

Einfach Bauen 3

Messen, Validieren, Rückkoppeln

Monitoring der Pilothäuser aus Massivholz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk aus Einfach Bauen 2 (SWD-10.08.18.7-18.32) und Validierung der Ergebnisse

Schlussbericht

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses

ZUKUNFT BAU

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

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.09

Projektlaufzeit: 16.11.2020–31.12.2022



Dieses Projekt wurde gefördert aus den Mitteln der bayerischen Bauwirtschaft und die B&O Gruppe

Impressum

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München

Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren, Prof. Florian Nagler

Dipl. Ing. Architektin Anne Niemann (anne.niemann@tum.de)

Dipl. Ing. (FH) Architekt Tilmann Jarmer, M.A. (TUM) (tilmann.jarmer@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

Zsolia Varga, M.Sc. (zsolia.varga@tum.de)

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Dr.-Ing. Thomas Kränkel (thomas.kraenkel@tum.de)

Weitere Mitwirkende

Fabian Diewald, M.Sc. (Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen)

Nina Flexeder, M.Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

Jessica Nagl, B.Sc. (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

Roman Ficht, M.Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)

Ahmad Nouman, M.Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)

Johanna Karghuber, M. Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen)

Zitierweise

Franke, Laura; Niemann, Anne; Varga, Zsolia; Kränkel, Thomas; Jarmer, Tilmann; Auer, Thomas; Nagler, Florian: Einfach Bauen 3 – Messen, Validieren, Rückkoppeln. München, 2023.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract	3
1. Einleitung	5
1.1. Hintergrund des Forschungsprojekts	5
1.2. Projektziele	5
2. Baukonstruktion	6
3. Bauteilmonitoring	10
3.1. Messaufbau/ Messkonzept	12
3.1.1. Leichtbetongebäude	16
3.1.2. Mauerwerksgebäude	17
3.1.3. Massivholzgebäude	18
3.2. Wärmestrommessungen - Hintergrund Average Method	21
3.3. Wärmestrommessungen - Ergebnisanalyse nach Average Method	23
3.3.1. Leichtbetongebäude	23
3.3.2. Mauerwerksgebäude	25
3.3.3. Massivholzgebäude	27
3.4. Feuchtemessungen - Ergebnisse	30
3.4.1. Leichtbetongebäude	30
3.4.2. Vergleich Nord-/ Westwand Massivholz	32
3.4.3. Vergleich Nord-/ Westwand Mauerwerksgebäude	36
3.5. Zusammenhang Feuchte - Wärmestrom	39
3.6. Fazit	43
4. Raumkomfort und Energie	44
4.1. Messkonzept	45
4.2. Messtechnik	50
4.3. Messergebnisse	56
4.3.1. Thermischer Komfort	56
4.3.2. Energieverbrauch	67
4.4. Validieren und Rückkoppeln	70
4.4.1. Angepasste Simulation	71
4.4.2. Validierte Simulation	82
4.5. Fazit Raumklima und Energie	86
4.5.1. Forschung und Praxis: integriertes Messsystem	86
4.5.2. Messkonzept und Messtechnik	86

4.5.3.	Messergebnisse: Nicht nur Messen, sondern auch Hinterfragen	86
4.5.4.	Forschungsfragen.....	87
5.	Nutzerbefragung	89
5.1.	Ziel	89
5.2.	Methodik	89
5.2.1.	Semistandardisierter Fragebogen	89
5.2.2.	Inhalt der Fragebögen	89
5.2.3.	Auswertung.....	90
5.3.	Durchführung.....	90
5.3.1.	Häuser und Mieterstruktur	90
5.3.2.	Erste Befragung.....	91
5.3.3.	Zweite Befragung	92
5.4.	Ergebnisse der Winter-Umfrage	93
5.5.	Ergebnisse der Sommer-Umfrage	102
6.	Anpassung des Leitfadens	113
7.	Fazit.....	114
7.1.	Bauteilmonitoring (Fazit aus Kapitel 3).....	114
7.2.	Raumkomfort und Energie (Fazit aus Kapitel 4).....	114
7.3.	Nutzerbefragung (Fazit aus Kapitel 5).....	118
7.4.	Folgeprojekte (Weiterentwicklung Einfach Bauen).....	119
7.4.1.	Wohnen in Bad Aibling	120
7.4.2.	Forschungshäuser Garching	123
7.4.3.	Forschungshäuser 2 Bad Aibling.....	125
	Literaturverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	131
	Tabellenverzeichnis	137

