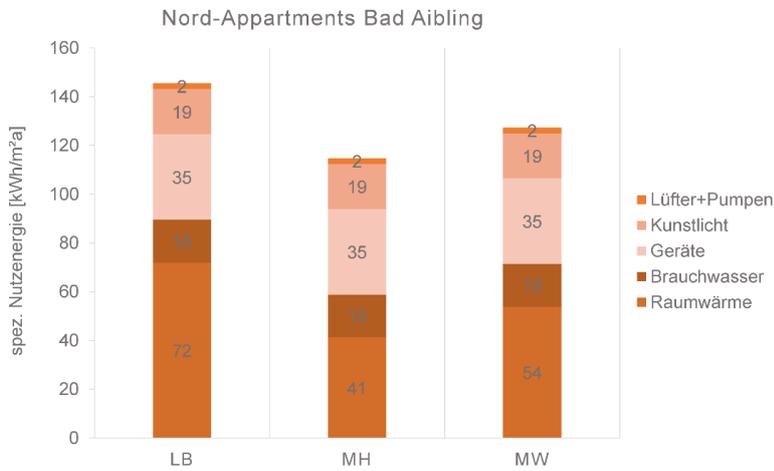


Abbildung 115 Spez. Nutzenergie, Nord-Apartment im 2.OG Leichtbeton, Massivholz, Mauerwerk

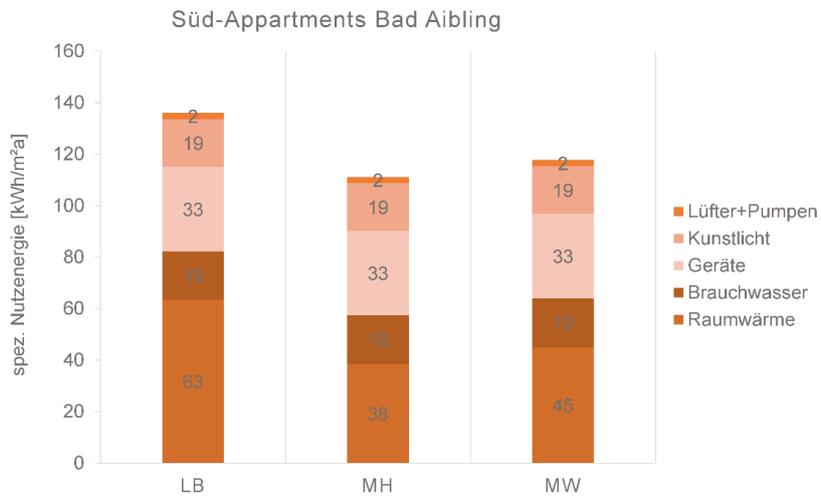


Abbildung 116 Spez. Nutzenergie, Süd-Apartment im 2.OG Leichtbeton, Massivholz, Mauerwerk

## Literaturverzeichnis Kapitel 4

**BBSR (2017).** Ortsgenaue Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Zukunft Bau, BBSR. Bonn.

**Deutscher Wetterdienst (2020).** Testreferenzjahre (TRY). Webseite abgerufen am 02.10.2020  
URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>

**DIN EN 13779:2007.** Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.

**DIN EN 15251:2012-12. A.2.** Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; A.2 Zulässige Innentemperaturen für den Entwurf von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlagen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.

**Einfach Bauen 1 (2018).** Einfach Bauen: Ganzheitliche Strategien für einergieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkungen von Raum, Technik, Material und Konstruktion. Endbericht. Technische Universität München, Zukunft Bau (BBSR). SWD-10.08.18.7-16.29.

**Frenzel, C. und Hiller, M. (2014).** TRNSYSLIZARD - Open Source Tool für Rhinoceros - Grasshopper zur einfachen, schnellen und sicheren Simulation einer Gebäudezone unter Ankopplung von TRNSYS und DAYSIM. 5. IBPSA Konferenz. S. 490-496.

**IEEE 802.11 (2020).** IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee.

**SIA 2024 (2015).** Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik. SNR 592024:2015; SIA 2024. Beuth Verlag. Berlin.

**VDI 6020 (2017).** Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik. Düsseldorf.

## 5 Ökologie und Lebenszykluskosten

MS 4 | Bearbeitung: Zsofia Varga

Ziel der Durchführung einer spezifischen Ökobilanz und einer Lebenszykluskostenanalyse war die Überprüfung, in wie weit die Annahmen aus Einfach Bauen 1 angewendet und in die Praxis umgesetzt werden konnten.

Ziel war es herauszufinden, in wie weit die Hypothese von Einfach Bauen 1 „[...] über den Lebenszyklus von 100 Jahren sind „einfache Bauten“ auch in einer Lebenszyklusanalyse den konventionellen Gebäuden oder Passivhäusern überlegen. Dies betrifft sowohl die Umweltwirkungen im Lebenszyklus als auch die Lebenszykluskosten [...]“ (Nagler et al. 2018, S. 145). eingehalten wurde. Demnach wurden die Ergebnisse von Einfach Bauen 2 mit den Ergebnissen von Einfach Bauen 1 sowie in dem Forschungsprojekt ermittelten Werten für ein Standardgebäude (ST) nach EnEV-Standard 2016 und einem Niedrigenergiegebäude (NE) nach Passivhausstandard gegenübergestellt.

Dazu wurde eine **Ökobilanz** der drei verschiedenen Forschungsgebäude mit demselben Ziel- und Untersuchungsrahmen wie bei Einfach Bauen 1, über den Lebenszyklus von 100 Jahren hinsichtlich Herstellung (A1-A3), Austausch (B4) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C1-C4) erstellt. Voruntersuchung fanden durch eine Bachelorarbeit statt (Brandstetter 2019). Zunächst wurden mittels eines bauteilbasierten Mengenermittlungsansatzes die Mengen über die Bauteilflächen ermittelt und mit Datensätzen verknüpft. Dazu wurden die Datensätze der ÖKOBAUDAT 2019-III (29.05.2019) mit Durchschnittsdatsätzen für Deutschland verwendet. Die Umweltwirkungen wurden anschließend auf einen Lebenszyklus von 100 Jahren hochgerechnet und auf eine Nutzfläche von 1qm bezogen. Untersucht wurden dabei der Input an Ressourcen hinsichtlich Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar, sowie die schädlichen Umweltwirkungen GWP. Die Werte wurden, soweit vorhanden, mit den Werten aus den Annahmen aus Einfach Bauen 1 verglichen. So konnte überprüft werden in wie weit die Hypothesen von Einfach Bauen 1 mit der Verwirklichung in der Praxis übereinstimmen. Folgende Normen wurden bei der Untersuchung verwendet: DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044, DIN EN 15 978 und DIN EN15804.

Bei der **Lebenszykluskostenanalyse** wurden die Kosten der drei verschiedenen Forschungshäuser über einen Lebenszykluszeitraum von 100 Jahren ermittelt, um eine Aussage über die entstehenden Kosten zu treffen und zugleich eine Grundlage für einen Vergleich zwischen den verschiedenen Bauweisen sowie den Bauweisen aus EB1 zu schaffen.

Die Herstellungskosten wurden von der B&O Gruppe, B&O Bauholding GmbH bereitgestellt; die Instandhaltungs- und Abbruchkosten wurden der Baukostentabelle BKI Gebäude Neubau und Altbau entnommen und mit den Massen aus der vorhergehenden Massenermittlung verknüpft.

Die Kapitalwertmethode nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) Referat Bauingenieurwesen, Nachhaltiges

Bauen, Bauforschung 2015) wurde zur Kostenermittlung herangezogen. Um eine Vergleichbarkeit mit den Werten aus Einfach Bauen 1 herzustellen wurden die Werte auf 1qm Nutzfläche bezogen.

Um einen direkten Vergleich zu den tatsächlich erbauten Referenzgebäuden zu schaffen, wurden zusätzlich die Herstellungskosten mit den Kosten für Referenzgebäude verglichen. Die Kosten der Referenzgebäude stammen aus dem aktuellen BKI Baukosten 2020 Neubau Teil 1, statistische Kennwerte für Gebäude, dem verschiedene Objekte zu jeder Gebäudeart zu entnehmen sind (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH 2020, S. 39). Die Kosten beziehen sich jeweils auf die Gesamtkosten der KG 300 und 400; eine differenzierte Darstellung der Gewerke ist nicht gegeben. Den Gebäuden sind Bauweise, Standard, Nutzung, Anzahl der Wohneinheiten, Bruttogrundfläche, Nutzfläche sowie Region zugeordnet.

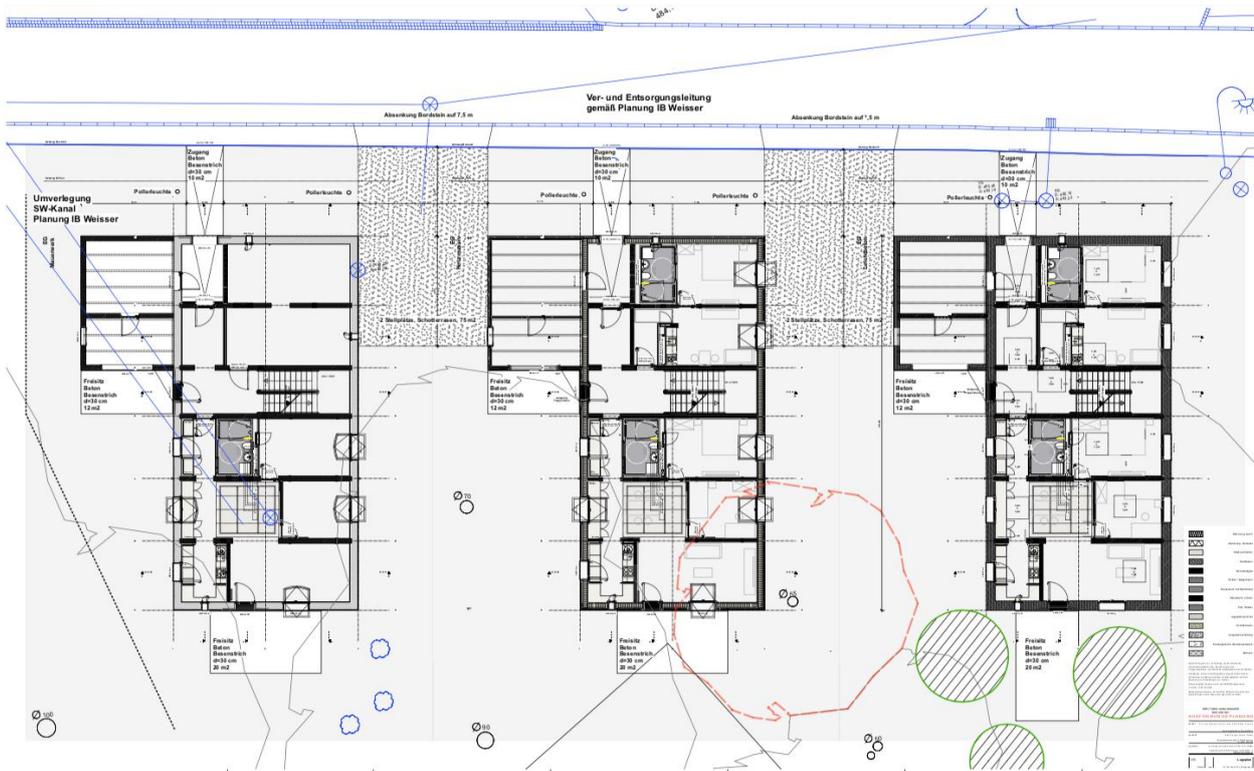


Abbildung 117: Lageplan Drei Forschungshäuser Bad Aibling: Gebäudearten Mauerwerk, Massivholz, Leichtbeton (von links nach rechts)

## 5.1 Ökobilanzierung der drei Forschungsgebäude Bad Aibling

### Definition Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel- und Untersuchungsrahmen mit Systembeschreibung

- Anwendung und Überprüfung der Erkenntnisse aus der LCA/LCC aus Einfach Bauen 1; demnach liegen die Werte der Einfach Bauen Gebäude hinsichtlich LCA/LCC deutlich unter dem von Standardgebäuden
- drei unterschiedliche Gebäudetypen Mauerwerk, Massivholz, Leichtbeton über den Lebenszyklus von 100 Jahren
- Errechneter Primärenergieaufwand Herstellung (A1-A3), Austausch (B4) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C1-C4)
- Errechneter GWP Beitrag Herstellung (A1-A3), Austausch (B4) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C1-C4)
- Unterschiede Gebäude in der Zusammensetzung der Außenwände
- Unterschiede Gebäude in der Zusammensetzung der Innenwände

## Sachbilanz und Inventar

### Sachbilanzdaten Kurzfassung

- Input an Materialmengen bezogen auf jeweils 1 m<sup>2</sup> Nutzfläche als wesentliche Basisgröße für die Bauteilbetrachtung
- Massenermittlung erfolgte auf Grundlage der Grundrisse und Schnitte der Mauerwerks-, Massivholz- und Leichtbetongebäude
- Annahme der vollständigen 100 Jahren Lebensdauer für monolithische Tragkonstruktionen ohne Austausch
- Nutzungsdauern der Bauteile wurden anhand des Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) ermittelt (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat 2017.)
- Zusammenfassung der Phasen A1-3 (Herstellung), B4 (Instandsetzung) und C1-4 (Entsorgung)
- Bilanzierungsweise ÖKOBAUDAT 2019-III (29.05.2019)
- Methode: DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044, DIN EN 15 978, DIN EN15804

## 5.2 Ergebnisse LCA der drei Forschungsgebäude

Zunächst wurden die Bauteile der verschiedenen Forschungsgebäude hinsichtlich ihres GWP-Wertes miteinander verglichen. Den größten Teil machten die Außenwände bzw. die Decken aus, gefolgt von Dach, Bodenplatte/Unterbau und Innenwände. Die Bauteile der drei Gebäude unterschieden sich hauptsächlich hinsichtlich ihrer Innen- und Außenwände. Dies zeigte sich auch an den GWP-Werten der Bauteile. (Abbildung 119) Vergleicht man die einzelnen Bauteile der drei Forschungsgebäude miteinander, lag der größte Unterschied im Bereich GWP zwischen den Außenwänden. Die Innenwände sind ähnlich; die restlichen Bauteile fast gleich.

## Treibhauspotential (GWP)

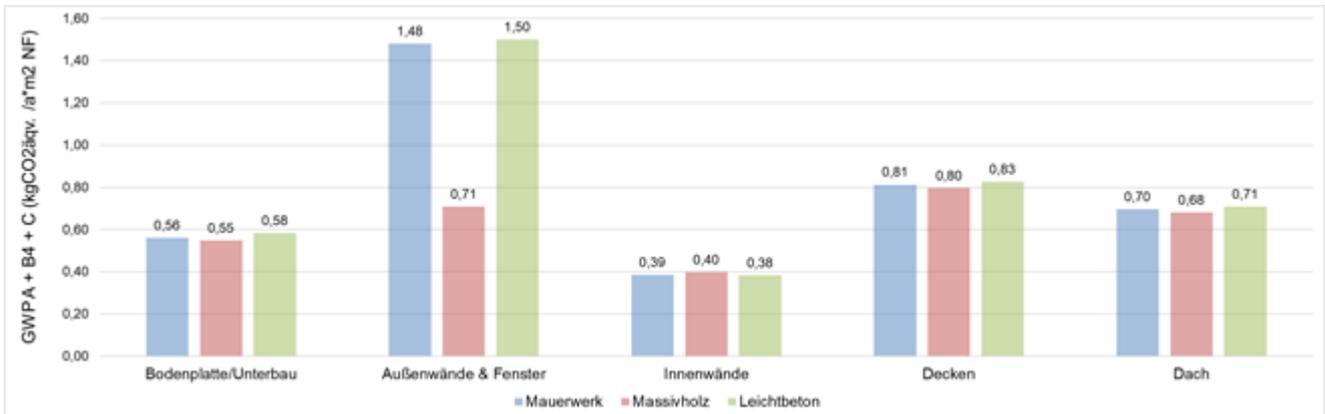


Abbildung 118: GWP (A+B4+C) aller drei Forschungsgebäude nach Bauteilgruppen

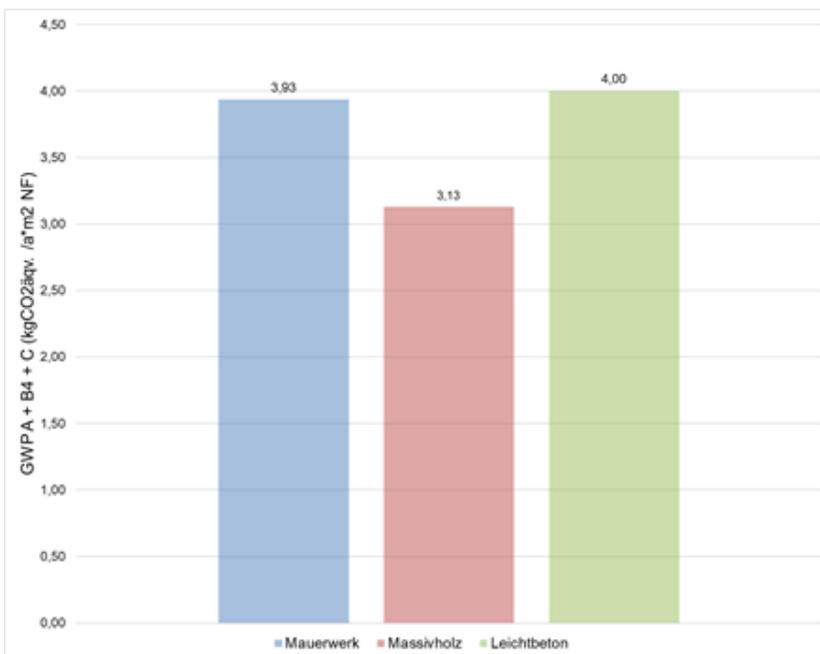


Abbildung 119: GWP (A+B4+C) aller drei Forschungsgebäude

Den höchsten GWP-Wert über den Lebenszyklus (A1-3, B4, C1-4) erzielte das Leichtbetongebäude, den niedrigsten das Massivholzgebäude. Das Mauerwerksgebäude lag im mittleren Bereich. (Abbildung 120)

Leichtbeton enthält viele mineralische Zuschlagstoffe, die zu höheren Festigkeiten führen und für bessere Dämmeigenschaften sorgen. Diese machten den um 27,8 % höheren CO<sub>2</sub>-Werte des Leichtbetongebäudes im Vergleich zum Massivholzgebäude aus.

Der GWP-Werte des Mauerwerksgebäudes war um 25,6% höher, als der des Massivholzgebäudes und um 1,8% niedriger als der des Leichtbetongebäudes.

### Primärenergieaufwand erneuerbar (PERE) und nicht erneuerbar (PENRE)

Auch wurde der Primärenergieaufwand erneuerbar (PERE) und nicht erneuerbar (PENRE) für die Prozesse der Herstellung, Austausch und Entsorgung (A1-3+B4+C1-4) ermittelt. (Abbildung 121) Im Bereich der erneuerbaren Energien (PERE) erzielte das Massivholzgebäude die höchsten Werte, gefolgt vom Mauerwerks- und Leichtbetongebäude. Im Bereich der nicht erneuerbaren Energien (PENRE) wies das Mauerwerksgebäude die höchsten Werte auf, das Massivholzgebäude die niedrigsten. Dazwischen lag das Leichtbetongebäude.

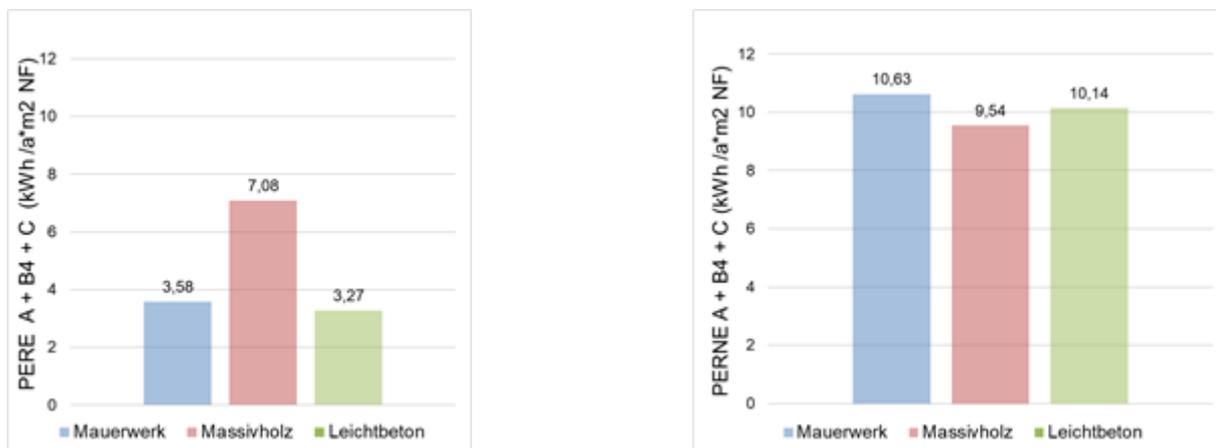


Abbildung 120: PERE (links) und PENRE (rechts) aller drei Forschungsgebäude

Das Mauerwerksgebäude erzielte im Vergleich zum Leichtbetongebäude im Bereich der nicht erneuerbaren Energien (PENRE) einen um 4,8% niedrigeren Wert. Im Bereich der erneuerbaren Energien übertraf das Massivholzgebäude ca. um 100% die anderen zwei Forschungsgebäude. Für Herstellung, Austausch und Entsorgung des Baustoffes Holz wurde ein doppelt so hoher Anteil an erneuerbaren Energien verwendet, als für Herstellung, Austausch und Entsorgung der anderen Forschungsgebäude.

### Vergleich Bilanzierung Einfach Bauen 2 mit Einfach Bauen 1

Im Folgenden wurden die GWP-Werte der drei verschiedenen Forschungsgebäude von Einfach Bauen 2 (Abbildung 5) mit den Hybridvarianten, Solitär GK3 von Einfach Bauen 1 (Abbildung 122) sowie der dort angenommenem Standardgebäude (ST) nach EnEV-Standard 2016 verglichen.

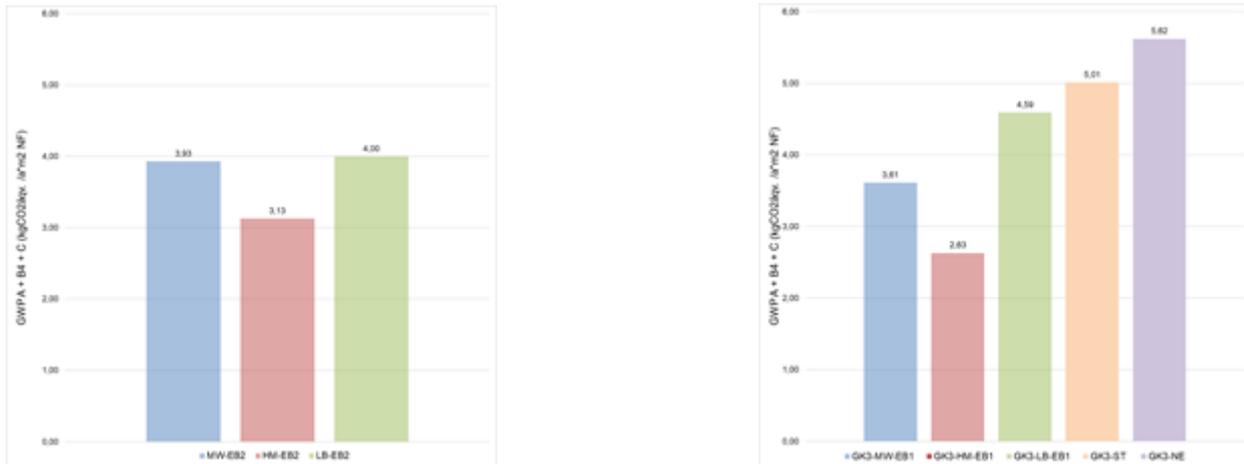


Abbildung 121: GWP (A+B4+C): EB2 aller drei Forschungsgebäude (links), GWP (A+B4+C): EB1 aller drei Gebäudevarianten (rechts)

Den höchsten GWP-Wert erzielte das Niedrigenergiehaus von Einfach Bauen 1 (EB1), den niedrigsten das Massivholzgebäude von Einfach Bauen 1 (EB1). Das Mauerwerksgebäude (EB2) zeigte einen um 8,9% höheren Wert im Vergleich zu Einfach Bauen 1 (EB1) auf. Dies ist auf die höheren Außenwanddicken des Mauerwerks zurückzuführen. Die Werte des Holzmassivgebäudes von Einfach Bauen 2 (EB2) erhöhen sich, auf Grund der Änderung der Innenwandaufbauten, um 19,0%. Die GWP-Werte des Leichtbetongebäudes von EB2 fielen auf Grund einer geringeren Außenwanddicke, sowie der Verwendung eines anderen Datensatzes, der genauer die Zusammensetzung des Leichtbetons abbildet, um 14,8% geringer aus.

Insgesamt erzielten alle drei Forschungshäuser niedrigere GWP-Werte, als das in Einfach Bauen 1 ermittelten Werte de Niedrigenergie (NE)- und Standardgebäude (ST).

### Schlussfolgerung

Die Hypothese von Einfach Bauen 1, dass „einfach Bauweisen“ hinsichtlich ihrer Umweltwirkung -niedrigere GWP-Werte als konventionelle Gebäude und Passivhäuser erzielen, wurde demnach auch bei den drei Forschungshäusern in Bad Aibling nachgewiesen.

Verglichen zu dem Standardgebäude (ST) mit einem Treibhauspotential (GWP) von 5,01 kgCO<sub>2</sub>äqv/a\*m<sup>2</sup> NF hatte das Mauerwerksgebäude mit 3,93 kgCO<sub>2</sub>äqv/a\*m<sup>2</sup> NF einen um 22%, das Holzmassivgebäude (GWP= 3,13 kgCO<sub>2</sub>äqv/a\*m<sup>2</sup> NF) einen um 38% und das Leichtbetongebäude (GWP= 4,00 kgCO<sub>2</sub>äqv/a\*m<sup>2</sup> NF) einen um 20% geringeren GWP-Wert.

### 5.3 Ökobilanzierung Prozesse A4&A5

Im Forschungsprojekt Einfach Bauen 1 wurden die Lebenszyklusphasen Transport (A4) und Prozessphase (A5) wegen wenig gesicherter Daten über die Errichtungsphase ausgeschlossen. (Nagler et al. 2018, S. 62) Im Folgenden wurden die Prozesse A4 und A5 der Leichtbeton- und Holzmassivgebäude aufgenommen und ausgewertet. Das Mauerwerksgebäude wurde außer Acht gelassen, da es keine besonderen Unterschiede bei der Ausführung, im Vergleich zur konventionellen Bauweise, gab.

Da sich die drei Forschungsgebäude im Wesentlichen in der wärmetauschenden Hülle unterschieden, wurde die Errichtung (A5) sowie der Transport der Baustoffe (A4) der Außenwände des Leichtbeton- und Massivholzgebäudes untersucht. Dazu zählten Aufnahmeleistung und Laufzeit der Maschinen, sowie der Verbrauch der Transportfahrzeuge.

### **Definition Ziel und Untersuchungsrahmen**

Um Daten bezüglich der Transportprozesse zur Baustelle A4 und den Einbau der Bauteile auf der Baustelle A5 zu generieren, wurden zusätzlich die Prozesse A4 und A5 des Leichtbeton- und Massivholzgebäudes der Außenwände aufgenommen und untersucht.

Dazu wurde zunächst eine Befragung der Vorarbeiter der ausführenden Gewerke über Dauer, Ausführung und Maschinenbedarf der Arbeitsprozesse beim Einbau/ Errichtung der Außenwände sowie dem Transport der Materialien zur Baustelle durchgeführt. Anschließend wurden die Prozesse hinsichtlich Energie- und Treibstoffverbrauch mit den Umweltwirkungen GWP, PERE und PENRE der ÖKOBAUDAT 2019-III (29.05.2019) verknüpft. Die Umweltwirkungen wurden auf die Lebensdauer von 100 Jahren hochgerechnet und anschließend auf 1qm Nutzfläche bezogen. Es wurde die Methode nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044, DIN EN 15 978 und DIN EN15804 angewandt. Die Untersuchungen fanden durch studentische Arbeiten statt.

#### Ziel- und Untersuchungsrahmen mit Systembeschreibung

- Erfassung der Transport- (A4) und Errichtungsprozesse (A5) der Außenwände der Forschungsgebäude Leichtbeton und Massivholz
- Zwei unterschiedliche Gebäudetypen Massivholz und Leichtbeton über den Lebenszyklus von 100 Jahren
- Errechneter Primärenergieaufwand Transport (A4) und Errichtung/Einbau (A5)
- Errechneter GWP Beitrag Transport (A4) und Errichtung/Einbau (A5)
- Unterschiede Gebäude in der Zusammensetzung der Außenwände

### **Sachbilanz und Inventar**

#### Sachbilanzdaten Kurzfassung

- Input an Materialmengen bezogen auf jeweils 1 m<sup>2</sup> Nutzfläche als wesentliche Basisgröße für Bauteilbetrachtung
- Massenermittlung erfolgte auf Grundlage der Grundrisse und Schnitte der Mauerwerks-, Massivholz- und Leichtbetongebäude
- Input an Energieverbrauch der Maschinen und Fahrzeuge, verknüpft mit den einzelnen Arbeitsschritten und Datensätzen zur Umweltwirkung bezogen auf jeweils 1 m<sup>2</sup> Nutzfläche als wesentliche Basisgröße für Bauteilbetrachtung
- Betrachtung der Phasen Transport (A4) und Errichtung/Einbau (A5)

- Annahme der vollständigen 100 Jahren Lebensdauer für Tragkonstruktionen ohne Austausch
- Bilanzierungsweise ÖKOBAUDAT 2019-III (29.05.2019)
- Methode: DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044, DIN EN 15 978, DIN EN15804
- 

## Leichtbetongebäude Prozesse A4&A5

### Betoniervorgang Außenwand Leichtbeton

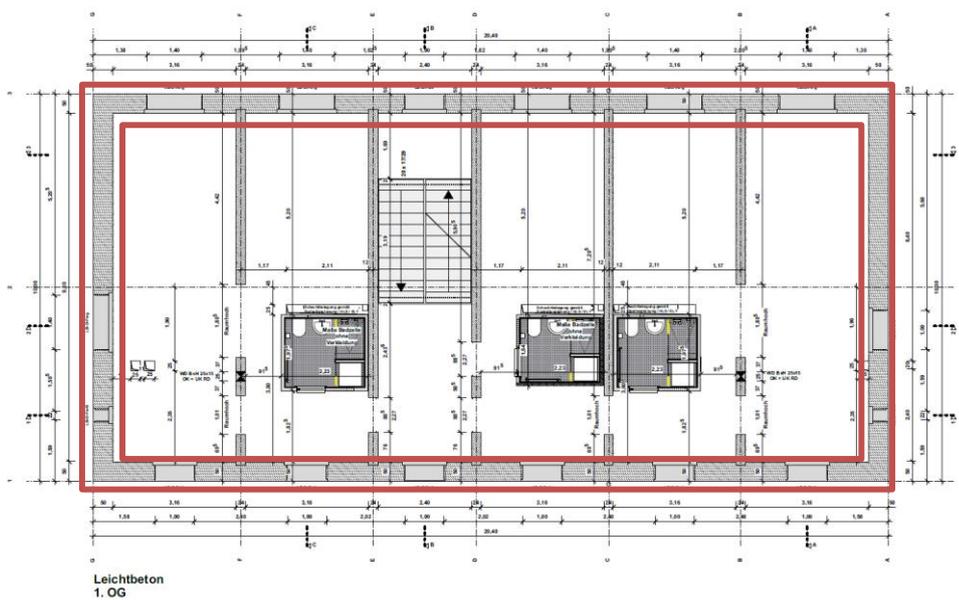


Abbildung 122: Leichtbetongebäude Grundriss 1. OG

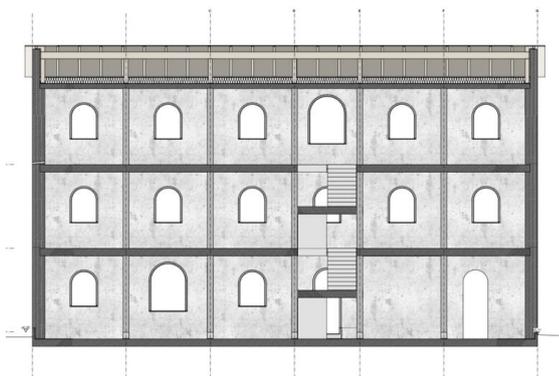


Abbildung 123: Leichtbetongebäude Schnitt 3

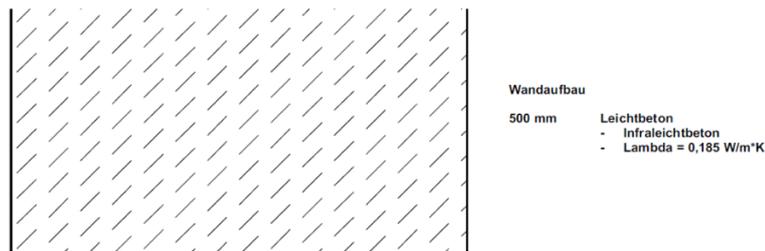


Abbildung 124: Leichtbetongebäude Außenwandaufbau

Bei dem Leichtbetongebäude wurde der Betoniervorgang der Außenwände untersucht und aufgenommen. Der Unterschied des Leichtbetons lag im Vergleich zu Normalbeton in der Materialzusammensetzung. Leichtbeton besteht aus leichter Gesteinskörnung, Zement und Zusatzstoffen wie Flugasche und Silikasuspension. Er kann geringere Rohdichten als Normalbeton unter 800kg/m<sup>3</sup> erreichen. (Callsen und Thienel 2017)

Um die Prozessdaten für die Errichtung (A5) sowie den Transport der Baustoffe (A4) der Außenwände zu erhalten, wurden die Vorarbeiter der ausführenden Gewerke befragt und die Prozesse anschließend mit den Umweltwirkungen verknüpft.

### Prozessesequenz

Beim Material Leichtbeton ist die dünnflüssige Konsistenz des Materials anzumerken. Um Leckagen in der Schalung und folglich einen Austritt des Betons zu vermeiden, mussten die Schalungselemente besonders dicht ausgeführt werden. Dies wurde durch Dichtungsbänder zwischen den Schalungselementen und Dichtungsbändern zwischen den Decken und den Schalungen erreicht.

Im Vergleich zu konventionellen Betonierarbeiten war die Ausschalzeit geringer, da auch keine Bewehrung eingelegt werden musste. Die Schalung musste nur beidseitig aufgestellt und verschlossen werden. Dadurch konnte der Herstellungsprozess beschleunigt werden. Der Beton selber wurde mit Hilfe des Baustellenkranes und Betonkübeln vergossen. Anschließend wurde er mit dem Innenrüttler verdichtet.

Auf Grund der besonderen Fließeigenschaft des Leichtbetons konnte ein Verlust von durchschnittlich 33% durch Rückstände im Mischlader festgestellt werden. (Slosharek 2019)

### Ergebnisse LCA des Leichtbetongebäudes

Der Betonierprozess war wie folgt: Der Leichtbeton wurde mit Lastfahrzeugen auf die Baustelle transportiert und durch Manpower, Maschinen und Hilfsmaterial zu der fertigen Außenwand verarbeitet. Die wichtigsten Kenngrößen waren der Kraftstoffverbrauch durch den Transport, sowie die verwendete Energie beim Maschineneinsatz. Nach Ermittlung der Kenngrößen wurden die einzelnen Arbeitsschritte mit den Daten der Umweltwirkung verknüpft, um die Kenngrößen

Treibhauspotential (GWP), Primärenergien nicht erneuerbar (PENRE) und Primärenergien erneuerbar (PERE) zu erhalten. (Abbildung 126)

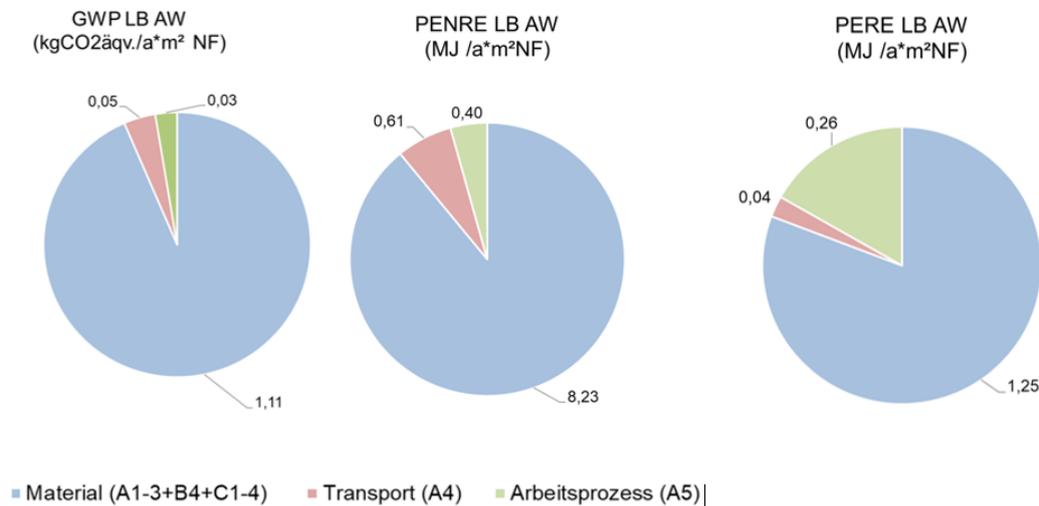


Abbildung 125: Umweltwirkungen bei durchschnittlichen Aufwendungen, Leichtbetongebäude Außenwand

### GWP

Verglichen mit den Transport- (A4) und Arbeitsprozessen (A5) machten die Erstellung (A1-3), Austausch (B4) sowie die Entsorgung (C1-4) 93,3% aus. Der Transport hatte einen Anteil von 4,2%, der Arbeitsprozess (A5) einen von 2,5%. (Abbildung 126) Den größten Einfluss auf das System hatten die Entfernung vom Betonwerk, sowie die Kranlaufzeit, die zum Aufstellen der Schalung benötigt wurde.

Um den Einfluss der Entfernung und der Kranlaufzeit zu bewerten, wurden minimale und maximale Entfernungen und Kranlaufzeiten untersucht. Wieder lagen Transport (A4) und Arbeitsprozesse (A5) im einstelligen Prozentbereich. Den größten Teil machte die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) und die Entsorgungsphase (C1-4) mit min. über 90% aus.

### PENRE

Bei den Primärenergien nicht erneuerbar machten der Transport (A4) 6,6 % und der Arbeitsprozess (A5) 4,3% aus. Die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) und die Entsorgungsphase (C1-4) lagen bei 89,1%. Die Verhältnisse des PENRE waren ähnlich zu dem des GWP.

### PERE

Bei den Primärenergien erneuerbar machten Transport (A4) 2,6%, Arbeitsprozess (A5) 16,8%, Herstellungsphase (A1-3), Austausch (B4) und Entsorgungsphase (C1-4) 80,6% aus.

Der Arbeitsprozess (A5) lag mit 16,8% höher, als bei den Umweltwirkungen zuvor, was auf den Anteil an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix 2018 zurückzuführen ist.

### Schlussfolgerung

Verglichen mit der Herstellungsphase (A1-3), dem Austausch (B4) und der Entsorgungsphase (C1-4) des Materials, sind Transport (A4) und Errichtung (A5) zweitrangig.

Die Umweltwirkungen GWP, PERE und PENRE der Errichtung (A1-3), Austausch (B4) und Entsorgung (C1-4) machten immer den Großteil aus lagen zwischen 81-93%; der Transport (A4) zwischen 3-7% und die Arbeitsprozesse (A5) 3-17%. Im Bereich des Treibhauspotentials (GWP) lagen die Phasen (A1-3), (B4) und (C1-4) bei 1,11 kgCO<sub>2</sub>äqv/a\*m<sup>2</sup>NF; der Transport (A4) zeichnete sich mit 0,05 kgCO<sub>2</sub>äqv/a\*m<sup>2</sup>NF und die Arbeitsprozesse (A5) 0,03 kgCO<sub>2</sub>äqv/a\*m<sup>2</sup>NF ab.

## Massivholzgebäude Prozesse A4&A5

### Aufstellen Außenwand Massivholz

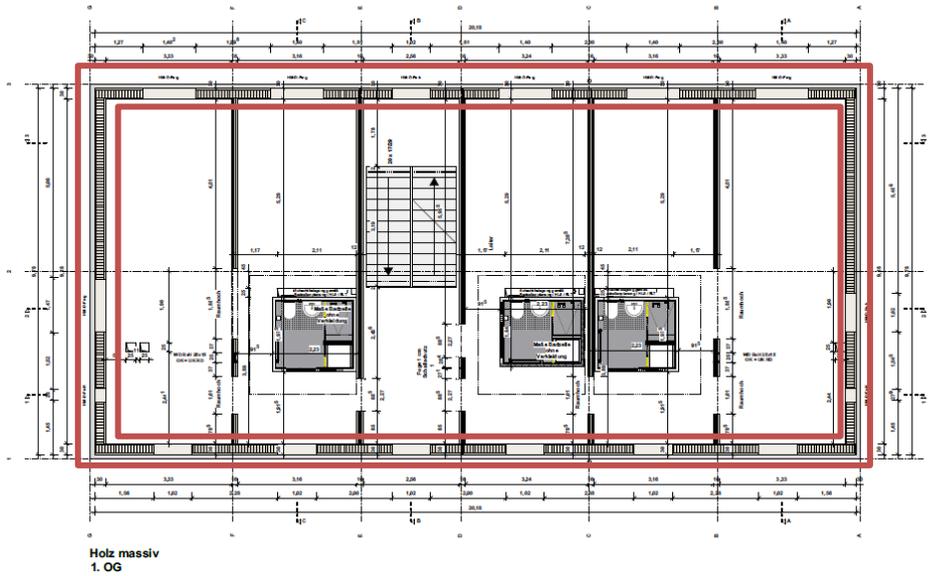


Abbildung 126: Holzmassivgebäude Grundriss 1. OG

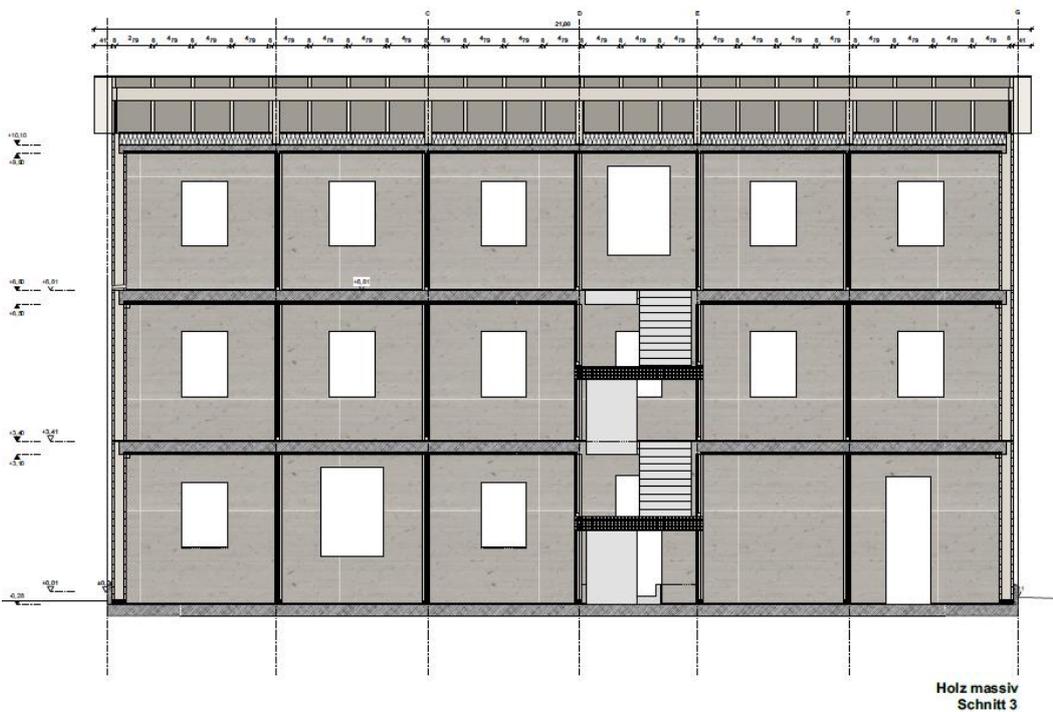


Abbildung 127: Holzmassivgebäude Schnitt 3

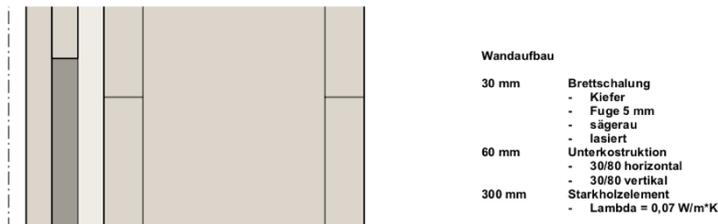


Abbildung 128: Holzmassivgebäude Außenwandaufbau

Der größte Unterschied des Massivholzgebäudes im Vergleich zum konventionellen Holzbau war die wärmeisolierende Dämmwirkung der Außenwand, die eine zusätzliche Dämmung nicht mehr notwendig machte. Die Außenwand bestand aus Brettsperrholz aus Nadelholz, sowie Einzellagen, die senkrecht aufeinander verklebt waren. Die Mittellage war mit Nuten versehen. Zum Wetterschutz der Außenwand wurde zusätzlich eine Lärchenholzschalung mit Unterkonstruktion aufgebracht. (Abbildung 129)