Kurzfassung

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. [Nagler et al. 2019]

Parallel zum, durch die B&O Gruppe finanzierten Bauprojekt wurde ein weiteres Forschungsprojekt "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" durchgeführt. [Jarmer et al. 2021] In Einfach Bauen 2 wurden auch Testmessungen von Außenwandbauteilen und Raumklima durchgeführt und ein Mess-konzept für eine Langzeitmonitoring ausgearbeitet.

Mit diesem Projekt „Einfach Bauen 3 – Messen, Validieren, Rückkoppeln“ wurden in den inzwischen bewohnten Forschungshäusern Messungen und Befragungen durchgeführt.

Mithilfe der gewonnenen Daten soll die Performance der Gebäude untersucht und die Ergebnisse der vorangegangenen Forschungen dieser Reihe dadurch überprüft werden. Aufgrund der Breite dieser Zielsetzung wurde die Untersuchung in drei Kapiteln strukturiert:

Kapitel 3: Untersuchung der Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dämmwirkung der Außenwände aus Mauerwerk, Massivholz und Infraleichtbeton.

Kapitel 4: Überprüfung des thermischen Komforts und Energieverbrauchs der Forschungshäuser.

Kapitel 5: Einordnung der gemessenen Werte aus Kapitel 4 durch gezielte Nutzerbefragungen.

Zusammenfassend ergaben sich folgende Erkenntnisse:

Kapitel 3: Bei allen drei Gebäudevarianten wurde ein abnehmendes Feuchteverhalten und somit eine Austrocknung der Wände festgestellt. Die vor Ort gemessenen Wärmestromwerte unterschieden sich von den Herstellerangaben, was auf unterschiedliche Umgebungsbedingungen zurückzuführen ist. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Kapitel 4: Die Messungen des Raumklimas bestätigten die Annahmen aus den Simulationen. Die thermische Trägheit der Bauteile reduziert die Tendenz einer Überhitzung im Sommer, während die Feuchte der Raumluft durch die raumumschließenden Bauteile passiv reguliert wird. Die gemessenen Energieverbräuche lagen unterhalb der nach EnEV vorher berechneten Verbrauchswerte.

Kapitel 5: Die Befragung der BewohnerInnen nach Winter- und Sommersaison ergab ein differenziertes Bild. Es gab bei verschiedenen Themen eine recht große Übereinstimmung, wie beispielsweise bei der positiven Bewertung der überdurchschnittlichen Raumhöhe von 3,1 Metern, jedoch auch große Unterschiede, wie bei den präferierten Raumtemperaturen im Winter, die zwischen 18 und 26 Grad.

Im Fazit des Berichts werden noch drei Nachfolgeprojekte vorgestellt und anhand dieser die Weiterentwicklung der Strategie Einfach Bauen aufgezeigt.

Abstract

In a pilot project, the B&O Group built three research houses in Bad Aibling using solid wood, lightweight concrete and highly insulating masonry. The results of the research project "Simply Build, Holistic Strategies for Energy-Efficient, Simple Construction - Investigating the Interaction of Space, Technology, Materials and Construction" were applied.

Parallel to the construction project financed by the B&O Group, another research project "Simply Building 2 - Planning, Building, Measuring; Application of integral strategies for energy-efficient, simple building with wood, lightweight concrete and highly insulating masonry in pilot projects based on the results from SWD-10.08.18.7-16.29" was carried out.