### Ergebnisse LCA des Massivholzgebäudes

Die Massivholzaußenwände wurden wie folgt aufgestellt: Die vorgefertigten Außenwände wurden mit Lastfahrzeugen auf die Baustelle transportiert und durch Manpower, Maschinen und Hilfsmaterial zu der fertigen Außenwand zusammengefügt. Die wichtigsten Kenngrößen waren, wie beim Leichtbetongebäude auch, der Kraftstoffverbrauch durch den Transport, sowie die verwendete Energie beim Maschineneinsatz. Nach Ermittlung der Kenngrößen wurden die einzelnen Arbeitsschritte mit den Daten der Umweltwirkungen verknüpft, um die Kenngrößen Treibhauspotential (GWP), Primärenergien nicht erneuerbar (PENRE) und Primärenergien erneuerbar (PERE) zu erhalten. (Abbildung 130) (Kilinc 2020)

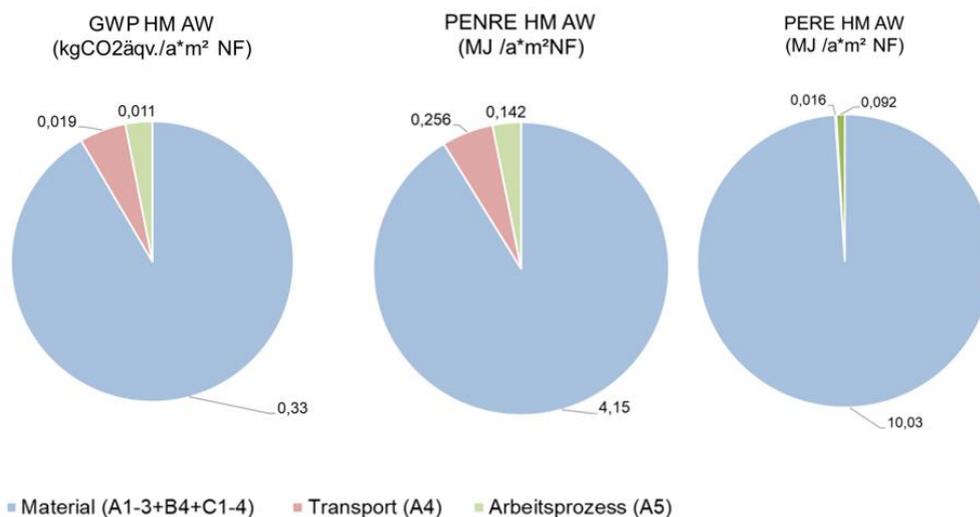


Abbildung 129: Umweltwirkungen bei durchschnittlichen Aufwendungen, Massivholzgebäude Außenwand

### **GWP**

Verglichen mit dem Transport- (A4) und Arbeitsprozessen (A5) machten die Erstellung (A1-3), Austausch (B4) sowie die Entsorgung (C1-4) 91,7% aus. Der Transport hatte einen Anteil von 5,3%, der Arbeitsprozess (A5) einen von 3,1%.

Bei minimalen und maximalen Entfernungen für den Transport, sowie minimalen und maximalen Kranlaufzeiten, lagen Transport (A4) und Arbeitsprozesse (A5) im einstelligen Prozentbereich. Den größten Anteil des GWP-Wertes machte, wie auch bei der Leichtbetonaußenwand zuvor, wieder die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) und die Entsorgungsphase (C1-4) min. über 90% aus.

### **PENRE**

Bei den Primärenergien nicht erneuerbar machten der Transport (A4) 5,6%, der Arbeitsprozess 3,1% aus. Die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) und die Entsorgungsphase (C1-4) lagen bei 91,2%.

Auch hier waren die Verhältnisse, wie auch zuvor beim Leichtbetongebäude, ähnlich zu dem des GWP-Wertes.

### **PERE**

Bei den Primärenergien erneuerbar machten Transport (A4) 0,2%, Arbeitsprozess (A5) 0,9%, Herstellungsphase (A1-3), Austausch (B4) und Entsorgungsphase (C1-4) 98,9% aus. Die Werte sind auf den Anteil an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix 2018 zurückzuführen.

## **Schlussfolgerung**

Wie auch bei der Außenwand des Leichtbetongebäude waren die Transporte (A4) und die Errichtung (A5), verglichen mit den Phasen des Materials (A1-3, B4, C1-4), zweitrangig.

### **Vergleich Leichtbetongebäude mit Massivholzgebäude**

Die Außenwände des Leichtbetongebäudes wurden vor Ort gefertigt, die des Massivholzgebäudes vorgefertigt auf der Baustelle zusammengefügt.

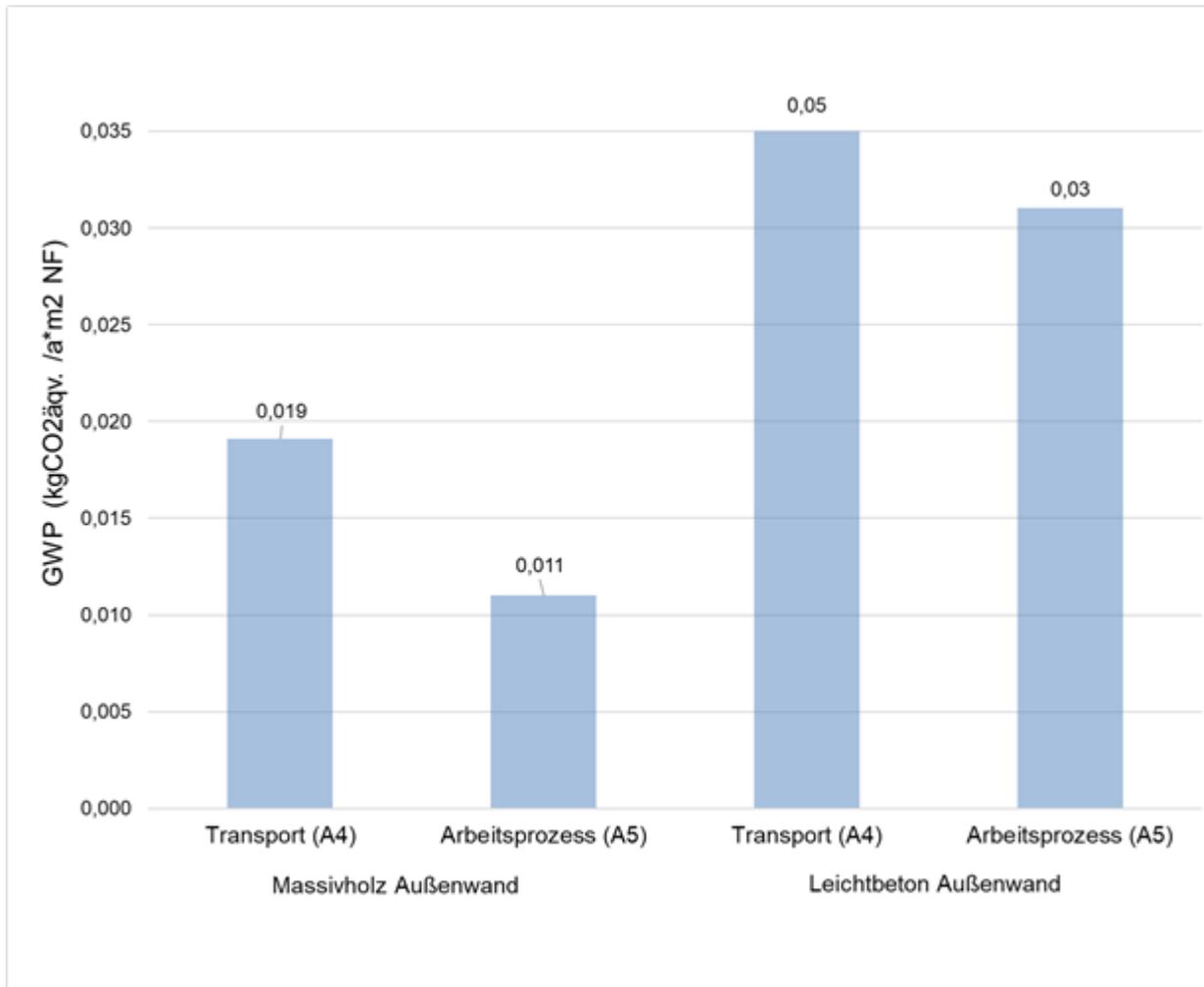


Abbildung 130: Vergleich GWP A4 und A5 Massivholzgebäude und Leichtbetongebäude Außenwand

Den höchsten GWP-Wert machte der Transport (A4) der Leichtbetonaußenwand aus, gefolgt vom Arbeitsprozess (A5) der Leichtbetonaußenwand über den Transport (A4) der Massivholzaußenwand. Den niedrigsten Wert hatte der Arbeitsprozess (A5) der Massivholzaußenwand.

Der GWP-Wert des Transportes (A4) der Leichtbetonaußenwand war auf Grund der zu transportierenden Masse und Anzahl der Fahrten um 170% höher, als der der Außenwände des Massivholzgebäudes. Da bei der Fertigung der Leichtbetonwand mehr Arbeitsschritte mit Maschineneinsatz wie Innenrüttler und Kran als bei der Fertigung der Massivholzwände erforderlich waren, wies dieser einen mehr als doppelt so hohen GWP-Wert auf. (Abbildung 131)

## 5.4 Lebenszykluskostenanalyse drei Forschungsgebäude Bad Aibling

### Definition Ziel und Untersuchungsrahmen

#### Ziel- und Untersuchungsrahmen mit Systembeschreibung

- Anwendung und Überprüfung der Erkenntnisse aus der LCC aus Einfach Bauen 1; demnach liegen die Werte der Einfach Bauen Gebäude hinsichtlich LCA/LCC deutlich unter dem von Standardgebäuden
- drei unterschiedliche Gebäudetypen Mauerwerk, Massivholz, Leichtbeton über den Lebenszyklus von 100 Jahren
- Unterschiede Gebäude in der Zusammensetzung der Außenwände
- Unterschiede Gebäude in der Zusammensetzung der Innenwände
- Errechnete Kosten für Herstellung und Betrieb aus den verwendeten Stoffen (A-C) und aus dem Energiebedarf im Betrieb (B6)
- Verhältnis von Herstellung der Konstruktion und Haustechnik

### Sachbilanz und Inventar

#### Sachbilanzdaten Kurzfassung

- Input an Materialmengen bezogen auf jeweils 1 m<sup>2</sup> Nutzfläche als wesentliche Basisgröße für die Bauteilbetrachtung
- Massenermittlung erfolgte auf Grundlage der Grundrisse und Schnitte der Mauerwerks-, Massivholz- und Leichtbetongebäude
- Annahme der vollständigen 100 Jahren Lebensdauer für monolithische Tragkonstruktionen ohne Austausch
- Nutzungsdauern der Bauteile und der TGA wurden Anhand des Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) ermittelt (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat 2017.)
- Für die Instandhaltungs- und für die Entsorgungskosten der Bauteile wurden die Kostenkennwerte der BKI herangezogen (Fetzer et al. 2020b) (Fetzer et al. 2020a)
- Für die Herstellungskosten wurden die realen Kosten verwendet
- Zusammenfassung der Phasen A1-3 (Herstellung), B4 (Instandsetzung), B6 (Betrieb) und C1-4 (Entsorgung)

Bei der Lebenszykluskostenanalyse wurden die Kosten der drei verschiedenen Forschungshäuser über einen Lebenszykluszeitraum von 100 Jahren ermittelt, um eine Aussage über die entstehenden Kosten zu treffen und zugleich eine Grundlage für einen Vergleich zwischen den verschiedenen Bauweisen sowie den Bauweisen aus EB1 zu schaffen.

Ziel war es herauszufinden, ob die Aussage „[...] über den Lebenszyklus von 100 Jahren sind „einfache Bauten“ auch in einer Lebenszyklusanalyse den konventionellen Gebäuden oder Passivhäusern überlegen. Dies betrifft sowohl die Umweltwirkungen im Lebenszyklus als auch die

Lebenszykluskosten [...]“ (Nagler et al. 2018, S. 145). auch auf die Lebenszykluskosten der Gebäude von Einfach Bauen 2 zutrifft.

Um einen direkten Vergleich der Lebenszykluskosten (LCC) der drei Forschungsgebäude zu erhalten, wurden die Kosten der Bauteile, TGA und der spezifischen Nutzenergie über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren der jeweiligen Gebäudevarianten betrachtet. Die Kosten wurden mittels der Kapitalwertmethode nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) ermittelt. (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) Referat Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung 2015) Dazu wurde der kalkulatorische Zinssatz mit 1,5% angenommen; die Inflation und Energiepreissteigerung wurden mit 4% angesetzt.

Zu Ermittlung der Kosten wurden die Herstellungskosten von der B&O Gruppe, B&O Bauholding GmbH zur Verfügung gestellt, die Instandhaltungs- und Abbruchkosten basieren auf der Baukostentabelle BKI Gebäude Neubau und Altbau. (Fetzer et al. 2020b; Fetzer et al. 2020a)

### Bauteile und TGA

Um einen Vergleich mit EB1 schaffen zu können, wurden in die Sachbilanz alle relevanten Rohbauteile wie Dach, Innenwand, Stützen, Decke, Fundament sowie die Gebäudehülle mit Fassade, Außenwand, Fenster, Außentüren, Bodenplatte und die Trockenbauwände der Badzellen aufgenommen. Bei der Technischen Gebäudeausstattung (TGA) wurden die Heizung, Lüftung- und Sanitäreinrichtungen betrachtet. Im Gegensatz zu Einfach Bauen 1, bei dem hinsichtlich der Technischen Gebäudeausstattung nur die Lüftungsgeräte und Wärmeerzeugung betrachtet wurden, sind bei den Forschungsgebäuden in Bad Aibling auch Bäder, Verteilleitungen und Leitungen in die Berechnungen mit eingegangen.

Die Wärmeerzeugung bezüglich der Erwärmung des Brauchwassers erfolgte wie bei der Raumwärme, mittels Fernwärme. Diese wurde in den Räumen mittels Radiatoren verteilt; Lüfter, Pumpen und Kunstlicht wurden mit Strom betrieben.

Das Energiekonzept von Einfach Bauen 1 war wie folgt: Die Wärmeerzeugung erfolgte über eine Wärmepumpe und Erdsonden; die Wärmeverteilung über Fußbodenheizung. Bei dem Raumluftkonzept wurde auf eine natürliche Lüftung zurückgegriffen: Die Luftzufuhr erfolgte über Fensteröffnung durch den Nutzer, sowie über Fensterfalzlüfter. Die Abluft wurde durch das Badezimmer abgeführt und es erfolgte eine Nachspülung über Fensteröffnen. (Nagler et al. 2018)

Die spezifische Nutzenergien für Einfach Bauen 1 und Einfach Bauen 2 wurden von LS Auer ermittelt und auf die jeweiligen Nutzflächen der Gebäude bezogen. Die Werte für die Forschungshäuser in Bad Aibling sind Kapitel 4 zu entnehmen.

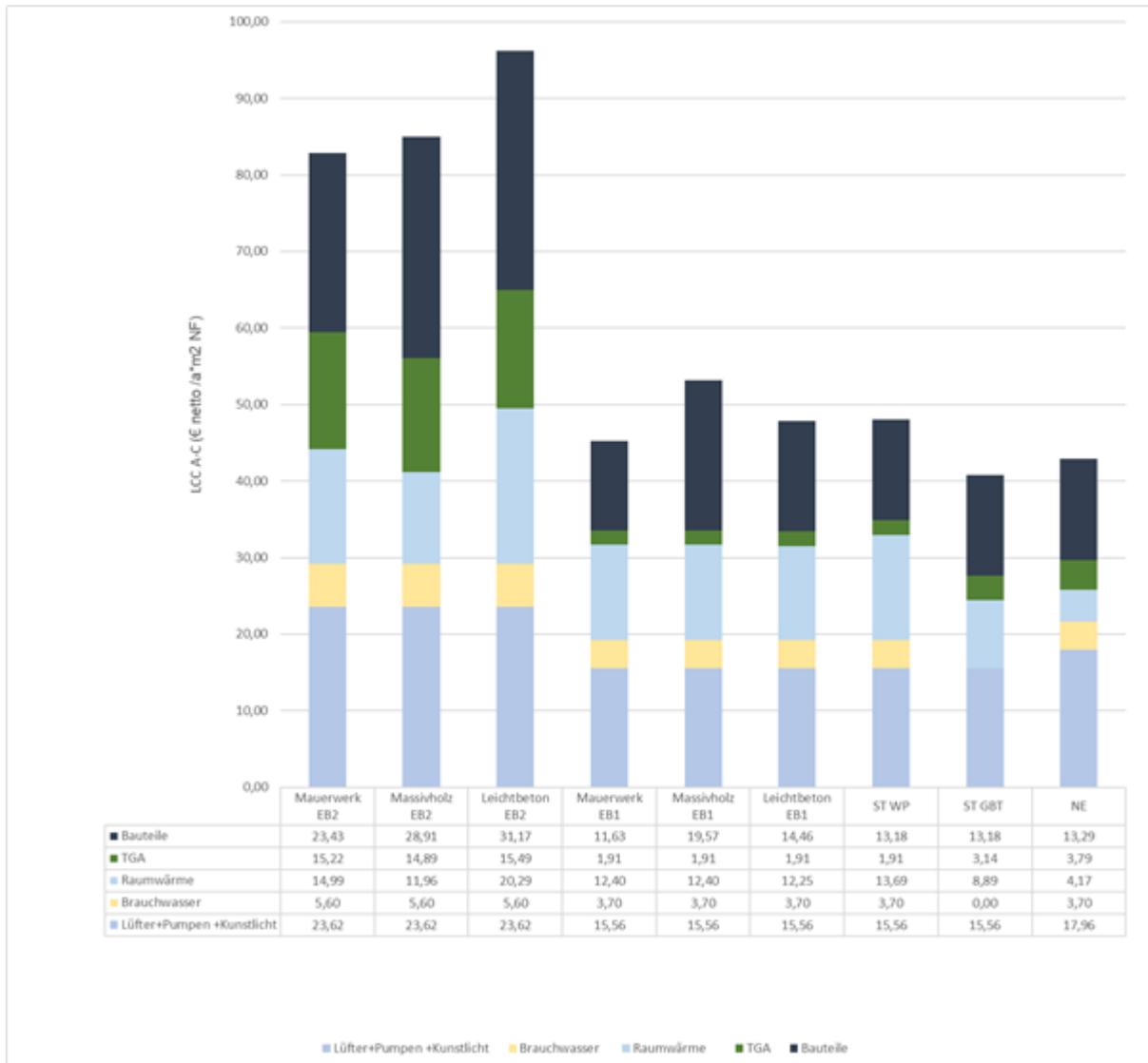


Abbildung 131: Vergleich Lebenszykluskosten (LCC) Forschungsgebäude Bad Aibling EB2 (links), Annahmen EB1 GK3 (Solitär) sowie Standardgebäude mit Wärmepumpe (ST WP) und Gas-Brennwert-Therme (ST GBT) und Niedrigenergiegebäude(NE) pro m<sup>2</sup> NF und a

Die Lebenszykluskosten der Forschungshäuser in Bad Aibling, sowie die der Konzepte von Einfach Bauen 1 auf Gebäudeebene sind Abbildung 132 zu entnehmen. Betrachtet man zunächst die Werte der Forschungsgebäude in Bad Aibling (EB2), wird ersichtlich, dass die Bauteile und TGA 16-18% der gesamten Lebenszykluskosten ausmachten. Versorgung mit Raumwärme und Brauchwasser lagen zwischen 21-27%; die Kosten für die Lüfter, Pumpen und Kunstlicht betragen ca. 25-29% der Gesamtlebenszykluskosten.

Die Stromkosten für Lüfter, Pumpen und Kunstlicht unterschieden sich um 10-26% von den Kosten für Raumwärme und Brauchwasser. Dies ist auf die Kosten der Fernwärme und des Stromes zurückzuführen. Die Kosten wurden wie bei Einfach Bauen 1, mit 0,26€/kWh für Strom und mit 0,07 €/kWh für Fernwärme angesetzt. Die Stromkosten überstiegen somit die Kosten für Fernwärme um fast das Vierfache.

Die Lebenszykluskosten der Forschungshäuser überstiegen deutlich die Kosten der Einfach Bauen 1, Standard- und Niedrigenergiegebäude. Um herauszufinden, weshalb sich die Kosten der Forschungshäuser in diesem Maße erhöht haben, wurden die unterschiedlichen Gewerke der einzelnen Gebäude näher untersucht (Abb.64). Da die Kosten der Forschungshäuser nur für die einzelnen Gewerke vorlagen, wurden, wo möglich die Bauteile von EB1 zu Gewerken zusammengefasst. Anschließend fand ein Vergleich statt.

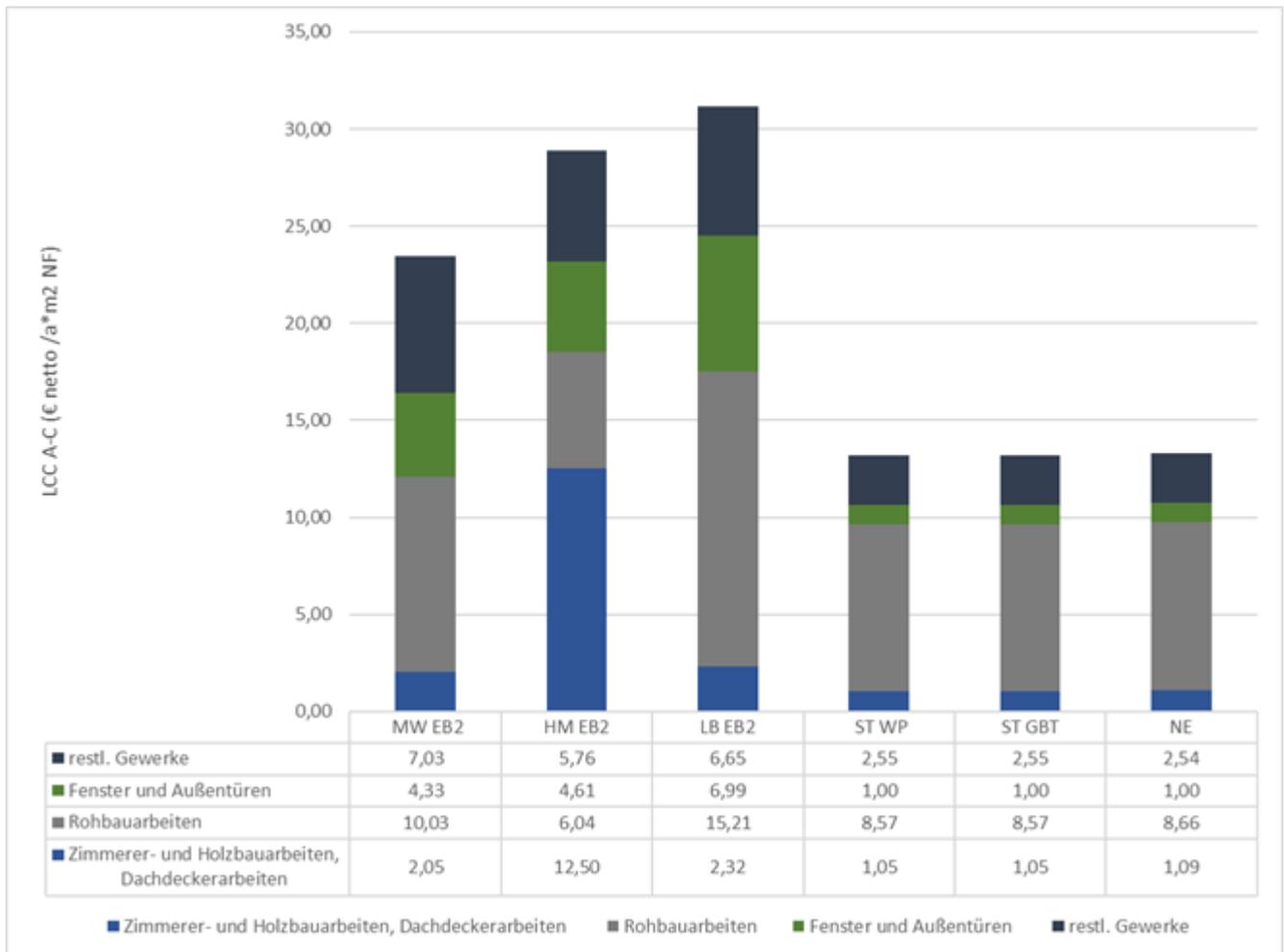


Abbildung 132: Vergleich Lebenszykluskosten (LCC) der Bauteile gegliedert nach Gewerken und TGA der Forschungsgebäude Bad Aibling EB2 (links), Annahmen EB1 GK3 (Solitär) sowie Standardgebäude mit Wärmepumpe (ST WP) und Gas-Brennwert-Therme (ST GBT) und Niedrigenergiegebäude (NE) pro m2 NF und a

Vergleicht man die technische Gebäudeausrüstung der Forschungshäuser mit den Standardgebäuden ST GBT übersteigt das Massivholzgebäude diese um 374%, das Leichtbetongebäude um 393%, das Mauerwerksgebäude um 384% (Abb.133). Auch die Werte der Standardgebäude ST WP und des Niedrigenergiegebäudes NE liegen deutlich unter dem der Forschungshäuser. Die hohen Werte können wie folgt begründet werden. Die effizienten Frischwasserstationen, die in die Forschungshäuser eingebaut wurden, wurden bei den Annahmen von dem Standardgebäuden ST GBT und WP und beim Niedrigenergiegebäudes NE nicht mit berücksichtigt. Diese machen ca. 1/3 der der TGA- Kosten der Forschungshäuser aus.

Auch gab es bei den Forschungshäusern eine kleine Preissteigerung in Bezug auf die Badfertigzellen. Die Bäder wurden bei dem Standardgebäude und dem Niedrigenergiegebäude als Standardinstallationen und Fertigung vor Ort angenommen.

Der Preisanstieg der Fenster der Forschungshäuser mit 433-699% ist auf die höhere Qualität der Fenster zurückzuführen, die bei Einfach Bauen 2 im Vergleich zu den Standard- und Niedrigenergiegebäude verwendet wurden.

Die Kosten für die Rohbauarbeiten des Massivholzgebäudes sind um 29,6% niedriger als bei den Standardgebäuden ST WP und GBT und um 30,3% niedriger als beim Niedrigenergiehaus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dem Massivhausgebäude nur die Decken und das Fundament zu den Rohbauarbeiten gezählt wurden, wohingegen bei den Standardgebäuden und dem Niedrigenergiehaus auch die Außenwände zu diesem Gewerk gehörten.

Auch weisen die Rohbaukosten des Mauerwerks- und Leichtbetongebäudes höhere Kosten im Vergleich zu dem Standard- und Niedrigenergiegebäude auf. Diese sind beim Leichtbetongebäude im Vergleich zu zum Standardgebäude um 43,7%, im Vergleich zu Niedrigenergiegebäude um 43,0% höher. Die Rohbaukosten des Mauerwerksgebäudes überstiegen die Kosten der Standardgebäude um 14,6%, die Kosten des Niedrigenergiegebäudes um 13,6%.

Sowohl beim Mauerwerks-, als auch beim Leichtbetongebäude sind die erhöhten Kosten auf die höheren Materialkosten der Außenwände zurückzuführen. Diese sind bei Leichtbetongebäude Leichtbeton, beim Mauerwerksgebäude Dämmziegel. Beim Standardgebäude und Niedrigenergiehaus wurde Stahlbeton mit einem Wärmedämmverbundsystem verwendet.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse von Einfach Bauen 1 basierten auf Annahmen der Vor- bzw. Entwurfsplanung sowie auf der Datengrundlage von statistischen Kostenkennwerten. Für die Ermittlung der Ergebnisse von Einfach Bauen 2 hingegen, wurden reale Kostenkennwerte für die Herstellungskosten herangezogen. Für die restlichen Phasen wurden die Kostenkennwerte der BKI verwendet. (Fetzer et al. 2020b)(Fetzer et al. 2020a). Deshalb lagen die Werte von EB 2 höher.

Die Hypothese von Einfach Bauen 1, dass „einfach Bauweisen“ hinsichtlich ihrer niedrigeren Lebenszykluskosten im Vergleich zu konventionellen Gebäuden und Passivhäusern niedrigere Kosten erzielen, konnte bei den drei Forschungshäusern in Bad Aibling nicht nachgewiesen werden.

Diese waren beim Vergleich der Forschungshäuser und der Standardgebäudes (ST WP), 48,04€/m<sup>2</sup>aNF bei einer Ausstattung mit einer Wärmepumpe und bei einer Ausstattung mit einer Gas-Brennwert-Therme (ST GBT) 40,77€/m<sup>2</sup>aNF, beim Niedrigenergiegebäude 42,92€/m<sup>2</sup>aNF, beim Mauerwerksgebäude (82,85€/m<sup>2</sup>aNF) , beim Massivholzgebäude (84,98€/m<sup>2</sup>aNF) um 73,0% bzw. 104,0% und bei Leichtbetongebäude (96,16€/m<sup>2</sup>aNF).

## Vergleich Herstellungskosten

Um die Bauweisen hinsichtlich der Herstellungskosten bewerten zu können, wurden die Kostengruppen 300 und 400 für die Herstellung der Forschungshäuser mit den Kosten von konventionell errichteten Referenzgebäuden verglichen. Unter den Kostengruppen 300 und 400 werden die Kosten für das Bauwerk- Baukonstruktion (300) sowie für Bauwerk- Technische Anlagen (400) zusammengefasst. (Norm DIN 276, S. 17–23) Die Kosten der Referenzgebäude stammen aus dem aktuellen BKI Baukosten 2020 Neubau Teil 1, statistische Kennwerte für Gebäude. In der BKI sind die Kostenangaben verschiedener Objekte zu jeder Gebäudeart aufgelistet. (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH 2020, S. 39). Berücksichtigt wurden Nutzung, Anzahl an Nutzungseinheiten, Standort, Brutto-Grundfläche und Nutzungsfläche der Gebäude nach DIN 277. (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2020, 53 ff.)

Das Mauerwerksgebäude wurde mit konventionellem Mauerwerksbau, das Massivholzgebäude mit konventionellem Holzrahmenbau und das Leichtbetongebäude mit Massivbauweise verglichen, da lediglich für diese Bauweisen Daten im BKI vorlagen. Das Mauerwerksgebäude des Forschungsgebäudes unterschied sich im Vergleich zum konventionellen Mauerwerksbau hinsichtlich der Außenwand, welches aus einem Wärmedämmziegel mit Luftkammern und ohne materialfremde Füllstoffe bestand. Beim Massivholzgebäude wurde für die Außenwand ein innovatives, 300mm starkes Starkholzelement mit einer wärmeisolierenden Dämmwirkung und einer Schalung verwendet, wohingegen beim konventionellen Holzrahmenbau nur die Rahmenkonstruktion der Außenwand aus Holz bestand. Das Leichtbetongebäude unterschied sich in der Zusammensetzung der Außenwand durch das innovative Material Leichtbeton mit der besonders hohen Stärke von 500 mm im Vergleich zum konventionellen Massivbau. Durch den Vergleich konnte eine Aussage über die Kosten der Forschungsgebäude gegenüber durchschnittlichen Erstellungskosten von konventionellen Gebäuden getroffen werden.

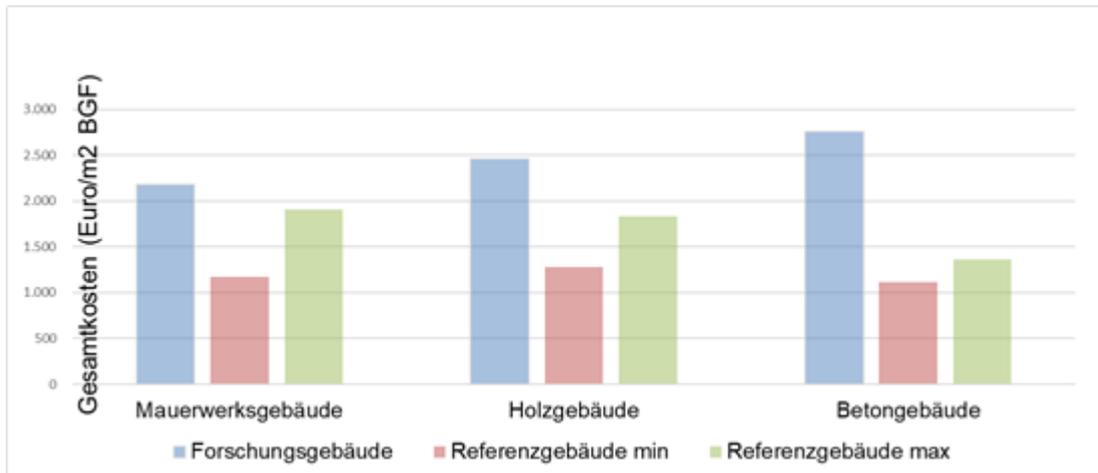


Abbildung 133: Vergleich Kostensteigerung der drei Forschungsgebäude mit den Referenzgebäuden Kostengruppe 300+400 (Bauwerk und Gebäudetechnik) einschließlich 19 % Mehrwertsteuer.

Verglichen zu den Referenzgebäuden konnte bei allen drei Forschungsgebäuden Mehrkosten zwischen 14-148% festgestellt werden. (Abbildung 134) Die Kosten für das Massivholz- und Leichtbetongebäude waren höher, als die für die konventionellen Bauweisen. Da die Herstellungskosten der Referenzgebäude Gesamtkosten sind, konnte nicht ermittelt werden, welche Gewerke die Mehrkosten ausmachten. Ein Überblick über die größten Kostenfaktoren der Gewerke der Forschungshäuser ist Abbildung 135 zu entnehmen.

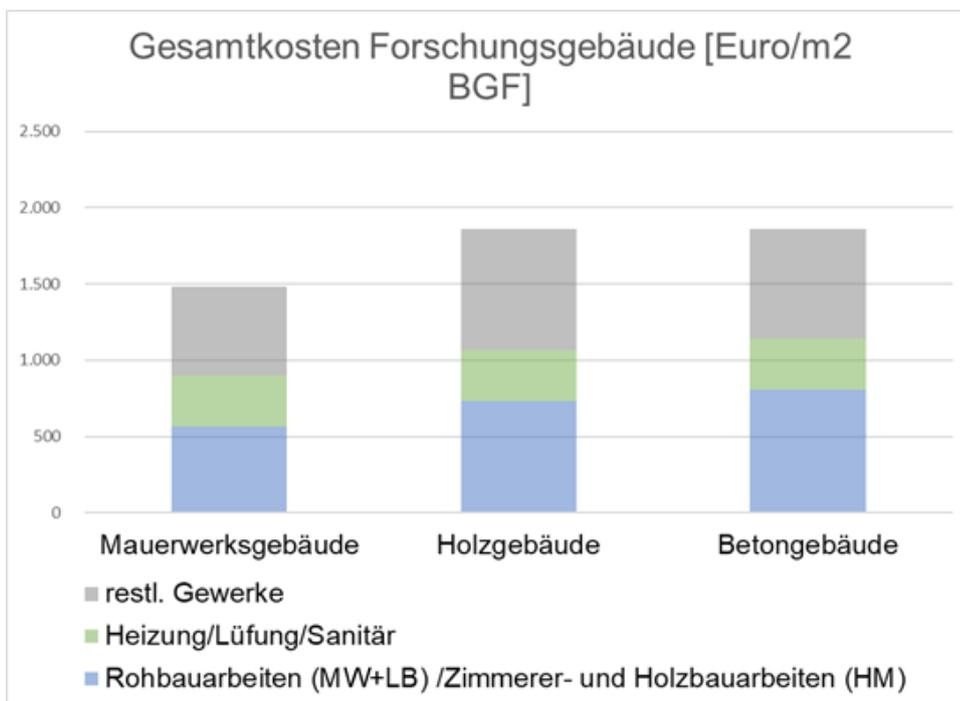


Abbildung 134: Übersicht Gesamtkosten Forschungsgebäude nach Gewerken

## Literaturverzeichnis Kapitel 5

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (Hg.) (2017): Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Online verfügbar unter [https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff\\_gebauededaten/BNB\\_Nutzungsdauer\\_n\\_von\\_Bauteilen\\_2017-02-24.pdf](https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/BNB_Nutzungsdauer_n_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf).

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) Referat Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung (Hg.) (2015): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) BNB\_BN Büro- und Verwaltungsgebäude. Ökonomische Qualität Lebenszykluskosten. Online verfügbar unter [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v\\_2015/BNB\\_BN2015\\_211.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v_2015/BNB_BN2015_211.pdf).

Callsen, Björn; Thienel, Karl-Christian (2017): Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/315728985\\_Besondere\\_Aspekte\\_bei\\_der\\_Entwicklung\\_und\\_Ausfuhrung\\_eines\\_hochwarmedammenden\\_Hochleistungs-Leichtbetons\\_mit\\_sehr\\_niedriger\\_Betonrohddichte](https://www.researchgate.net/publication/315728985_Besondere_Aspekte_bei_der_Entwicklung_und_Ausfuhrung_eines_hochwarmedammenden_Hochleistungs-Leichtbetons_mit_sehr_niedriger_Betonrohddichte), zuletzt geprüft am 27.10.2020.

Fetzer, Robert; Luther, Jörn; Mandl, Wolfgang; Schmid, Thomas; Schneider, Hans-Jürgen; Wagner, Andreas; (2020a): BKI Baukosten 2020 Altbau. Unter Mitarbeit von Hannes Spielbauer, Klaus-Peter Ruland, Brigitte Kleinmann, Heike Elsässer, Wolfgang Mandl, Thomas Schmid und Jeanette Sturm. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH.

Fetzer, Robert; Luther, Jörn; Wagner, Andreas; Schneider, Hans-Jürgen (2020b): BKI Baukosten Positionen Neubau 2020. Statistische Kostenkennwerte Positionen (Teil 3). Unter Mitarbeit von Hannes Spielbauer, Klaus-Peter Ruland, Brigitte Kleinmann, Heike Elsässer, Wolfgang Mandl, Thomas Schmid und Jeanette Sturm. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH.

Florian Nagler Architekten GmbH (08.06.20a): Drei Forschungshäuser Bad Aibling Ausführungsplanung. Holzmassiv Rohbau. Hg. v. Florian Nagler Architekten GmbH. München.

Florian Nagler Architekten GmbH (03.11.20): Drei Forschungshäuser Bad Aibling Ausführungsplanung. Lageplan. Hg. v. Florian Nagler Architekten GmbH. München.

Florian Nagler Architekten GmbH (08.06.20b): Drei Forschungshäuser Bad Aibling Ausführungsplanung. Leichtbeton Rohbau. Hg. v. Florian Nagler Architekten GmbH. München.

Nagler, Florian; Auer, Thomas an; Winter, Stefan; Gehlen, Christoph (2018): Einfach Bauen. Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der

Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion. Hg. v. Technische Universität München. München.

## Abkürzungsverzeichnis Kapitel 5

<b>Begriff</b>	<b>Definition</b>
AW	Außenwand
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
EB	Einfach Bauen
GWP	Global <del>Warming</del> Potential (Treibhauspotential)
HM	Holzmassiv
MW	Mauerwerk
LB	Leichtbeton
LCA	Life Cycle Analysis (Lebenszyklusanalyse)
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
PENRE	Primärenergien nicht erneuerbar
PERE	Primärenergien erneuerbar

## 6 Fazit



Abbildung 135: Die fertiggestellten Forschungshäuser

Die Projektziele konnten trotz der Verzögerung des Baubeginns der Gebäude Mauerwerk und Holz erreicht werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Struktur dieses Berichts entsprechend noch einmal zusammengefasst.

### Planung und Bauprozess

Durch die Begleitung des Planungs- und Bauprozesses durch das Forschungsprojekt konnte die im Vorgängerprojekt erarbeiteten Strategien für Einfach Bauen konkret angewendet und getestet werden. Die Dokumentation des Prozesses durch Befragung der Beteiligten sowie die Aufarbeitung der Pläne und Baustellenfotos macht diesen Prozess und dessen Ergebnisse nachvollziehbar und damit für die weiteren Anstrengungen in Richtung Vereinfachung nutzbar. Grundsätzlich zeigt sich, dass das Konzept Einfach Bauen verständlich und gut anwendbar ist. In einigen Bereichen gibt es noch Optimierungsbedarf, dazu werden konkrete Vorschläge angeboten.

### Gebäudehülle

An dem Außenwandmaterial Infrarotbeton haben an diesem dreigeschossigen Wohnungsbau

zahlreiche Untersuchungen stattgefunden. Die durch den Hersteller angegebenen Eigenschaften sind eingehalten. Die Hydrophobierung der Außenwände wird empfohlen. Mit dem Einbau von Feuchtesensoren wurde ein Messkonzept zur Dauerüberwachung im Rahmen eines Folgeprojektes entwickelt. Insgesamt sind die Konstruktionsmethoden erfolgreich und können mit den gesammelten Erfahrungen vor allem auf der Bauprozessebene weiter optimiert werden.

### **Komfort und Energie**

Die Versuchsmessungen haben entscheidend dazu beigetragen ein robustes Messkonzept für das Nachfolgeprojekt zu entwickeln. Die Langzeitmessungen über die nächsten zwei Jahre sind somit optimal vorbereitet (Einfach Bauen 3). Das Simulationsmodell ist aufgebaut und wird in seinen Inputparametern durch die Messungen von zum Beispiel Wetter und Nutzerverhalten weiter verbessert, um am Ende eine Validierung der Simulation anhand der tatsächlichen Messergebnisse zu ermöglichen. Dadurch wäre dann auch eine robustere Simulationsbasis für Folgeprojekte gegeben. Die ersten Messergebnisse stimmen optimistisch. Zum Beispiel konnte eine hohe Trägheit des Systems gegenüber Umwelteinflüssen gemessen werden. Andererseits haben die Messungen aber auch den Effekt einer noch nicht aktiven Grundspülung über die Badlüfter gezeigt und damit entsprechende Nacharbeiten angestoßen.

### **Ökologie und Lebenszykluskosten**

Die Untersuchungen zur Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus auf Gebäudeebene aus dem Vorgängerprojekt wurden entsprechend mit den Forschungshäusern konkret abgeglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Umsetzung der Strategie Einfach Bauen im Bauprojekt auch auf der Ökobilanzebene erfolgreich war. Eine konkrete Untersuchung der Umweltwirkung von Transport und Bauprozess – also Größen die in die Betrachtungen bisher, aufgrund der großen Unschärfe nicht eingeflossen waren – bestätigt, dass die Umweltauswirkung bei Transport und Bau gegenüber der Gesamtbetrachtung von Herstellung, Instandhaltung und Abbruch eine nur untergeordnete Rolle spielen und deshalb bis auf weiteres vernachlässigbar sind.