With the results of the third research project "Einfach Bauen 3 Monitoring of the pilot houses made of solid wood, lightweight concrete and highly insulating masonry from Einfach Bauen 2 (SWD-10.08.18.7-18.32)", concrete measured values and user surveys are now available.

With the help of the data obtained, the performance of the buildings is to be examined and the results of the previous research in this series thereby validated. Due to the breadth of this objective, the investigation was structured in three chapters:

Chapter 3: Investigation of the durability, serviceability and insulating effect of the exterior walls made of masonry, solid wood and infralight concrete.

Chapter 4: Examination of the thermal comfort and energy consumption of the research houses.

Chapter 5: Classification of the measured values from Chapter 4 by means of targeted user surveys.

In summary, the following findings resulted:

Chapter 3: In all three building variants, a decreasing moisture behavior and thus a drying out of the walls was observed. The heat flux values measured on site differed from the manufacturer's specifications, which can be attributed to different environmental conditions. Further research is needed here.

Chapter 4: The measurements of the indoor climate confirmed the assumptions from the simulations. The thermal inertia of the building components reduces the tendency of

overheating in summer, while the humidity of the indoor air is passively regulated by the building components enclosing the room. The measured energy consumptions were below the values calculated according to Enev.

Chapter 5: The survey of the occupants according to winter and summer season revealed a differentiated picture. There was considerable agreement on various issues, such as the positive assessment of the above-average room height of 3.1 meters, but also major differences, such as the preferred room temperatures in winter, which ranged from 18 to 26 degrees.

The conclusion of the report also presents three follow-up projects and uses them to illustrate the further development of the Simple Building strategy.

1. Einleitung

1.1. Hintergrund des Forschungsprojekts

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. [Nagler et al. 2019]

Parallel zum, durch die B&O Gruppe finanzierten Bauprojekt wurde ein weiteres Forschungsprojekt “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” durchgeführt. [Jarmer et al. 2021] In Einfach Bauen 2 wurden auch Testmessungen von Außenwandbauteilen und Raumklima durchgeführt und ein Messkonzept für eine Langzeitmonitoring ausgearbeitet.

Mit diesem Projekt „Einfach Bauen 3 – Messen, Validieren, Rückkoppeln“ wurden in den inzwischen bewohnten Forschungshäusern Messungen und Befragungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in diesem Bericht zusammengetragen.

1.2. Projektziele

Mithilfe der gewonnenen Daten soll die Performance der Gebäude untersucht und die Ergebnisse der vorangegangenen Forschungen dieser Reihe dadurch überprüft werden. Aufgrund der Breite dieser Zielsetzung wurden Teilziele definiert und jeweils durch geeignete Methoden untersucht.

Kapitel 3: Die Dauerhaftigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dämmwirkung der in den Forschungshäusern eingesetzten Materialien und Konstruktionslösungen der Außenwände soll auf der Basis von Messdaten bewerten werden.

Kapitel 4: Überprüfen, ob das entwickelte Gebäudekonzept Einfach Bauen in der Realität hinsichtlich Energieverbrauch und thermischen Komfort „funktioniert“.

Kapitel 5: Durch gezielte Nutzerbefragungen, die gemessenen Werte aus Kapitel 4 einordnen.

2. Baukonstruktion

Die baukonstruktiven Details und eine Dokumentation des Bauprozesses im Endbericht von Einfach Bauen 2 unter Pkt. 2 bereits intensiv dokumentiert und kommentiert. [Jarmer et al. 2021] Da in den folgenden Kapiteln des vorliegenden Berichtes über die Messungen und Befragungen häufig auf die konstruktive Ausgestaltung der Forschungshäuser eingegangen wird, sind auf den nachstehenden Seiten die wichtigsten Konstruktionsdetails in Form eines Fassadenschnitts dargestellt.