Die Ergebnisse von Einfach Bauen 1 basierten auf Annahmen der Vor- bzw. Entwurfsplanung sowie auf der Datengrundlage von statistischen Kostenkennwerten. Für die Ermittlung der Ergebnisse von Einfach Bauen 2 hingegen, wurden reale Kostenkennwerte für die Herstellungskosten und die Kostenkennwerte der BKI verwendet. Die Hypothese von Einfach Bauen 1, dass „einfach Bauweisen“ hinsichtlich ihrer niedrigeren Lebenszykluskosten im Vergleich zu konventionellen Gebäuden und Passivhäusern niedrigere Kosten erzielen, konnte bei den drei Forschungshäusern in Bad Aibling nicht nachgewiesen werden.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Interviewpartner und ihrer Beteiligung am Planungs- und Bauprozess (HM: Holzmassivhaus, LB: Leichtbetonhaus, MW: Mauerwerkshaus) .....	10
Tabelle 2: Mittelwerte dreier Messungen an Proben mit unterschiedlichen Lagerungsbedingungen mit Standardabweichung in Klammern der Rohdichte von Infraleichtbeton in verschiedenen Zuständen .....	91
Tabelle 3: Mittelwerte dreier Messungen mit Standardabweichung in Klammern von Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Elastizitätsmodul von Würfeln aus Infraleichtbeton mit 150 mm Kantenlänge und Zylindern mit 100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe jeweils nach 28 und 56 Tagen.....	91
Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von gesättigtem Infraleichtbeton als Mittelwert von Messungen an drei Flächen mit einfacher Standardabweichung .....	92
Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von bei 20 °C und 65 % rH konditioniertem Infraleichtbeton als Mittelwert von Messungen an drei Flächen mit einfacher Standardabweichung	92
Tabelle 6: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von darrtrockenem Infraleichtbeton als Mittelwert von Messungen an drei Flächen mit einfacher Standardabweichung .....	92

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Planum für die Bodenplatte ist erstellt. ....	20
Abbildung 2: Die Bodenplatte ist betoniert. ....	21
Abbildung 3: Die Schalung für die erste Infraleichtbeton-Wand wird aufgestellt.....	22
Abbildung 4: Blick von oben in die geschalte Außenwand.....	23
Abbildung 5: Türöffnung und Verdrängungskörper .....	24
Abbildung 6: Fußpunkt der Innenwände.....	25
Abbildung 7: Durch die poröse Struktur des Infraleichtbetons ist es beim Ausschalen zu Abplatzungen gekommen. ....	26
Abbildung 8: Um die Rissbildung durch das Schwinden und Krieche des Infraleichtbetons gering zu halten, wurde in versetzten Abschnitten betoniert.....	27
Abbildung 9: Eine vorgefertigte Badzelle wird in den Rohbau eingebracht. Sämtlich Bäder wurden in allen drei Forschungshäusern vorgefertigt. ....	28
Abbildung 10: Die Decken wurden ebenfalls mit Stahlfaserbeton hergestellt. ....	29
Abbildung 11: Da die Decke ohne weiteren Fußbodenaufbau direkt mit einem Bodenbelag belegt wird, kommt ein Flügelglätter zum Einsatz.....	30
Abbildung 12: Durchfeuchtete Wetterseite am Montag 10.10.2020 um 13 Uhr hervorgerufen durch das Sturmtief Sabine. ....	31
Abbildung 13: Die Situation um 15 Uhr. Also ca. 2 Stunden später. Die Oberfläche der Wand beginnt abzutrocknen. ....	31
Abbildung 14: Detaillierte Plan-Aufnahme der Schwindrisse. Durch den starken Wind und den damit einhergehenden Druckunterschied zwischen Wetterseite und Wetterrückseite, kam es vermutlich zu einer Sogwirkung zwischen Außenseite und Innenseite der Außenwand auf der Wetterseite.....	32
Abbildung 15: Fotoaufnahmen (Bild 1-13) der Feuchtstellen an den Schwindrissen. ....	34
Abbildung 16: Einbau der Wohnungstüren.....	35
Abbildung 17: Ein Blick in eine der fertig angelieferten Badzellen. ....	36
Abbildung 18: Die Heizkörper sind dicht am Vertikalstrang der Technik platziert und hochformatig, um viel Wandfläche für Möbel zu belassen. ....	37
Abbildung 19: Lieferung des Wandteile für das Erdgeschoss des Holzhauses. ....	38

Abbildung 20: Schnittansicht der Außenwand des Holzhauses. ....	39
Abbildung 21: Hier wird die Außenwand des Erdgeschosses, welche aufgrund der Höhe einen horizontalen Stoß hat, zu einem Stück montiert. ....	40
Abbildung 22: Ein 12 mm dicker Stabdübel wird oben in den Kopf der Wand gesteckt, um eine statische Verbindung zur Stahlbetondecke zu erreichen. ....	41
Abbildung 23: Die Außenwände stehen. ....	42
Abbildung 24: Hier ist die Aufkantung an der Außenecke zu sehen, die gleichzeitig die Randschalung für die Stahlbetondecke bilden wird. ....	43
Abbildung 25: Das Ergebnis nach einem Tag Arbeit. ....	44
Abbildung 26: Eine Woche später: Die Decke über dem Erdgeschoss wird betoniert. ....	45
Abbildung 27: Durch den Druck des Betons und vermutlich auch die Flügelglättung hat sich die Wandkrone des Erdgeschosses nach Außen bewegt. ....	46
Abbildung 28: Zwischenpodest und Treppenläufe wurden vorgefertigt und durch den Rohbauer mit dem Kran eingehoben. ....	47
Abbildung 29: Blick in das Erdgeschoss. ....	48
Abbildung 30: Ergebnis nach Tag 2. ....	48
Abbildung 31: ca. 2 Wochen später. ....	49
Abbildung 32: Blick ins Treppenhaus. ....	50
Abbildung 33: Die fertigen Badzellen sind in den entsprechenden Vertiefungen auf der Geschossdecke abgestellt und an den vertikalen Durchbrüchen positioniert. ....	51
Abbildung 34: Die Holzprofile, auf denen die Außenwände lagern, werden in Lage und Höhe ausgerichtet und in der Betondecke verschraubt. ....	52
Abbildung 35: Hier liegen die Holzprofile für die Innenwände. ....	52
Abbildung 36: Hier ist eine Außenwand montiert. Links ist das Holzprofil für die Innenwand sichtbar. ....	53
Abbildung 37: An den Wohnungstrennwänden sind die Außenwände auf Fuge gesetzt, um Schallübertragung über die Außenwand von einer Wohnung zur nächsten zu reduzieren. ....	53
Abbildung 38: Auch von Geschoss zu Geschoss wird an den Außenwänden eine Fuge ausgebildet. ....	54
Abbildung 39: Hier ein Blick an der Außenwand herunter. Die Schrauben, die das Wandelement mit dem Holzprofil verbinden, werden geradegesetzt. ....	54
Abbildung 40: Das Anschlussdetail von Geschossdecke zur Außenwand ....	55

Abbildung 41: Das entsprechende Detail vor Ort in der Umsetzung.....	55
Abbildung 42: Badzelle ohne Folien.....	56
Abbildung 43: Die Wohnungstrennwände werde mit einer zusätzlichen Schicht aus Leichtbauplatten verkleidet, um die notwendigen Schallschutzwerte zu erreichen.....	57
Abbildung 44: Der Dachstuhl ist aufgerichtet.....	58
Abbildung 45: Das Dach wird eingedichtet.....	59
Abbildung 46: Die Unterkonstruktion der Holzverschalung wird verbaut.....	60
Abbildung 47: Da die Holzoberflächen durch Regen und Betoniervorgang doch hier und da gelitten haben, wurde dort Trockenbauschleifgerät nachgeschliffen.....	61
Abbildung 48: Eine der Lüftungsöffnungen der Speisekammern.....	62
Abbildung 49: Der Bodenleger arbeitet.....	63
Abbildung 50: Außenansicht von Südosten.....	64
Abbildung 51: Parallel zum Holzbau begannen die Arbeiten am Mauerwerkshaus.....	65
Abbildung 52: Der Kimmstein wird gesetzt.....	66
Abbildung 53: Die Luftkammerziegel werden ohne vertikale Mörtelfuge gesetzt.....	67
Abbildung 54: Die Luftkammern werden in jeder Steinlage mit einer Mörtelschicht verschlossen, um eine Zirkulation über die Steinlagen hinweg zu vermeiden.....	68
Abbildung 55: Dafür wird ein spezieller Mörtelschlitten verwendet.....	69
Abbildung 56: Betonage der Decke.....	70
Abbildung 57: Der Sturz über den Fenstern wurde aus dem gleichen Stein wie die Außenwand als Segmentboden hergestellt.....	71
Abbildung 58: Hier noch einmal von außen.....	72
Abbildung 59: Hier ein Blick ins Gebäude, links die bekannte Badfertigzelle.....	73
Abbildung 60: Auflager des Treppenpodests auf der tragenden Innenwand.....	74
Abbildung 61: Die Kalkschlämme auf der Innenwand wird getestet.....	75
Abbildung 62: Der Anschlag für die Fenster ist hergestellt.....	76
Abbildung 63: Die Elektroinstallation wird verlegt.....	77
Abbildung 64: Im Mauerwerkshaus befindet sich auch der einzige Technikraum des Projekts.....	78

Abbildung 65: Hier erfolgt die Verteilung der Wärme für Heizen und Warmwasser in die drei Häuser. ....	79
Abbildung 66: Frischwasseraufbereitung. ....	80
Abbildung 67: Verteilung des Frischwassers in die drei Gebäude. ....	81
<i>Abbildung 68: Das Mauerwerkshaus von Südosten gesehen. ....</i>	<i>82</i>
Abbildung 69: Alle drei Häuser in einer Reihe. ....	83
Abbildung 70: Positionierung Wärmestrommessplatten Leichtbetongebäude, 2. Obergeschoss I .....	85
Abbildung 71: Positionierung Wärmestrommessplatten Leichtbetongebäude, 2. Obergeschoss II .....	85
Abbildung 72: Beispiel für die fehlende Konvergenz der Messwerte bei der Berechnung des U-Wertes der Leichtbetonwandaußen. Das Ende der Messperiode ist hier willkürlich gewählt, ohne Erreichen einer statistischen Stabilität. ....	87
Abbildung 73: Aufbau Wärmestrommessung Mauerwerksgebäude, 2. Obergeschoss .....	88
Abbildung 74: Aufbau Wärmestrommessung Massivholzgebäude, 2. Obergeschoss .....	88
Abbildung 75: Positionierung Holzfeuchtemesspunkte Massivholzgebäude .....	89
Abbildung 76: Einstichstelle Holzfeuchtemessung .....	89
Abbildung 77: Infraleichtbeton in den Zuständen Frischbeton (links) und Festbeton, gesägte Oberfläche (rechts) .....	90
Abbildung 78: Gesägte Proben zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität (volumetrisch) und der Dichte (links). Infraleichtbetongefüge unter dem Lichtmikroskop (rechts) ....	92
Abbildung 79 Messpositionen der Multiringelektroden (MRE) jeweils an drei Stellen der West- und Nordseite sowie Position des Datenloggers an der Innenwand der Westseite. ....	94
Abbildung 80 Einbaupositionen der MRE an je drei Positionen jeweils an West- und Nordwand vor der Betonage (links). Multiring-Sensorelektronik zum Loggen der Daten (rechts) .....	95
Abbildung 81 Feuchteverläufe an drei verschiedenen Positionen der Westwand als Mittelwert aller Widerstände der jeweiligen Multiringelektrode .....	95
Abbildung 82 Feuchteverläufe an zwei verschiedenen Positionen der Nordwand als Mittelwert aller Widerstände der jeweiligen Multiringelektrode .....	96
Abbildung 83 Feuchteverläufe, berechnet aus den Einzelwiderständen der Multiringelektrode in der Mitte der Westwand .....	96
Abbildung 84 Thermographieaufnahmen mit Oberflächentemperaturen von in beiden Fällen etwa 15 °C mit unterschiedlicher Auflösung und Farbcodierung .....	97

Abbildung 85	Ausschnitt der Außenwand des ersten Obergeschosses des Infraleichtbetonhauses verdichtet mit Innenrüttler (links) und Außenrüttler (rechts) .....	98
Abbildung 86:	Kantenabbruch im Eckbereich (links), Abplatzungen (Mitte) und Fugenausprägung zwischen Betonchargen (rechts) .....	98
Abbildung 87	Thermische Komfortparameter .....	102
Abbildung 88	Sensoren in Raummittel der 1-Zimmer-Wohnung im 2. OG des Leichtbetonhauses in Bad Aibling .....	103
Abbildung 89	Planung der Anbringung der Fensterkontakte am Holzrahmen .....	104
Abbildung 90	Geöffneter Strommesser für die Erfassung der schwarzen Phase .....	105
Abbildung 91	Messsensorenkonzept anhand des Grundrissplans für den 2.OG des Leichtbetonhauses .....	106
Abbildung 92	Sensornetzwerk mit Wifi-Datenübertragung .....	108
Abbildung 93	Aktueller Stand des Messplans mit Datentransfer via Modbus-Kommunikation .....	108
Abbildung 94	Installation der Wetterstation auf dem Dach des Leichtbetonhauses .....	109
Abbildung 95	Messergebnisse im August 2020 der Außenluft und des Innenkomforts im Ost-Raum der 1-Zimmer-Wohnung .....	110
Abbildung 96	Temperaturverlauf über eine Augustwoche .....	111
Abbildung 97	Oberflächentemperaturverläufe über eine Augustwoche .....	112
Abbildung 98	HX-Diagramm über Luftfeuchte mit Angabe des Komfortbereichs im Innenraum .....	113
Abbildung 99	Operative Temperatur über Außenlufttemperatur mit Angabe des adaptiven Komfortbereichs nach DIN EN 15351 .....	113
Abbildung 100	Repräsentative kühle Tage Mitte Oktober 2020 .....	114
Abbildung 101	Temperaturverlauf der Daten von Mitte Oktober 2020 .....	115
Abbildung 102	Oberflächentemperaturverläufe Mitte Oktober 2020 .....	115
Abbildung 103	Solarstrahlung 13.-15.10.2020 .....	116
Abbildung 104	Verlauf der Außenlufttemperatur (y-Achse) über die Monate eines Jahres (x-Achse) ....	118
Abbildung 105	HX-Diagramm der absoluten Feuchte (y-Achse) über die Außenlufttemperatur (x-Achse) .....	118
Abbildung 106	Monatssummen der direkten (grau) und diffusen (blau) Horizontalstrahlung .....	119

Abbildung 107 Windrichtung mit Farbskala nach Windgeschwindigkeit .....	119
Abbildung 108 11-Zonen-Modell des 2.OG der Forschungshäuser in Rhinoceros®6 .....	120
Abbildung 109 Sommerlicher Komfort, Leichtbetonhaus, 2.OG Apartment Nord-Ost, Wohnzimmer.....	123
Abbildung 110 Sommerlicher Komfort, Massivholzhaus, 2.OG Apartment Nord-Ost, Wohnzimmer.....	124
Abbildung 111 Sommerlicher Komfort, Ziegelhaus, 2.OG Apartment Nord-Ost, Wohnzimmer.....	124
Abbildung 112 Sommerlicher Komfort, Leichtbetonhaus, 2.OG Apartment Süd-Ost, Wohnzimmer .....	125
Abbildung 113 Sommerlicher Komfort, Massivholzhaus, 2.OG Apartment Süd-Ost, Wohnzimmer.....	125
Abbildung 114 Sommerlicher Komfort, Ziegelhaus, 2.OG Apartment Süd-Ost, Wohnzimmer .....	125
Abbildung 115 Spez. Nutzenergie, Nord-Apartment im 2.OG Leichtbeton, Massivholz, Mauerwerk .....	127
Abbildung 116 Spez. Nutzenergie, Süd-Apartment im 2.OG Leichtbeton, Massivholz, Mauerwerk.....	127
Abbildung 117: Lageplan Drei Forschungshäuser Bad Aibling: Gebäudearten Mauerwerk, Massivholz, Leichtbeton (von links nach rechts) .....	130
Abbildung 118: GWP (A+B4+C) aller drei Forschungsgebäude nach Bauteilgruppen .....	132
Abbildung 119: GWP (A+B4+C) aller drei Forschungsgebäude .....	132
Abbildung 120: PERE (links) und PENRE (rechts) aller drei Forschungsgebäude.....	133
Abbildung 121: GWP (A+B4+C): EB2 aller drei Forschungsgebäude (links), GWP (A+B4+C): EB1 aller drei Gebäudevarianten (rechts).....	134
Abbildung 122: Leichtbetongebäude Grundriss 1. OG.....	136
Abbildung 123: Leichtbetongebäude Schnitt 3 .....	136
Abbildung 124: Leichtbetongebäude Außenwandaufbau.....	137
Abbildung 125: Umweltwirkungen bei durchschnittlichen Aufwendungen, Leichtbetongebäude Außenwand.....	138
Abbildung 126: Holzmassivgebäude Grundriss 1. OG .....	140
Abbildung 127: Holzmassivgebäude Schnitt 3 .....	140
Abbildung 128: Holzmassivgebäude Außenwandaufbau .....	141
Abbildung 129:Umweltwirkungen bei durchschnittlichen Aufwendungen, Massivholzgebäude Außenwand .....	141
Abbildung 130: Vergleich GWP A4 und A5 Massivholzgebäude und Leichtbetongebäude Außenwand	143

Abbildung 131: Vergleich Lebenszykluskosten (LCC) Forschungsgebäude Bad Aibling EB2 (links), Annahmen EB1 GK3 (Solitär) sowie Standardgebäude mit Wärmepumpe (ST WP) und Gas-Brennwert-Therme (ST GBT) und Niedrigenergiegebäude(NE)pro m2 NF und a .....	146
Abbildung 132: Vergleich Lebenszykluskosten (LCC) der Bauteile gegliedert nach Gewerken und TGA der Forschungsgebäude Bad Aibling EB2 (links), Annahmen EB1 GK3 (Solitär) sowie Standardgebäude mit Wärmepumpe (ST WP) und Gas-Brennwert-Therme (ST GBT) und Niedrigenergiegebäude (NE)pro m2 NF und a .....	147
Abbildung 133: Vergleich Kostensteigerung der drei Forschungsgebäude mit den Referenzgebäuden Kostengruppe 300+400 (Bauwerk und Gebäudetechnik) einschließlich 19 % Mehrwertsteuer. ....	150
Abbildung 134: Übersicht Gesamtkosten Forschungsgebäude nach Gewerken .....	150
Abbildung 135: Die fertiggestellten Forschungshäuser .....	153

## Anhang

- I. Interviewleitfaden und Interviews
- II. Simulation
  - I. Bauteiltabelle der Forschungshäuser in Bad Aibling
  - II. Auswertung thermischer Komfort (nur im pdf enthalten, nicht im Ausdruck)

## Anhang I

### Interviewleitfaden

#### Inhalt: Erfahrungen bei Planung und Bau der Einfach Bauen-Forschungshäuser in Bad Aibling

Geplante Zeit je Telefoninterview: ca. 10-15 Minuten

1. **Einstieg**
  - Das Gespräch wird aufgezeichnet und anschließend verschriftlicht
  - Das Transkript wird dem Befragten zur Korrektur und Freigabe vorgelegt
  - Das Gespräch wird so verlaufen, dass ich Ihnen einige Fragen stellen werde und Sie erzählen ganz offen und ausführlich. Dabei gibt es kein richtig oder falsch, es geht um Ihre persönlichen Erfahrungen und um Ihre Meinung
2. **Informationen zur Person**
  - Name und Tätigkeit
  - Ausführliche Beschreibung der Beteiligung am Projekt (inhaltlich und zeitlich)
3. **Das Konzept Einfach Bauen**
  - Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?
  - Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?
  - Wo sehen Sie Vorteile (z.B. weniger Abstimmung mit anderen Gewerken durch Schichtenreduktion und einfache Details)?
  - Hat sich ihrer Meinung nach der Bauprozess vereinfacht?
  - Was hat Ihnen Schwierigkeiten bereitet (z.B. Bogenherstellung der Fensteröffnung)?
  - Was könnte verbessert werden (z.B. Detailausführung Segmentbogen Mauerwerk)?
  - Welche besonderen Arbeitsvorbereitungen bezüglich des Bauablaufs gab es?
  - Welche Auffälligkeiten gab es in Bezug auf die Baustellenabfälle bzw. dem Müllaufkommen?
4. **Ausführung Holzbau**
  - Wo lagen die Herausforderungen bei der Ausführung Holz-Betondecke? Gab es Besonderheiten bei den Fügungen?
5. **Ausführung Infraleichtbeton**
  - Wie beurteilen Sie die Verarbeitbarkeit des Infraleichtbetons (Einbringen in die Schalung, Verdichten)?
  - Welche Verdichtungsart führte zu einer besseren Qualität der Oberflächen?
  - Welche Auffälligkeiten gab es bei der Schalung (Abdichtung, Sonderlösungen, Schäden beim Ausschalen)?

- Welche Auffälligkeiten gab es bei der Betonage frisch-in-frisch (Verarbeitungszeit, Anlieferung)?

## 6. Persönliches

- Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur der Häuser/ des Hauses, an dem Sie beteiligt sind?
- In welches der drei Häuser würden sie einziehen?

Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 13.10.2020

**Befragter:** Hr. Scheerer

**Firma:** Ing.-Büro Scheerer TGA-H

### **Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt**

Wir haben unter der B&O die TGA-Heizungs- und Sanitärplanung nach Architektenvorgaben bewerkstelligt. Wir waren am Projekt beteiligt ab dem Zeitpunkt, wo die Eingabeplanung bereits fortgeschritten war (TGA-Planer LB/HM/MW).

### **Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

Mit einfachen bzw. den nötigsten Mitteln und mit einfacher Technik die Mindestanforderungen ohne übergroßen Komfort erfüllen; den Standardwärmebedarf zu erfüllen und die Warmwasserversorgung zu gewährleisten.

Das haben wir umgesetzt, so dass es auch hygienisch ist mit wohnungszentralen Frischwasserstationen, so dass lange Zirkulationsleitungen vermieden werden. Und mit einer Heizzentrale, die das komplette Haus bedient. Der Vorteil dieses Systems ist, dass hier nur ein Heizungsnetz aufgebaut wird mit Kaltwasser. Warmwasser und Zirkulation entfallen, weil dezentral pro Wohneinheit das Warmwasser erzeugt wird. So entfallen die komplette Warmwasserleitung und Zirkulationsleitung. Damit ist es sowohl energetisch als auch in Bezug auf die Installation effizient und gleichzeitig wird die Trinkwasserhygiene eingehalten.

**Fazit:** Einfache Konzepte über die bauliche Planung hinaus auch in der TGA-Planung; auf das Wesentliche konzentriert; unter Einhaltung der notwendigen Funktionen und Hygiene-Schallschutz-BRS-Vorschriften n.a.a.R.d.T.

→Alternative: Ggf- könnte aber dabei bei Einhaltung einfacher Kubatur- bzw.- Außenhüllflächen (wie bei FH- weitg. gegeben) in Verbindung mit innovativer zukunftsorientierter dennoch einfacher Systemanlagentechnik somit ein „EINFACH -BAUEN – ENERGIESPAARHAUS “ ggf. sogar mit KfW- Fördermittelnutzung abzubilden sein

### **Hat sich ihrer Meinung nach der Bauprozess vereinfacht?**

Im Prinzip ja, wobei wir dieses Modell auch zunehmend bei Pflegeheimen realisieren. Das machen wir schon seit einigen Jahren. Es ist aber eine Vereinfachung gegenüber der klassischen Vorgehensweise, wir vor einigen Jahren noch.

### **Wo sehen Sie Vorteile oder Nachteile des Konzepts Einfach Bauen?**

Wir haben nicht die Planungshoheit, dann wäre es etwas anderes. Wir haben uns an die Vorgaben der Architekten gehalten. Ich sehe nicht die großen Unterschiede. Vielleicht dass man Standard-Heizkörper verwendet und keine Sondermodelle, die viel Geld kosten, und dass man nicht zu sehr auf Kunden-Sonderwünsche eingeht. Die Heizwärme sollte sinnvoll eingesetzt werden, z.B. die Heizkörper sollten unter den Fenstern angebracht werden, und dass man nicht zu viele Sonderwünsche einfließen lässt und die Planung damit auch durchziehen kann. **FAZIT.** Vorteile sehen wir dann gegeben wenn eine klare Planungslinie bereits aus der Konzeption bis hin zur LP-5 verfolgt wird, ohne individuelle wohnungsweise Sonderwunsch-Einflüsse.

### **Hatte die TGA-Planung Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit?**

Wenn man sagt, wir machen einfach Standard, dass man Heizkörper nach DIN und sinnvoll einsetzt – damit hat man eine Planungswirtschaftlichkeit. Dann ist natürlich wichtig, dass man nicht zu viele Sonderheizkörper realisiert. Wir hatten auch mal im Blick, dass man mit Deckenstrahl-Heizkörpern zu arbeiten. Das ist immer sehr schnell grenzwertig. Die hatten dann welche, die sind teurer, aber wenn man die sinnvoll einsetzt, wäre es sinnvoll. Bei Einfach Bauen könnte man beispielsweise ein Deckensegel im Flur machen, das minimal in den Raum hineinragt. Hier lassen sich Synergie-effekte nutzen, nämlich dass man weniger Heizkörper und weniger Rohrnetz benötigt. Das muss allerdings immer mit den Vorstellungen des Architekten einhergehen. Es wurde nur in einem Haus realisiert.

**FAZIT:** Ja Vorteile in der Planungseffizienz- können somit bei Verfolgung klarer Planungsleitsätze aus der Konzeption (ohne individuelle Sonderwunschrealisierung) erreicht werden- Siehe Pkt- 1

### **War das ein Vorschlag von Ihnen, der nicht zur Ausführung kam?**

Grundsätzlich wäre natürlich aus diesem Gesichtspunkt eine stärkere Beachtung der TGA-Gesichtspunkte aus unserer Sicht zielführend um stärkere Effekte iim Bereich der TGA zu ermöglichen. Dies insoweit natürlich architektonische generalplanerische Argumentation- nicht-dagegenspricht.

### **Wie könnte man das Konzept noch weiter vereinfachen?**

Man muss jedes Projekt individuell betrachten. Einfacher wäre gewesen, zum Beispiel bei den Heizkörpern keine Sondermodelle vorzugeben.

**FAZIT:** Um maximale TGA- planerische sowie gewerkspezifische Effizienz- Vorteile herauszuholen. müsste generell natürlich die gewerkspezifische Hoheit gewährt werden.

Dies ist natürlich grundsätzliche Bedingung, soweit generalplanerische architektonische konzeptionelle Vorstellungen nicht dagegensprechen.

### **Wie funktioniert das Konzept der vorgefertigten Sanitärzellen?**

Das ist auf jeden Fall sinnvoll, wenn die Zellen alle möglichst gleich sind. Aus unserer Erfahrung heraus beginnt der wirtschaftliche Einsatz allerdings erst ab 15 - 20 Wohneinheiten/ Bäderzellen. Mit weniger Wohneinheiten (Badzellen) ist es jetzt noch nicht wirtschaftlich. Wenn man allerdings ein Modell hat, dass vernünftig geplant ist, das man immer („serienmäßig“) einsetzen kann, kann es auch für kleinere Stückzahlen interessant sein. Da müsste man dann nur ein Augenmerk darauf haben, die Konzepte so zu gestalten, dass nicht zu viele Varianten entstehen. Bei zu vielen Varianten ist die Ökonomie an der Stelle tendenziell bedingt vorteilhaft...

### **Wie sehen Sie die Flexibilität der Häuser für zukünftige Umnutzungen und Umbauten?**

Die Flexibilität ist hier sehr gut gegeben, weil die Badzellen und Schächte zentral angeordnet sind. Dadurch kann man Trinkwasserleitungen oder Heizkörperanbindungen von dort aus gut an andere Punkte ziehen, eventuell auch über die Decke. So wäre auch ein Aufputzanschluss möglich. In diesem Projekt wurde auf Bodenaufbauten verzichtet, was durch die Aufputzinstallationen möglich ist. Dies kann allerdings ein ästhetischer Nachteil sein.

### **Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur der Häuser?**

Ich finde die Häuser schlicht und einfach. Man muss nicht tausend Varianten für die Wohnungen haben im einfachen Wohnungsbau. Für den Standardwohnungsbau ist es absolut angemessen. Möglichst gleiche Wohneinheiten sind wirtschaftlich (ökologisch und ökonomisch interessant), und gleichzeitig deswegen nicht unästhetisch.

### **In welches der drei Häuser würden Sie ziehen?**

Entweder in den Holz- oder den Ziegelbau. Der Holzbau ist sehr interessant und zukunftsfähig und hat den Vorteil, sehr kosteneffizient gute Wärmedämmwerte zu erzielen. Der Vergleich der Heizenergie wird interessant sein, wobei man die Nutzereigenschaften möglichst ausblenden muss. Im Holzbau kann es aufgrund fehlender Speichermassen zu Barackenklima kommen kann. Das ist hier im Projekt allerdings nicht gegeben, da es einen Kern aus Massivbaustoffen gibt. Interessant wäre eine Kombination Ziegelbau und Holzbau.

### **Anmerkung von IBS :**

Aus der Erfahrung aktueller Planungspraxis sowohl im Modulbau (z.B. Tiny-Häuser-Berlin); wie aber auch im Geschosswohnungsbau, haben wir die Erfahrung gemacht als übergreifende TGA- Planer und gleichzeitige Ersteller der Energiebewertungen als KfW- Effizienzhaus-Nachweisführer ( Kombinierte Planungsleistung als Energieberater und TGA- Planer) dass tatsächlich in der Gesamtbetrachtung Objekte mit Ausstattung von umfangreicher el. PV- Anlagentechnik , gesamtheitlich die besten Ergebnisse aus ökonomischer wie ökologischer Sicht erreichen können.

Also die somit erreichten KfW-40+ Häuser mussten im Vergleich sogar Dank der el. PV- Anlageneinsatzes weniger in der Gebäudehülle an Dämmaufwand betreiben als die

Vergleichstechniken. Womit beste ganzheitliche Ergebnisse (langfristige Betrachtung) bei Betrachtung von Invest- und Betriebskosten resultierten.

Fazit: Die grundsätzliche Energieversorgung bzw. die Wahl der Anlagen-Systemtechnik wird künftige grundlegende prioritäre Entscheidungsmomente auslösen

#### **Aus unserer Sicht aktuell somit:**

1. Ist Fernwärme (am besten regenerative Biomasse etc.) vorhanden, so ist die Systemtechnik wie in den Forschungshäusern abgebildet eine zukunftssträchtige Lösung.
2. Ebenso wäre alternativ statt- FW- eine eigene möglichst zentrale Biomasse- Heizanlage- wo möglich als Nahwärmekonzept- analog (bei gleicher Systemtechnik wie 1) einsetzbar.
3. Wenn beides nicht möglich, würden andere Konzepte vorrangig aus unserer Sicht greifen. Wie z.B.
  - A) Systemtechnik nur noch el. Infrarot- Strahlungsheizung mit dezentraler TWW- Bereitung mittels elektron. DLE; mit eigener Energiebilanzdeckung durch el. PV- Anlage , kombiniert mit el. Batteriespeichern
  - B) Oder, mit etwas höherem Invest ; gleiche Systemtechnik – jedoch Beheizung über hydr. komfortable FBH mit WP- Technologie als Wärmerezeuger.

Sicherlich könnte insofern ggf. auch im Sinne von Einfach Bauen ;

- ⇒ Als weiteren Schritt - zB die Forschungshäuser als KfW- Niedrigenergiehäuser ( KfW- Förderprodukte) abzubilden – interessant sein . Natürlich im Sinne von „ Einfach- Bauen“ bzw. um in diesem Feld bleiben zu können dabei wiederum nur wenn architektonisch einfache Kubaturen ( wie bei FH- hier gegeben) ; eine einfache unkomplizierte (mit wenigen Detailwärmebrücken) Dämmung abbilden lassen (Kerndämmung im Holzbau- WDVS im Massivbau)

Dies könnte sicherlich ein interessanter gesamtheitlicher Ansatz (Objektplaner und Systemtechnikplaner) sein.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 13.10.2020

**Befragter:** Achim Mantel

**Firma:** B&O Gruppe | B&O Bauholding GmbH

### **Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt**

Ich bin bei B&O Leiter von der (Abteilung) Forschung und Entwicklung. Das Projekt war eines von vielen, dass ich umgesetzt habe. Es bietet sich an: Die TU (München) baut Forschungshäuser, die B&O stellt die Grundstücke zur Verfügung, da war ich hier als Kernprojektleiter tätig.

Ich bin ziemlich früh in das Projekt eingestiegen. Ich war beim Erstlingsgespräch dabei, als Prof. Nagler bei Dr. Böhm vorstellig wurde, weil er 2017 keine Baugenehmigung für die Forschungshäuser in Garching bekommen hat. Er wollte es forcieren, dass er das Einfach Bauen umsetzen kann (Bauherrenvertreter LB/HM/MW).

### **Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

Das ist ein zweischneidiges Schwert. Was hier umgesetzt wurde im Sinne von Einfach Bauen ist erstmal eine Reduktion der Materialien als solche. Das ist erstmal ganz begrüßenswert. Die Thematik ist aber, da wir von B&O primär im sozialen oder kommunalen Wohnungsbau tätig sind, sind es nicht zwingend die kostengünstigsten Materialien. Da sitzen Engelchen und Teufelchen auf der Schulter: Einerseits ist es interessant, dass die Reduktion gelingt, andererseits hat es relativ wenig damit zu tun, was wir regulär im kommunalen Wohnungsbau umsetzen müssen. Prinzipiell ok, allerdings muss man ziemlich tief in die Details gehen, um so ein Produkt dann auch zu vermarkten. Wir haben immer auch den Vermarktungsaspekt im Vordergrund, die TUM hat eher den Forschungsaspekt im Vordergrund. Das sind zwei getrennte Themen.

Ganz interessant fand ich die Sache mit Beton, also das Betonhaus als Solches mit einem neuen Baustoff, bzw. einem relativ neuen Baustoff, da er ja eigentlich gar nicht auf dem Markt ist. Das hat ein gewisses Zukunftspotential, ist aber im Moment wirtschaftlich nicht umsetzbar. Leichtbeton kostet etwa des siebenfache von normalem Beton.

Das wirtschaftlich interessanteste ist das Holzhaus mit der Vollholzwand – im Prinzip eine Brettstapelwand (ist hier Brettspertholz gemeint?) die man landläufig baut. Ist ein erster Ansatz in die Richtung und hat den Riesenvorteil, dass man sich die ganze Dämmebene sparen kann. Das finde ich den interessantesten Aspekt überhaupt.

Das Ziegelhaus ist auch ein zweischneidiges Schwert, da der eingesetzte Ziegel eine viel zu geringe Dämmwirkung hat, um kommerziell ein KFW 55- oder KFW 70-Haus umzusetzen. Das

sehe ich eher als Vergleichsbaustoff zu den anderen zwei Baustoffen. Umsetzen würden wir immer gedämmte Ziegel, wenn wir in Ziegel bauen würden. Es macht keinen Sinn sonst, diesen Ziegel einzusetzen, weil eigentlich bräuchte er einen WDVS vorne dran. Das macht es dann wieder zu teuer.

### **Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?**

So groß sind die Unterschiede nicht. Die monolithische Wand – das Hauptaugenmerk, den wir gesehen haben – das wird ja auch immer mehr umgesetzt auch in der Industrie. Das, was am Interessantesten ist und neue Ideen reingebracht hat, war die Nicht-Verwendung von Verschattungsanlagen und dass man die Fenster innenseitig bündig aufsetzt. Das ist ein Gedankengang, den man durchaus weiter fortsetzen kann. Ein weiterer Punkt ist die Raumhöhe. Bis dato war immer das Bestreben, die Räume eher relativ niedrig zu halten, bei 2,625 oder 2,50 m oder noch niedriger. Die Rückkehr zu den relativ hohen Räumen mit um die 3 Meter, das finde ich ganz interessant und kommt auch bei Kunden gut an. Die Mehrkosten darüber sind nicht so exorbitant im Verhältnis zum restlichen Bauwerk. Das könnte durchaus ein interessanter Ansatz sein, dass man künftig vielleicht doch mehr hohe Räume umsetzt, die natürlich eine andere Lebensqualität und ein anderes Klimaverhalten aufweisen.

### **Hat sich ihrer Meinung nach der Bauprozess vereinfacht?**

In der jetzigen Phase wurde er nicht wirklich vereinfacht. Planerisch wurde versucht zu vereinfachen, aber wir haben dann letztendlich festgestellt, dass bei bestimmten Punkten, z.B. gerade beim Holzhaus, da gab es dann ein Problem mit der Abdichtungsebene. So wie es planerisch umgesetzt war, so kann man es letztendlich nicht bauen, weil es Abdichtungsprobleme gibt. Wir haben in Abstimmung mit Prof. Nagler zusätzlich eine Verblechung einbauen müssen insbesondere im Sockelbereich. Der Sockelbereich als solches ist eine gute Idee, dass man einen Spritzwasserschutz hat und relativ einfach die Thematik abhandeln kann, aber da muss man sich im weiteren Verlauf nochmal Gedanken machen, wie man es baulich umsetzt oder anders gestaltet. Wir haben es auf der Baustelle auch falsch gemacht, es ist aber falsch kommuniziert worden, es sollte eigentlich zuerst der Holzbau hingesetzt werden und die Aufkantung dagegen betoniert werden. Bloß das scheitert daran, dass man den Beton da irgendwie einfließen lassen kann, wenn der Holzbau oben drübersteht. Bei solchen Themen muss man einfach abstimmen, wie man es besser macht. Vielleicht dann im Bereich der Schürze mit Fertigteilen arbeiten. So wie es jetzt gemacht wurde, war es eher komplex und wir haben relativ viele Gedanken verschwenden müssen, wie setzen wir es tatsächlich baulich um. Das liegt vermutlich auch daran, dass die meisten Handwerker mit dieser augenscheinlichen Vereinfachung nicht ganz klargekommen sind. Weil die natürlich ihre DIN-Vorschriften und sonst was im Kopf haben: „Wie kriege ich das Gebäude dicht?“ „Wie kriege ich den Anschluss sauber ihn?“. Da ist sehr oft ein Konflikt aufgetreten: das ist aber nicht sach- und fachgerecht. Das war das tägliche Brot hier auf der Baustelle, dass die meisten Handwerker gesagt haben: „Ja, aber so kann man es ja nicht bauen, weil es nicht meiner Bauvorschrift entspricht.“

## **Hatten die Handwerker teilweise recht, oder wäre mehr Offenheit nötig gewesen?**

Das ist ein Konglomerat aus verschiedenen Dingen. Klar waren ein paar Dinge nicht ganz zu Ende gedacht. Die grundsätzliche Bereitschaft von den Handwerkern war da. Es gab nur zwei oder drei, die sich dagegen gesträubt haben. Die kann man prinzipiell vernachlässigen. Es war eher so, dass man die Leute wieder zwingen musste zu dem einfacheren Baustil bzw. zu den einfachen Handwerkstätigkeiten, die sie nicht mehr gewohnt sind. Das mussten sie wieder erlernen. Es fängt schon an beim Bodenverlegen. Das kennen die Leute gar nicht, dass man auf die Rohbetondecke – das kennt man maximal aus dem Sanierungsfall, aber nicht beim Neubau – ja wo ist denn hier die Dämmebene, warum macht man da keine Dämmebene hin. Geglätteter Flügelbeton, haben wir rumgestritten mit dem Nachunternehmer, „Ich muss aber trotzdem noch eine Ausgleichsmasse draufmachen“ – lauter so Sachen, wo die dann sagen, „handwerklich passt das nicht zu mir“.

## **Was ist die rechtliche Konsequenz?**

Diese Häuser gehen kommerziell in die Nutzung und werden vermietet. Ein Mieter hat bestimmte Grundrechte. Es wäre ein anderer Fall, wenn das Haus für einen privaten Nutzer zur Verfügung stehen würde. Dann akzeptiert er, dass es so ist, aber in dem Augenblick, wo ein Gebäude vermietet wird und Sie unterschiedliche Mietparteien haben, muss man Mindeststandard liefern, in irgendeiner Form eine Mindestqualität, da es gibt genug Mieter, die dann sagen, das ist eine Abweichung von der DIN, das akzeptiere ich nicht, ich will eine Mietminderung. Mit den Themen kämpfen wir jetzt herum.

Diese Reduktion und stellenweise Außerkraft-Tretung von bestimmten DIN-Regeln führt genau in diese Falle hinein, dass die Mieter unserer Gesellschaft, die die Häuser vermietet, sagen, das akzeptiere ich nicht, diese Abweichung von was auch immer, und mit Mietminderung reagieren.

Wir haben aktuell einen Fall, in dem es um Schallschutz geht. Wir haben Messungen gemacht, alles gut. Die Mieter gehen von erhöhtem Schallschutz aus, was die Gebäude allesamt nicht liefern. Sie liefern normalen Schallschutz. Dann war ja insgesamt eine komplette Reduktion vorgesehen, z.B. auch bei der Anzahl der Steckdosen. Es gab eine normale Steckdosenplanung, die ursprünglich am Standard an der Grenze war, was zulässig ist im Mieterwohnungsbau. Dann sind Prof. Nagler und Dr. Böhm nochmal durchgelaufen und wollten es noch mehr vereinfachen. Das Resultat war, dass der Mieter sagt, das sind ihm viel zu wenig Steckdosen. Es sind viele Kleinigkeiten, die auftauchen, wo es genau in diesem Bereich Mietverhalten Probleme gibt. So umsetzbar sind die Häuser im Mietgeschosswohnungsbau nicht, das ist Stand der Dinge jetzt. Allein was das Mietrecht betrifft.

## **Kann es sein, dass sich die Mieter – wie auch die Handwerker – erst an das Konzept Einfach Bauen gewöhnen müssen?**

Ja klar, natürlich, denen bleibt ja nichts anderes übrig. Wir haben jetzt fünf Mieter im Betonhaus und sechs Verträge, die geschrieben werden. Die haben natürlich entsprechende Hinweise im

Mietvertrag drin. Nichts desto trotz haben Sie von zehn Mietern einen, der rebelliert. Es trifft nicht auf alle Mieter zu, aber einer rebelliert massiv.

### **Würden Sie so ein Experiment noch einmal machen?**

Ja, aber in dem Sinne, dass wir an anderen Baustoffen Interesse haben. Beton würde komplett ausscheiden, es ist auch ein Riesenkostenthema. Da ist ein Haus hingestellt worden, das 1,5 Mio Euro gekostet hat, aber nur einen Sachwert von 800.000 Euro besitzt. Das ist ein Riesenproblem für uns. Nichtsdestotrotz würde ich es nochmal machen. Wir hätten dann aber den Fokus auf Kalksandstein. Dass man da vielleicht etwas Vereinfachtes macht. Mit Kerndämmung, mit Holzfaserdämmstoff oder in der Richtung. Das würde uns noch interessieren, wie da das Verhalten von dem Gebäude ist.

Wir haben Baurecht für drei weitere, und sind im Gespräch mit Prof. Nagler, dass er mit anderen Baustoffen mit einem überarbeiteten Entwurf ins Rennen geht. Wann auch immer die umgesetzt werden, das kann in einem Jahr sein oder zwei. Mein Chef möchte sie sogar relativ schnell umsetzen, um nochmal andere Bauweisen ausprobieren. Uns würde auch eine vereinfachte Holzständerkonstruktion interessieren, um einen Vergleich zur Vollholzwand zu haben, wie sich da das Verhalten darstellt.