In der Vergangenheit wurden von verschiedenen forschenden Stellen oft Informationen zur Konstruktion der Forschungshäuser für vergleichende Betrachtungen angefragt. Eine Mengenermittlung aller relevanter Bauteile der Gebäude (auch Stoffbilanz) bildet die Grundlage für jegliche Bilanzierung von Bauwerk und Technik. Als Grundlage für eine solche vergleichende Betrachtung haben wir im Anhang 1 die Bauteile von Bauwerk und Technik aufgelistet. Die Detaillierung orientiert sich dabei an der Detailtiefe der Ökobaudat.

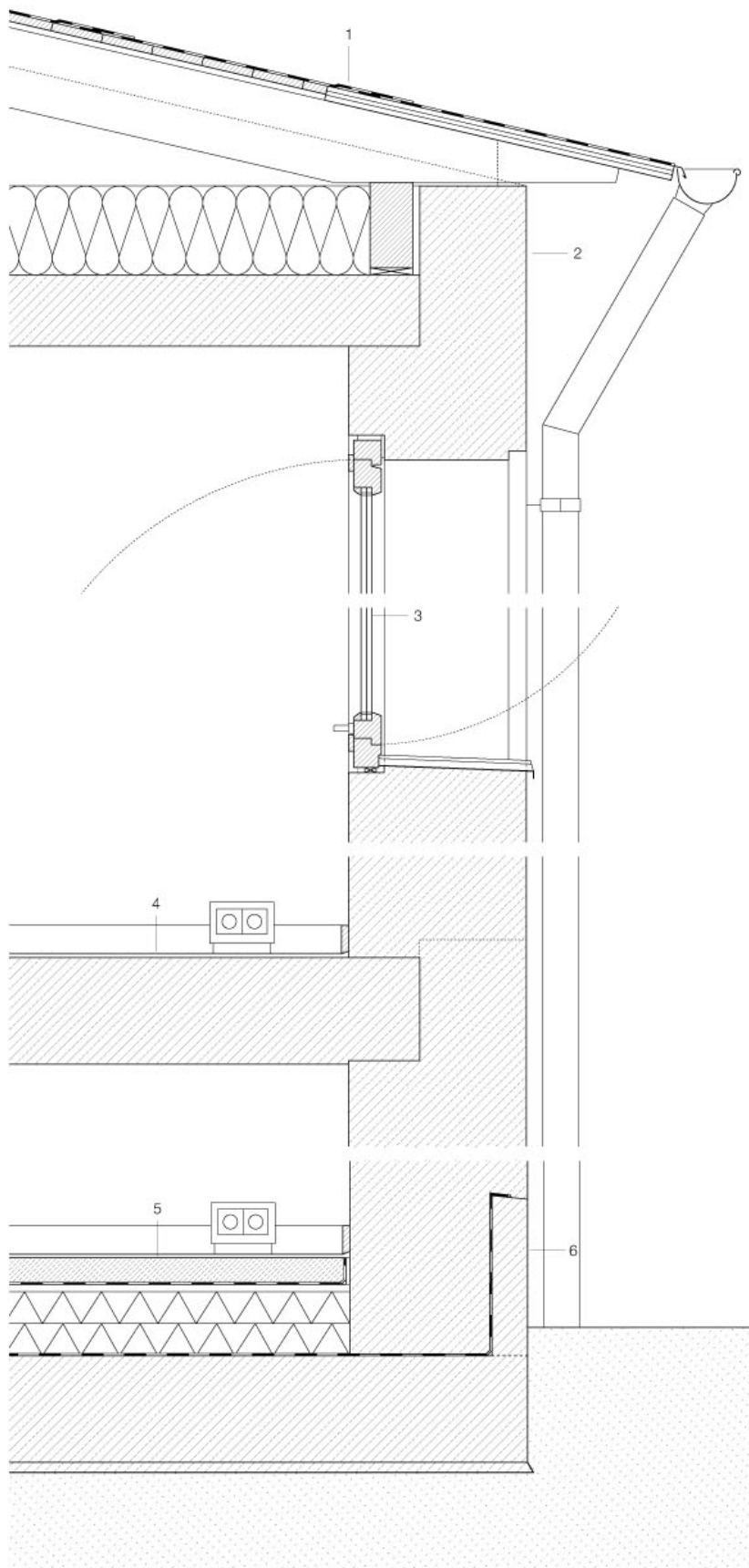


Abbildung 1: Fassadenschnitt
Gebäude Leichtbeton:

1 Bitumenbahn beschiefert,
Holzschalung 23 mm,
im Randbereich Dreischicht-
platte 40mm, Sparren 80/220,
Holzweichfaserdämmung
240 mm,
Stahlfaserbeton 200 mm,
U-Wert Dach 0,16 W/m²K

2 Infraleichtbeton 500 mm,
unbewehrt,
U-Wert Wand 0,357 W/m²K

3 Holzfenster, geölt, mit 3-
fach-Verglasung,
U-Wert Fenster 0,9 W/m²K

4 Bodenbelag, Trittschallver-
besserungsmaß $\Delta L_w \geq$
18 dB,
Stahlfaserbeton 300 mm

5 Bodenbelag, Zementestrich
75 mm,
Trennfolie,
Mineralwolle 20 mm,
Holzfaserdämmung 180 mm,
Bitumenbahn,
Stahlbeton 300 mm,
Sauberkeitsschicht 50 mm,
Unterbau aus frostfreiem und
verdichteten Material,
U-Wert Bodenplatte
0,197 W/m²K

6 Aufkantung aus Stahlbeton
100 mm als Schutz der Ab-
dichtung,
Bitumenbahn

Quelle: Florian Nagler Archi-
tekten

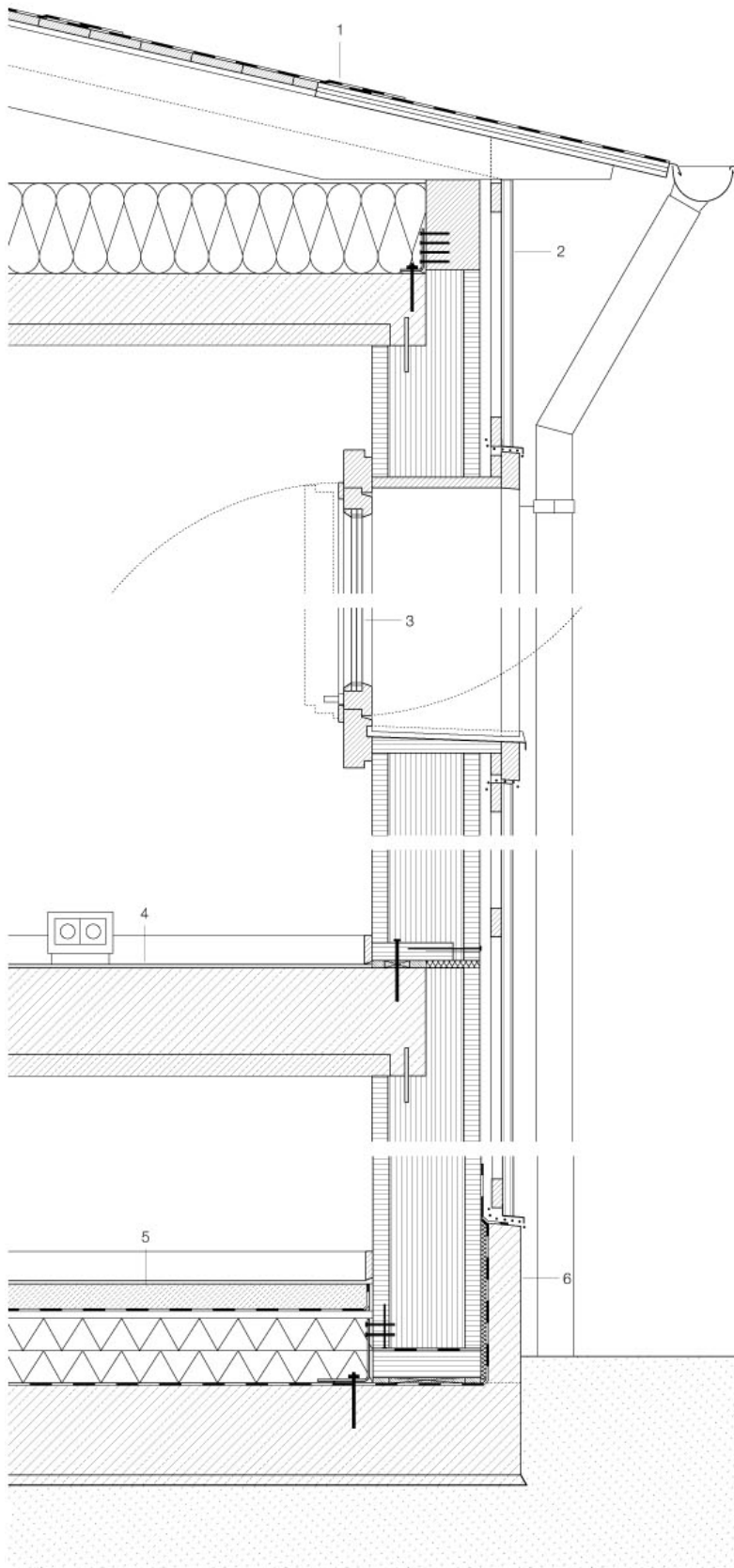


Abbildung 2: Fassadenschnitt Gebäude Holz massiv:

1 Bitumenbahn beschiefert Holzschalung 23 mm, im Randbereich Dreischichtplatte 40 mm, Sparren 80/220 Holzweichfaserdämmung 240 mm, Stahlbeton 200 mm als Halbfertigteil mit Aufbeton, U-Wert Dach 0,16 W/m²K

2 Holzschalung Kiefer, sägerau Traglattung, Konterlattung, Vollholzwand 300 mm, mit Luftkammern, U-Wert Wand 0,224 W/m²K

3 Holzfenster, geölt, mit 3-fach-Verglasung, U-Wert Fenster 0,9 W/m²K

4 Bodenbelag, Trittschallverbesserungsmaß $\Delta L_w \geq 18$ dB, Stahlbeton 300 mm als Halbfertigteil mit Aufbeton

5 Bodenbelag, Zementestrich 75 mm, Trennfolie, Mineralwolle 20 mm, Holzfaserdämmung 180 mm, Bitumenbahn, Stahlbeton 300 mm, Sauberkeitsschicht 50 mm, Unterbau aus frostfreiem und verdichtetem Material, U-Wert Bodenplatte 0,197 W/m²K