### **Würden weitere Forschungshäuser auch der Einfach Bauen Strategie folgend realisiert werden?**

Ja, das durchaus. Die Grobprämissen laufen in die gleiche Richtung. Es ist durchaus publikumswirksam, Leute haben Interesse daran und sind auch zu Kompromissen bereit. Wir müssen allerdings die Grundrisse etwas optimieren. Wir haben jetzt im Entwurf einen relativ großen Eingangsbereich. Ich reite auf den wirtschaftlichen Themen herum, das ist mein Job. Es geht fast eine ganze Wohnung nur durch die Eingangssituation verloren. Wir haben jetzt ein Grundrissverhältnis von 65% (Nutzfläche zu Verkehrsfläche). Im Geschosswohnungsbau bauen wir eigentlich 80%-85%, damit es wirtschaftlich ist. In die Richtung würde ich das nächste Mal versuchen, Prof. Nagler hinzudrängen, dass man auch konzeptionell einen wirtschaftlicheren Entwurf macht einfach mit dem Hintergedanken wir haben durchaus vor, ähnliche Häuser in großem Stil umzusetzen. Da kann man die durchaus als Leuchtturmprojekte darlegen was möglich ist und dann entsprechend an den Markt anpassen.

Die Zusammenarbeit mit den Architekten hat viel Spaß gemacht, der Tilmann Jarmer hat sich sehr eingebracht, das war interessant. Wir haben allerdings auch gegen gewisse Windmühlen gekämpft, sowohl auf handwerklicher Weise – manchmal sind die Handwerker einfach losgerannt. Ich erinnere da nur ans erste Dach, da hat er alles nach Regeln der Kunst gemacht, und eigentlich war die vereinfachte Bauweise der Plan. Da bist du manchmal von Handwerkern vor vollendete Tatsachen gestellt worden, dass wir uns beide angeguckt haben und gesagt haben, das war jetzt eigentlich nicht der Plan. Aber gut, ist halt so.

### **Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur der Häuser?**

Die Architektur gefällt mir grundsätzlich. Ich kriege ja hier das feedback auf dem Gelände, da wird das Betonhaus ein bisschen als „Betonkirche“ verschrien. Das kommt gar nicht gut an in der Öffentlichkeit. Mir selber gefällt der Baustil, insbesondere mit den halbrunden Fenstern. Die Loggia, das haben wir nicht erkannt, weder die Architekten noch wir als umsetzende Firma, die Loggien kamen verdammt gut an. Beim nächsten Projekt würden wir alle Wohnungen mit Loggien ausstatten. Die haben einen echten Mehrwert und es sieht klasse aus. Wenn der nächste Bauabschnitt tatsächlich kommt, würden wir dafür sorgen, dass dort, wo es möglich ist, jede Wohnung eine solche Loggia bekommt.

**In welchem Haus würden Sie gerne wohnen?**

Ich persönlich würde den Ziegelbau vorziehen, wenn ich irgendwo einziehen würde. Das gefällt mir am besten. Es ist natürlich subjektiv und Geschmackssache. Es ist architektonisch auch schön mit Halbrundbögen.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 15.10.2020

**Befragter:** Thomas Huber

**Firma:** Huber Versorgungstechnik GmbH

**Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt:** Installation von Heizung, Lüftung und Sanitär in den Gebäuden Mauerwerk und Holz (Installation HLS HM/MW).

### **Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

Einfach bauen bedeutet für mich, dass ich mit wenig Materialeinsatz ein möglichst großes und komfortables Gebäude kriege. Es bedeutet mit wenigen Bauteilen den größtmöglichen Erfolg zu erzielen.

### **Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?**

Normalerweise verziehen wir unsere Leitungen im Bodenaufbau. Das ist für uns einfacher und schneller. Und bei diesem Projekt wurde viel an der Decke verlegt. Das war für uns ein Mehraufwand. Wir mussten immer auf die Leiter rauf. Wir haben da schon 30 % länger gebraucht. Am Boden kann man die Leitungen allein verlegen. Auf der Leiter braucht man immer einen Zweiten, der etwas hält oder etwas festmacht, sonst wird man nicht froh.

### **Die Heizkörper sind ja jeweils dicht am Hauptstrang an der Wand angebracht und nicht wie häufig üblich unter dem Fenster. Hat das Zeit gespart?**

Das hat natürlich schon Zeit gespart. Es gab aber wiederum einen Mehraufwand, weil die Heizkörper so hoch waren, brauchte man ein Leiter zum Setzen. Auch zum Entlüften.

### **Die hochformatigen Heizkörpern brauchen nur wenig Platz auf der Wand.**

Optisch gefällt mir das gut, die sind ja elegant, aber zum Entlüften braucht man halt immer eine Leiter.

### **Ist es aus ihrer Sicht ein Vorteil, dass sie keine Schnittstelle zum Estrichgewerk hatten.**

Nein, das ist für mich nicht unbedingt ein Vorteil gewesen. Ich habe normalerweise mit dem Estrich auch nichts zu tun. Ich lege meine Leitungen in der Dämmebene und dann bin ich ja weg. Also ich habe da auch nicht mehr oder weniger Stress

### **Was hat Ihnen Schwierigkeiten bereitet?**

Wir hatten Probleme die Fallleitungen über der Bodenplatte zu den Badzellen zu verziehen. Da haben wir fast zwei Tage nur den Beton weggestemmt, damit wir die Bögen einbauen konnten. Da muss man beim nächsten Mal eine große Aussparung um die Leitung herum lassen damit man hier noch mit Bögen ausgleichen kann.

### **Was könnte verbessert werden?**

Also, die Übergabestation in die Wohnung ist Top, weil ich nur einen Steigstrang habe. Man könnte schauen ob man die Küchen noch an die Badzelle bringen kann, so wie bei den 1-Raum-Wohnungen. Dann würde man pro Haus noch zwei Stränge sparen. Ob man es klassisch mit Estrich macht ist dann natürlich wieder eine Kostenfrage. Ich spare zwar Zeit aber Estrich und Dämmung kosten Geld und ich habe dann auch noch die Trocknungszeiten. Oder was ganz einfach wäre: Wenn ich eine Aussparung in Boden habe, die Bad und Küche verbindet. Dann Leitungen hinein und ausgießen. Dann habe ich mir den Weg oben herum über die Decke gespart.

### **Dann komme ich natürlich nicht wieder an die Leitungen heran, wenn mit Beton vergossen wird. Was meinen Sie wie lang so eine Leitung hält?**

Das ist Kunststoffverbundrohr, da spricht eigentlich nichts dagegen, dass das 50 Jahre hält.

### **Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur der Häuser, an denen Sie beteiligt sind? Würden sie dort einziehen?**

(Lacht) Die oberste Wohnung ist schon nicht schlecht, das würde mir schon gefallen. Von der Einteilung her, ist es halt nur etwas für zwei Leute. Für eine Familie habe ich zu wenige Zimmer, aber für zwei Leute würde es schon passen, weil es doch relativ großzügig ist. Die Deckenhöhe macht schon was her, das gibt ein gutes Gefühl. Das Ziegelhaus mit dem Putz das ist nicht so das Meine, das gefällt mir nicht unbedingt. Im Holz ist es okay, das Sichtholz: Das passt.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 23.10.2020

**Befragter:** Robert Steiner

**Firma:** B&O Gruppe | B&O Bau Bayern GmbH

**Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt:** Bauleiter beim Holzhaus und Ziegelhaus. Zusätzlich Fachbauleiter beim Rohbaugewerk im Mauerwerkshaus (Bauleiter Rohbau HM/MW).

### **Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

Einfach Bauen bedeutet, dass kostengünstig, ressourcensparend und mit kürzerer Bauzeit gebaut wird.

### **Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?**

Wir mussten uns stärker mit den Nachunternehmern abstimmen. Zum Beispiel beim Thema anerkannte Regeln der Technik. Wir mussten sie überzeugen, dass sie mitmachen. Manche haben Bedenken angemeldet, die mussten wir ausräumen. Man muss den Nachunternehmer auch verstehen, er muss ja die Gewährleistung geben. Wenn es nicht die anerkannte Regel der Technik ist, setzt er eine Bedenkenanzeige ab. Wir haben es dann immer versucht auszuräumen und erklärt, dass wir ein Forschungsgebäude haben und deshalb die eine oder andere Methodik ausprobieren wollen und deshalb anders bauen. Ein anderes Problem war, dass wir kunststofffrei bauen wollten. Manche Firmen hatten da bereits Material auf die Baustelle gebracht. Wir mussten also mehr kontrollieren und abändern. In den Fällen, wo es vorher gut abgestimmt war, lief es besser oder reibungslos.

**Es war also einerseits so, dass sie die Firmen überzeugen konnten, dass die gewünschte Bauweise trotzdem den anerkannten Regeln der Technik entspricht, es gab aber auch Fälle wo sie Bedenken nicht ausräumen konnten und die Firmen aus (Bauleiter)der Gewährleistung entlassen haben.**

Genau, es wäre dem Nachunternehmer gegenüber nicht fair gewesen, denn er hätte ja dafür geradestehen müssen. Und wir wollten an manchen Stellen eben wissen ob es geht. Und wenn es geht, dann ist es ja gut und wenn es nicht geht, dann würde man es eben in Zukunft ändern.

**Da würde mich jetzt konkret interessieren, bei welchen Fällen, sie Bedenkenanmeldungen durch die Firmen hatten.**

Das war zum einen der Schlagregenschutz bei der Holzfassade des Holzhauses.

**Das geht es um die 5 mm Fuge zwischen den senkrechten Schalbrettern?**

Ja, genau, das konnten wir abwenden. Dann ging es um die Abdichtung unten an den Türen, da waren sie ja auch dabei. Da hat er Bedenken angemeldet, die wir nicht ausräumen konnten. Das Dritte Thema, das kam ja aus unserem Haus, war die fehlende Dachentlüftung. Der Zimmerer hat dort wegen möglicher Schimmelstellen oder Feuchteschäden an seinem Dach Bedenken angemeldet.

**Zur Erklärung für die Leser\*innen: Die Leitungen der Abluft und die Entlüftung der Falleleitungen wurden nicht durch die Dachabdichtung geführt, sondern endeten im durchlüfteten Dachraum direkt unter dem Dach. Dadurch konnten die Durchdringungen und damit auch Schwachstellen für das Dach vermieden werden. Dort kam es also zur Diskussion, ob nun über diese Leitungen zu viel Feuchtigkeit in den Dachraum eingetragen wird.**

Feuchtigkeit und auch die Gase, die aus einer Falleitung aufsteigen. Aber durch den Einsatz eine Verschlusskappe auf dem Fallrohr, die sich nur im Bedarfsfall öffnet, konnten wir auch diese Bedenken ausräumen. Außerdem ist der Dachraum, durch die Öffnung nach beiden Seiten, ja ausreichend belüftet.

**Gab es noch andere Probleme?**

Wir hatten noch Pech mit dem Wetter. Beim Aufstellen vom Holzhaus mussten wir viel Abdecken.

**Das ist aber beim Holzbau immer ein Problem, dass man wetterabhängig ist. Durch die Kombination Holzwände und Stahlbetondecke wurde das allerdings noch erschwert.**

Ja, klar. Während die Wände aufgestellt werden, kann der Stahlbetonbauer nicht arbeiten. Wenn er dann wieder arbeiten kann, hat er aber vielleicht auch schon eine andere Baustelle, muss aber auch beim Projekt noch zwei Tage die Decke einbauen. Dann braucht der Holzbauer wieder ein Fenster mit gutem Wetter. Aber: das ist halt ganz normale Baustelle.

**Wie lang hat der Bau von Holzhaus und Mauerwerkshaus jeweils gedauert?**

Vier Monate bei beiden.

**Das ist eine gute Zeit für ein dreigeschossiges Wohngebäude.**

Es haben aber auch mehrere Gewerke gleichzeitig gearbeitet, etwas was man möglichst vermeidet. Wenn z. B der Putzer gleichzeitig arbeitet mit dem Installateur, dann muss man die Rohre, insbesondere die Trinkwasserleitung, schützen, darauf achten, dass die Stöpsel auf allen Leitungen sind. Da verträgt sich der Staub nicht so mit der Frischwasserleitung.

**Das heißt, wenn man die Überlagerung der Baufolgen vermeiden will, dann hätte es noch etwas länger gedauert, oder?**

Im Ziegelhaus hatten wir die Fenster noch nicht drin. Trotzdem haben wir aber, um den Bauzeitenplan einzuhalten, den Estrich im Erdgeschoss vergossen. Und ohne Außenputz und ohne Fenster ist es beim Ziegel schlecht, da regnet es auf die Wetterseite drauf und die Feuchtigkeit zieht dann durch die Wand durch. So mussten wir den Estrich trocken.

### **Das Dach war ja auch noch nicht drauf.**

Aber die Decke über dem letzten Geschoss war abgedichtet. Aber trotzdem hat die Holzfaserdämmung unter dem Estrich Wasser gezogen. Es kam dann dazu, dass wir diese trocknen mussten. Aber da gibt es ja Gegenmaßnahmen und es war dann am Ende doch nicht so schlimm.

**Dass die Fenster nicht rechtzeitig eingebaut waren, war ja mir der verspäteten Lieferung begründet. Aber was würden sie sagen, wie lang wäre die Bauzeit, wenn ein Gewerk nach dem anderen arbeiten würde.**

Zwei Monate mehr. Also ein halbes Jahr. Genau. Weil wir ohne Keller gebaut haben. Mit Keller noch mal einen Monat mehr.

### **Gibt es Möglichkeiten der Verbesserung?**

Die Position der Abwasserleitungen die in der Bodenplatte vergossen sind, hat nicht immer genau zu den Anschlüssen der Badzellen gepasst. Da reichen schon wenige Zentimeter. Deshalb mussten wir die Bodenplatte dort aufstemmen um die Leitung im Estrich zur richtigen Position zu verziehen.

**Ihr Kollege Herr Mantel hat damals schon das Problem vorhergesehen und vorgeschlagen, einen Schacht um die Leitungen freizulassen und diese dann später zu vergießen.**

Naja, ein Schacht wäre schon gut. Das wäre in Zukunft besser. Beim Holzhaus könnte man bei den Betondecken noch verbessern. Der Ortbetonverguss – das waren ja fast 130 Tonnen Beton – hat die Abschalung am Deckenrand etwas verdrückt. Auch die Maschine, die die Oberseite der Decke geglättet hat, hat am Rand die Abschalung weggedrückt. Das haben wir bei der Decke über dem Erdgeschoss schon gesehen und haben es bei den nächsten zwei Decken versucht, zu verbessern, haben die Abschalung besser festgeschraubt, aber trotzdem: An verschiedenen Stellen hat es die Abschalung trotzdem verdrückt, was zur Folge hatte, dass man die Unterkonstruktion der Außenschalung erst ausrichten musste. Das hat uns ungefähr eineinhalb Wochen gekostet.

**Ja, diese Kombination aus Rohbau und Holzbau an der Decke, das ist ein Punkt, wo wir noch stark optimieren müssen.**

Zum Beispiel eine Fertigteildecke, das wäre da schon besser. Hohlkammerdecken. Dann drückt keine Last mehr auf die Abschalung. Da braucht man aber einen Estrich. Und wenn wir

gerade schon mal beim Ortbeton sind: Wir müssen auch die Betonwände mit Folie schützen, damit die Betonschlämme uns da nicht drauf läuft. Vor allem da die Oberflächen der Innenwände, ja nicht später verkleidet wurden. Die Folie darf aber auch nicht zu lang drauf bleiben, da sich sonst dahinter Schlieren bilden. Wir mussten am Ende alle Schlieren und Verunreinigungen mit einem Trockenbauschleifer wieder abschleifen. Jetzt sieht man kaum noch etwas.

**Ja, die fertige Sichtqualität der Wände und die Tatsachen, dass dann oben drüber eine Betondecke gegossen wird, das ist keine optimale Kombination.**

Sogar beim Ziegelhaus. Dort wurden die Innenwandflächen mit Kalk geschlämmt, dort kam auch kein Anstrich drauf. Man muss es Jedem mitteilen, sonst werden die Wände vollgeschmiert. Mit Höhenrissen oder Ähnlichem. Man muss allen sagen: „Zuerst Klebeband oder Malerkrepp auf die Wand und dann erst Anzeichnen“. Das war im Holzhaus einfacher, da hat jeder gleich mitgedacht. Im Ziegelhaus denkt jeder: „Da kommt noch Anstrich drauf“.

**Das heißt, es könnte passieren, dass wir die Wand noch anstreichen müssen.**

Ja, wir haben jetzt mit einer ganz feinen Kalkschlämme darüber geschlämmt, dann kriegen wir das schon weg. Aber es ist natürlich ein zusätzlicher Aufwand. Bei der Loggia im Holzhaus haben wir noch Probleme mit der heißgeschweißten Abdichtung gehabt. Eine kaltgeschweißte wäre da besser. Sonst verkohlt das Holz durch die Gasflamme der Abdichtungsarbeiten.

**Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur. In welches Haus würden sie gern einziehen?**

Obwohl ich Maurer gelernt habe, gefällt mir das Holzhaus am besten. Das Ziegelhaus schaut von Innen gut aus. Die Kalkschlämme gefällt mir gut, aber das Holzhaus macht noch mehr her. Von der Haptik ist es das Schönste. Man merkt die Wärme von den Wänden. Der Beton und das Mauerwerk fühlen sich kühler an.

**Das sehe ich auch so. Ich glaube es fühlt sich natürlich warm an, es hat aber vielleicht auch etwas mit der Akustik zu tun. Ich habe das Gefühl, das Holzhaus klingt auch angenehmer, wenn man dort im Raum steht und sich unterhält. Es könnte sein, dass das auch zu dem warmen Gefühl beiträgt, weil der Raum „wärmer“ klingt.**

Es ist das Beste der Forschungshäuser.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

Vielen Dank und bis zum nächsten Mal!

Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 15.10.2020

**Befragter:** Andreas Reßle

**Firma:** H.R.W. Vollholzwandsystem Obb.

**Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt:** Zimmererarbeiten am Gebäude Holz: Außenwände, Innenwände und Dachstuhl. Zimmererarbeiten am Gebäude Leichtbeton: Dachstuhl (Zimmerer HM und Dachstühle).

### **Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

So effizient und einfach wie möglich zu bauen. Wie unsere Wand zum Beispiel: Ein Element das nur aus einem Material besteht und die sich ohne weitere Nacharbeiten aufrichten lässt. Dadurch kommt man auch mit den Lohnkosten herunter.

### **Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?**

Die Betondecke, die die thermische Speichermasse ins Haus hereinbringt, war eine Besonderheit. Ansonsten war es für uns ein übliches Projekt.

### **Was hat Schwierigkeiten bereitet?**

Durch die große Raumhöhe mussten wir die Bauteile horizontal stoßen. Dadurch hatten wir mehr Teile und es hat deshalb etwas länger gedauert.

### **War die Konstruktion einfacher, zum Beispiel dadurch, dass es keine Einbauteile in den Wänden gab? Habt ihr üblicherweise noch mehr Gewerke parallel auf der Baustelle?**

Üblicherweise kommt am zweiten Tag der Fensterbauer und fängt im Erdgeschoss schon an, die Fenster einzubauen. Wenn wir mit dem Dach fertig sind, ist dieser dann schon so weit, dass er die Fenster im Obergeschoss einbauen kann. Parallel ist außerdem der Elektriker vor Ort, der zum Beispiel im Dach die Leuchtenkabel in der Dämmebene verlegt. Ein paar Tage später kann die Wasser- und Elektroinstallation beginnen.

### **Ist das jetzt etwas, dass Du als störend empfindest oder ist das das übliche Geschäft für Dich?**

Durch die freistehenden Wände, die wir mit Streben absichern mussten, bis die Decken darauf betoniert wurden, brauchten wir mehr Platz. Somit wäre es dort schwierig geworden, wenn noch andere Firmen zeitgleich gearbeitet hätten.

### **Es hat also den Prozess nicht einfacher gemacht?**

Nein eher nicht. Der Betoniervorgang hat doch dazu geführt, dass wir die Wände danach noch einmal schleifen mussten, um zum Beispiel Wasserflecken oder Betonreste zu entfernen. In derselben Zeit hätten wir eigentlich auch schon die Decken legen können. Das ganze Gebäude hätten wir so in sechs Tagen bis zur Decke über dem 2. Obergeschoss aufrichten können.

**Wie könnte man das beim nächsten Mal verbessern?**

Wenn man auf den thermischen Speichereffekt der Betondecken nicht verzichten möchte, müsste man eine dünne Platte einbauen die als verlorene Schalung unter der Betondecke verbleibt. Dadurch habe ich auch die Wände schon mit einander verbunden und der Kubus hält insgesamt schon besser zusammen. Auch wäre es gut, wenn die Stockwerke maximal drei Meter hätten, weil der Transport dann einfacher wird, da man ohne Überbreite auskommt. Wir haben bei diesem Projekt 3,15 m Transportbreite gehabt. Deshalb brauchten wir eine Sondergenehmigung und Polizeibegleitung durch den Ort. Das geht, ist aber ein Aufwand.

**Wie gefällt Ihnen persönlich die Architektur des Hauses, würden Sie da einziehen?**

Ich persönlich bin ein Bauernhausstilverfechter (lacht). Aber die Architektur ist für einen Geschosswohnungsbau gelungen. Die Aufteilung der Wände ist sehr einfach, (so wie es ja auch sein soll). Das Treppenhaus in der Mitte und dann einfach gerade Linien einbringen. Die kann man durch die Möbelstellung selbst gestalten.

**Dann kann man sich den Bauernhausstil dann nachträglich noch hineinbauen...**

Bauernhausstil meinte ich jetzt mehr so von außen.

**Florian Nagler war am Ende der Meinung, man hätten den Dachüberstand auch noch etwas größer machen können.**

Ja unbedingt! Weil es ja auch konstruktiv etwas bringt.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 6.10.2020

**Befragter:** Thomas Mayr-Schütz

**Firma:** Schreinerwerkstätten Mayr-Schütz, Arnbach

**Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt:** Tischlerarbeiten am Gebäude Leichtbeton: Außenfenster und -türen, Innentüren, Treppengeländer, Klappen vor den Verteilerkästen in den Wohnungen (Fenster/Türen LB).

### **Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

Ich verstehe darunter, dass man mit reduziertem Materialaufwand, reduzierter Detailausbildung arbeitet. Ich verstehe da ein ehrliches Bauen darunter – man darf ruhig sehen, wie etwas entstanden ist. Soweit zur Theorie. In der Praxis ist es leider so: Je einfacher es am Ende immer aussieht, umso mehr Aufwand ist meistens notwendig, dass es tatsächlich so wirkt. Es ist meistens so: wenn man etwas einfach baut und es wirklich einfach macht, dann wirkt es leider relativ schnell billig oder es entspricht nicht den gesetzlichen Vorgaben. Im besten Fall ist einfaches Bauen eine Material- und Bauehrlichkeit, die sich zeigt.

### **Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?**

Ja, der ganze Bau war natürlich eher ein experimentelles Herangehen, aber das war ja auch gewünscht und vorgegeben durch die Materialien, durch die Konstruktionsarten. Es wurden sehr viele individuelle Lösungen gefunden, die auf den Bau speziell abgestimmt wurden.

### **Sehen Sie darin Vorteile?**

Ja, allerdings denke ich: Damit diese tatsächlich zum Tragen kommen, müsste man wahrscheinlich serieller bauen. Ich würde mal behaupten: Wenn man noch einmal so ein Haus bauen würde – bei uns war es ja das Betonhaus mit den Rundbogenfenstern – dann würde es tatsächlich schneller funktionieren und man könnte auch Kosten einsparen.

### **Hat sich ihrer Meinung nach der Bauprozess vereinfacht?**

Bei dem Experimentalbau tatsächlich weniger. Das, was man sich auf der Baustelle gespart hat, hat man vorher in sehr viel Planung und Vorbereitung investiert. Beispielsweise bei den Fenstern: Man hat sich natürlich dadurch, dass mit Fensteranschlag und Kompriband gearbeitet wurde, die Putzarbeiten oder eine Verleistung oder Abdichtung gespart. Dafür haben wir vorher viel Zeit investiert um herauszufinden: Wie kriegt man es – obwohl es eine Sonderkonstruktion ist – hin, dass es am Ende schlagregendicht ist. Und wie schaut es am Ende noch ordentlich aus. Wir hatten einen Anschluss der absolut präzise ausgeführt werden musste. Im

„klassischen“ Fensterbau, wenn da noch einmal eine Anputzschiene und Putz drüber kommt, dann kaschiert das natürlich einiges. Ob das Fenster jetzt zwei Millimeter weiter rechts oder links sitzt, wird mit dem Putz natürlich überdeckt. Wenn man mit einer Schattenfuge arbeitet, muss man bei der Montage sauberer arbeiten.

### **Was hat Ihnen Schwierigkeiten bereitet?**

Die Hauptschwierigkeit waren die Bautoleranzen. Nicht dass es Missverständnisse gibt, die Rohbaufirma hat überdurchschnittlich gut gearbeitet. Aber trotzdem haben wir Toleranzen im Millimeterbereich, während es beim Rohbauer fast im Zentimeterbereich liegt. Hier hat man schon gemerkt, dass hier ein Einbau mit gleichen Fugenmaßen auf allen Seiten, eine große Herausforderung war.

### **Wurden die Fenster nach Aufmaß gefertigt?**

Nein, wir haben nach Plan gefertigt. Der Rohbauer ja auch. Aber seine Schalung war eben ab und zu mal etwas verdrückt oder verrutscht. Wie gesagt, gegenüber der üblichen Rohbautoleranzen war es gut, aber es ist natürlich klar: Er füllt den Beton ein und wenn sich da etwas ein bisschen bewegt, dann kann er das nicht mehr ausgleichen. So ist es halt passiert, dass die vertikale Fuge oben mal 10 mm ist und unten 15 mm, denn ich muss meine Fenster ja weitgehend senkrecht einbauen, damit die Beschläge funktionieren und die Flügel nicht von allein aufgehen oder zufallen.

### **Was könnte verbessert werden?**

Das ist tatsächlich relativ schwierig, weil irgendwo alles Handarbeit ist, was auf der Baustelle entsteht. Wenn so etwas seriell gefertigt wird, könnte man sich vielleicht überlegen, ob man ein Schalungssystem entwickelt, das in sich stabiler ist und sich noch besser in der Schalung verankern lässt. Wobei man sagen muss, das Haus lebt natürlich auch davon, dass der Infralichtbeton von Haus aus eine Struktur hat. Wenn man durch das Haus geht, fällt es deshalb vielleicht gar nicht so auf, wenn die Fuge nicht völlig gerade nach unten läuft. Muss bei der Oberflächenhaptik auch gar nicht unbedingt so sein.

### **Mich würde noch interessieren, welche Erfahrungen sie mit den Materialeigenschaften des Infralichtbetons bezüglich einer Befestigung der Fenster gemacht haben.**

Die Befestigung hat überraschend gut funktioniert. Da hätten wir im Vorfeld gemeint, dass wir da stärker drauf achten müssen. Weil es da natürlich keine Werte gibt, wie man darin etwas befestigen kann, haben wir einen Auszugsversuch gemacht und haben sicherheitshalber Schrauben verwendet, die etwas länger waren und dadurch noch tiefer in den Beton verankert sind.

Was Schwierigkeiten gemacht hat, waren die Ausbrüche, die hier und da in den Leibungen beim Ausschalen entstanden. Das war dann für uns eine Herausforderung, die äußere schlaglegendichte Abdichtung trotzdem sauber hinzukriegen.

**Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur der Häuser/ des Hauses, an dem Sie beteiligt sind?**

Ich habe da einen etwas anderen Blickwinkel drauf, da ich ja selber Architektur studiert habe. Also, mir gefällt's. Ich finde auch die Kombination von dem rustikalen Beton und der Lärche dazu gut. Das ist ja fast schon klassisch. Der Kommentar von meinem Meister war: „Wenn die ersten Mieter hier wieder ausgezogen sind, wie werden da sie Wände ausschauen...“. Andererseits bekommt so ein Gebäude auch eine gewisse Patina. Wenn in einer weißen, glatten Wand ein Loch ist, dann wirkt das störend. In einer Betonwand, da gehört das irgendwo zum Leben. Ich vergleiche das immer so ein bisschen mit Parkett und Laminatboden. Wenn wir jetzt irgendwo einen Laminatboden haben und der hat einen Kratzer, dann ist er kaputt. dann schaut da irgendwie so eine braune Pressspanplatte heraus. Wenn ein Parkett irgendwo einen Kratzer hat, dann gehört das halt einfach mit zur Patina. Wenn dann noch zwanzig weitere Kratzer drin sind, dann lebt er erst so richtig. Dann kriegt er halt den Charme, den die Parkettböden in Altbau haben. Da stört sich ja auch keiner dran, dass das Parkett nicht spiegelblank poliert ist; da gehört es ja dazu, dass der Boden schon mal ein Leben gehabt hat, wenn da schon eine Geschichte erzählt wird.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 6.10.2020

**Befragter:** Martin Watzlowik

**Firma:** Baugeschäft Martin Watzlowik, Brannenburg

**Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt:**

Rohbauarbeiten am Gebäude Leichtbeton: Bodenplatte mit Stahlfaserbeton, Außenwände mit Infraleichtbeton unbewehrt, Innenwände mit Normalbeton unbewehrt, Decken mit Stahlfaserbeton.

Rohbauarbeiten am Gebäude Holz massiv: Bodenplatte mit Stahlbeton, Decken mit Filigrandecken, Bewehrung und Aufbeton (Rohbau HM/MW).

**Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

Es ist ein Pluspunkt, wenn man möglichst wenige Baustoffe für unterschiedliche Bauteile verwenden kann. Bodenplatte, Außenwände, Innenwände und Decken waren beim Betonhaus alle in Beton. Das ist ein Vorteil, weil man weniger Baustoffe verwendet hat, das heißt es musste nur Schalung vorgehalten werden, also keine anderen Gerätschaften für Ziegel und so weiter. Dann würde ich sagen: Wenn Konturen und die Grundrisse symmetrisch sind, also nicht mit Ecken und Kanten, spitz- und schiefwinkligen Sachen, wenn die Geschosseinteilungen übernommen werden, also Erdgeschoss und Obergeschoss alle gleich. Es ist auch ein Vorteil, wenn die Tragwände alle passen und stimmig sind, dass erleichtert die Statik der Decken. Wenn dass alles gegeben ist, dann kann man einfach bauen.

**Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?**

Wir hatten bei diesem Bauprozess – sprich Musterhaus – Punkte die ein bisschen extravagant sind, z. B. hatten wir sehr viele Kontrollen, Überwachung und Dokumentationen – die auch gewünscht und erforderlich waren – wegen des neuartigen Infraleichtbetons. Und dann war noch ein bisschen eine Schwierigkeit bei der Disposition der Lieferung vom Infraleichtbeton, da das Betonwerk nicht in der Gegend war, hat sich das unterschieden gegenüber anderen Bauvorhaben

**Was haben Sie üblicherweise für einen Vorlauf, wenn sie eine Betonlieferung bestellen?**

Wenn es gut geht, stündlich oder höchstens einen Tag. Wenn ich früh um 7 Uhr im Betonwerk anrufe und sage ich brauche am Nachmittag einen Beton: Meistens klappt's. Beim Infraleichtbeton brauchten wir im Unterschied dazu ca. eine Woche Vorlauf.

### **Wo sehen Sie Vorteile?**

Es waren keine Abstimmungen mit anderen Gewerken nötig, weil: Die waren ja am Bau noch nicht relevant, die mussten noch nicht kommen, irgendwelche Leitungen verlegen und so weiter: Das war eine Vereinfachung. Das gleichzeitige einsetzen der Bäder habe ich ganz toll gefunden. Das erleichtert dann den Ausbau. Das betrifft mein Gewerk zwar nicht, ist aber für den gesamten Baufortschritt ein Vorteil.

### **Hat sich ihrer Meinung nach der Bauprozess vereinfacht?**

Der hat sich mit Sicherheit vereinfacht, da der Bauablauf nicht durch andere Gewerke unterbrochen wurde. Und dadurch, dass es – außer wenigen Decken- und Wanddurchbrüchen – keine Einbauteile gab, haben sich auch die Nacharbeiten reduziert.

### **Was hat Ihnen Schwierigkeiten bereitet?**

Die Konsistenz des Betons; Wir mussten alles absolut abdichten an der Schalung, weil dieser teilweise sehr dünnflüssig war. Beim Verdichten hat es ein bisschen Schwierigkeiten gegeben. Wir haben eigentlich alle Verdichtungsmöglichkeiten versucht – also Flaschenrüttler und Außenrüttler – aber ein Unterschied, war beim Verdichten nicht erkennbar. Wir haben dann auch ohne Verdichten eingebaut. Wenn die Lieferkette passt und der Beton Zug in Zug kommt, dann ist das schon in Ordnung, dann schaut das gut aus. Aber wenn da ein gewisser Zeitraum dazwischen ist und man will die Betonierfuge verbinden bzw. dafür sorgen das keine Fuge entsteht, dann war das mit den genannten Verdichtungsverfahren nicht möglich. Die Kranbeschickung mit dem Kübel hat kein Problem dargestellt, nur wenn dann kein Beton mehr auf der Baustelle war, weil die nachfolgenden Mischer nicht gekommen sind, ist das Absitzen des Betons so schnell gegangen, dass der Beton schon abgebunden hatte, sodass der Beton der nach einer halben oder einer Stunde draufgekommen ist, sich dann nicht mehr mit dem Bestehenden vermischt hat.

Dann habe ich noch einen Punkt: Die Außenflächen der Außenwände haben wir mit unbehandelten Rauhpundbrettern belegt. Da war die Saugwirkung unterschiedlich und da haben wir schon einen Mangel an der Oberflächenstruktur gehabt. Also irgendwie müssten wir da auch noch was finden: Entweder gar keine Bretter mehr – gut dann hat man halt keine Struktur mehr, wenn man es glatt macht – oder diese Bretter doch vorab behandeln. also einölen oder mit Kalk vorher behandeln, sodass die Saugwirkung gleichmäßiger wird.

Noch einen Punkt habe ich: Diese Schalungen der Rundbogenfenster und Türen mit den Anschlagwinkeln. Das war natürlich sehr aufwändig. Und es verzeiht auch keinen Fehler. Wenn man da einen Fehler macht, dann kann man auch nicht nacharbeiten, wie bei einem Ziegelhaus. Beim Ziegelhaus bricht man halt schnell nach und putzt hin.

### **Was könnte verbessert werden?**

Verzicht auf die Rundbogenschalung, also einfach ein gerader Sturz. Das wäre eine Kostenersparnis bei meiner Schalung, aber mit Sicherheit auch bei den Türen und Fenstern vom Schreiner, oder?

**Man müsste dann auf rostfreie Bewehrung über dem Sturz zurückgreifen.**

Das wäre dann die Konsequenz, wenn man einen geraden Sturz macht. Das ist richtig. Und einen Punkt zur Verbesserung habe ich dann noch: Ortsnahe Betonwerke einbinden! Es muss halt irgendwann die Möglichkeit bestehen, dass andere Betonwerke diesen Infraleichtbeton auch herstellen, das wäre von Vorteil.

**Es gibt inzwischen Hersteller, die dann vor Ort mit mobilen Mischwerken operieren und somit den Beton direkt auf der Baustelle herstellen können.**

**Wie hat eigentlich der Stahlfaserbeton in den Decken und der Bodenplatte funktioniert. Wäre das etwas, was sie zukünftig auch wieder machen würden?**

Ja, wir haben das vorher schon gemacht. Das gibt es bei uns schon zwanzig Jahre. Da war das einmal groß „In“, da haben wir ganze Keller damit gemacht. Aber irgendwie ist man dann wieder davon abgekommen. Ich weiß nicht ob das preislich bedingt war oder weil es statisch schwer nachzurechnen ist. Decken haben wir noch nie gemacht, das war das erste Mal. Also das ist auf alle Fälle ein Punkt, den man beibehalten kann, das ist Arbeitserleichterung. Ganz klar!

**Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur des Hauses, an dem Sie beteiligt sind?**

Die Architektur ist sehr stimmig. Sie ist zeitlos von der Form und der Struktur und unterliegt keinen Modetrends – Kann man immer bauen. Kann man in der Stadt machen, kann man auf dem Land machen. Ist nicht auffällig, passt überall rein.

**In welches der drei Häuser würden sie einziehen?**

Ich bin ein bisschen altbacken – ich würde in das Ziegelhaus einziehen. (lacht) Wir sind bei uns in Bayern auf ein Ziegelhaus fixiert. Bei uns gibt es Lehmgruben, deshalb ist der Ziegel seit jeher der Favorit.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

## Fragebogen zur Erfahrung im Bauprozess

**Datum:** 8.10.2020

**Befragter:** Dr. Robert Lukas

**Firma:** Heidelberger Beton GmbH / Betotech Baustofflabor GmbH

### **Tätigkeit/ Beteiligung am Projekt**

In meiner Eigenschaft als Bereichsleiter bei Betotech Baustofflabor GmbH und Leiter Qualität bei der Heidelberger Beton GmbH bin ich für die Produktqualität und die Betonüberwachung zuständig. Wir betreuen labortechnisch das Produkt Infraleichtbeton, was ja ein ganz spezielles Produkt ist, dessen Verwendung eine Zustimmung im Einzelfall oder eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erfordert.

Ich war relativ früh in das Projekt eingebunden. Ich habe den ersten Kontakt mit dem Architekturbüro Nagler gehabt, das ja die Planung übernommen hat. Das Architekturbüro hat mich relativ früh schon kontaktiert und nach dem Produkt gefragt und sich informiert über die Produkteigenschaften und das Prozedere, also die weitere Vorgehensweise zum Einsatz dieses Produktes. Da war ja auch Vorlauf notwendig, um die erforderlichen formellen Hürden zu nehmen.

### **Was verstehen Sie unter dem Begriff Einfach Bauen?**

Einfach Bauen ist für mich „zurück zu den Wurzeln“, mit nicht übermäßig großem technischem und finanziellem Aufwand ein Gebäude zu erstellen, das keinen unnötigen Schnickschnack aufweist, sondern die wesentliche notwendige Gebäudetechnik aufweist, die im Zuge der Nutzung wichtig ist. Von der Baustoffseite würde ich unter Einfach Bauen verstehen, auch da zurück zu den Wurzeln. Beton ist ja ein uralter Baustoff, der Tradition hat, ein natürlicher Baustoff mit natürlichen Ausgangs- und Rohstoffen, der schon bei den Römern Verwendung gefunden hat. Daher ist es nur konsequent, dass bei Einfach Bauen auch die Betonbauweise zum Einsatz kommt, hier als besonders innovativer Spezialbeton, dem neuartigen Infraleichtbeton.

### **Wo sehen Sie Vorteile bei der Verwendung des Infraleichtbetons im Zuge von Einfach Bauen?**

Hier zeigen sich die einmaligen Vorzüge des Baustoffs Beton deutlich: Infraleichtbeton ist zum einen in der Lage, tragend, also statisch wirksam zu sein. Gleichzeitig weist er dämmende, also isolierende Eigenschaften auf. Und der dritte Vorteil, der den Beton auszeichnet, ist, dass er auch erhöhte gestalterische Anforderungen erfüllt, also auch ästhetisch ansprechende

Oberflächen bietet – Stichwort Sichtbeton. In meinen Augen ist Infraleichtbeton ein idealer Baustoff.

### **Was unterscheidet den Bauprozess von anderen Bauvorhaben?**

Es war insofern anders, als auch der Bauprozess einfacher war. Die Wände werden geschalt, der Beton wird eingefüllt, und damit ist die Außenwand fertig. Da muss nicht mit Dämmung zusätzlich gearbeitet werden, also mit in ihrer Nachhaltigkeit problematischen Isolierschichten. Es ist ein einzigartiger Baustoff, der zu 100% recyclingfähig ist. Er wird im Fahrmischer fix und fertig auf die Baustelle geliefert – verarbeitungsfertig und komplett ohne dass Verpackungsmüll oder Abfall entsteht. Natürlich sind auch im Bauprozess mit Transportbeton Vorarbeiten notwendig. Planerisch müssen die Elektro- und sonstige Installationen vorgesehen und realisiert werden. Ansonsten ist das Betonieren vor Ort ein einziger Arbeitsgang und der Rohbau kann in kurzer Zeit in Massivbauweise komplett fertig erstellt werden.

### **Gab es bei der Verwendung von Infraleichtbeton Schwierigkeiten?**

Nein, ich meine, die Verwendung von Infraleichtbeton bietet nur Vorteile. Die runde Form der Fenster sehe ich beispielsweise als Vorteil. Welcher andere Baustoff lässt sich in jede beliebige Form bringen? Insofern schalbar, kann man Beton und natürlich auch den Infraleichtbeton in jede beliebige Form gießen, wo er erhärtet und damit die gewünschte Form annimmt.

Einen erhöhten Aufwand gab es lediglich im Vorfeld, da das deutsche Baurecht für den Infraleichtbeton eine Zustimmung im Einzelfall vorsieht. Das resultiert aus der Tatsache, dass dieser spezielle Beton noch günstigere Werte aufweist als die Norm abdeckt, sprich eine höhere Wärmedämmung als „Normenbeton“ besitzt. Er weist eine geringere Rohdichte auf als die normativ geregelten Leichtbetone. Aber auch die Zustimmung im Einzelfall bei der Obersten Baubehörde konnte ohne Schwierigkeiten erwirkt werden.

### **Wie beurteilen Sie die Verarbeitbarkeit des Infraleichtbetons?**

Der Infraleichtbeton ist aufgrund seines Zusammenhaltevermögens und seiner verarbeitungsfreundlichen Konsistenz sehr gut verarbeitbar. Natürlich gilt für den Infraleichtbeton wie für jeden konventionellen Beton: Schalung und Schalungsstöße müssen dicht ausgebildet sein. Der Kontakt nach unten zur Decke und zur Bodenplatte muss dicht sein und ggf. ausgeschäumt werden. Das ist handwerkliche Arbeit, die muss im Vorfeld durch den Einbauer bzw. die Bauunternehmung gemacht werden. Der Infraleichtbeton kann problemlos mit Krankübeln eingebaut werden. Der Vorteil ist, man kann ihn sowohl mit Innen- als auch mit Außenrüttlern verdichten. Das ist hier gemacht worden. Die ersten Musterwände sind mit Innenrüttlern verdichtet worden, zum Teil wurde es auch ganz ohne Rütteln versucht. Im Zuge der Bauausführung sind Außenrüttler zum Einsatz gekommen.

### **Welche Verdichtungsart führte zu einer besseren Qualität der Oberflächen?**

Es kommt darauf an, wie ich die Oberflächen haben will und was der Anspruch des Bauherrn und des Architekten ist. Es gibt beim Infralichtbeton keine porenfreie, einheitliche und wolkenlose Oberflächentextur, sondern es entstehen Porenanreicherungen und naturgemäß gewisse Inhomogenitäten. Das tut aber der Oberflächenoptik in meinen Augen keinen Abbruch. Es gibt ein Schweizer Unternehmen, die Firma Misapor, die mit einem Titelbild auf ihren Werbeprospekten wirbt, auf dem eine Sichtbetonoberfläche abgebildet ist voller Poren und Ungleichmäßigkeiten. Es ist so eine Sache, was erwartet der Bauherr, was erwartet der Architekt. Es sind keine einheitlichen Oberflächen wie bei Tadao Ando zu erwarten, sondern Oberflächen, die Struktur haben, die leben. Das ist das lebendige Betonbild, das insbesondere den Infralichtbeton prägt.

### **Welche Auffälligkeiten gab es bei der Schalung und was kann man gegen Schäden beim Ausschalen tun?**

Um Schäden nach dem Ausschalen zu vermeiden, sollte man den Beton ausreichend lang in der Schalung belassen. Bei den neuen Bauvorhaben, die wir jetzt angefangen haben, haben wir empfohlen, der Beton sollte mehrere Tage in der Schalung sein, immer in Abhängigkeit von der Temperatur. Wird die Schalung zu früh gelöst, kann es insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen zu Oberflächenschäden kommen, da der Beton noch nicht die ausreichende Zugfestigkeit hat.

### **Wie gefällt ihnen persönlich die Architektur der Häuser/ des Hauses, an dem Sie beteiligt sind?**

Mir gefällt die lebendige Betonoptik ganz allgemein. Sie passt gut zu Holz, zu Glas. Ich bin absolut affin zur Betonbauweise, denn Beton ist ein moderner, nachhaltiger Baustoff, der die vorher angesprochenen Vorteile bietet: dämmend, tragend und gleichzeitig gestalterisch wirkend.

**Ich danke Ihnen für das Gespräch!**