6 Aufkantung aus Stahlbeton als Schutz der Abdichtung 100 mm, Bitumenbahn

Quelle: Florian Nagler Architekten

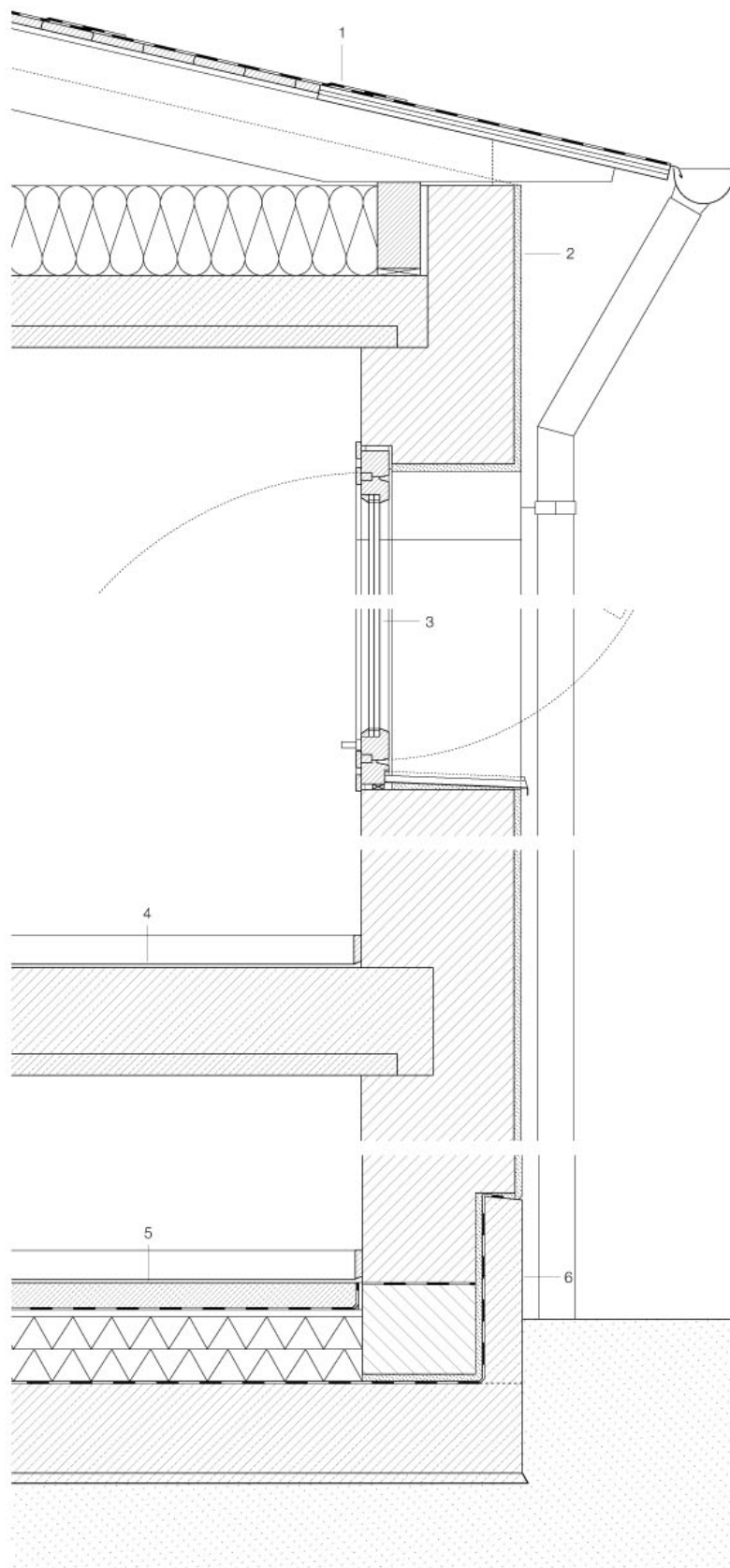


Abbildung 3: Fassadenschnitt Gebäude Mauerwerk:

1 Bitumenbahn beschiefert Holzschalung 23 mm, im Randbereich Dreischichtplatte 40 mm, Sparren 80/220 Holzweichfaserdämmung 240 mm, Stahlbeton 200 mm als Halbfertigteil mit Aufbeton, U-Wert Dach 0,16 W/m²K

2 Kalkzementleichtputz 20 mm, einlagig ohne Gewebeeinlage Luftkammerziegel 420 mm Kalkschlämme 5 mm U-Wert Wand 0,248 W/m²K

3 Holzfenster, geölt mit 3-fach-Verglasung, U-Wert Fenster 0,9 W/m²K

4 Bodenbelag Trittschallverbesserungsmaß $\Delta L_w \geq 18$ dB, Stahlbeton 300 mm als Halbfertigteil mit Aufbeton

5 Bodenbelag, Zementestrich 75 mm, Trennfolie, Mineralwolle 20 mm, Holzfaserdämmung 180 mm, Bitumenbahn, Stahlbeton 300 mm, Sauberkeitsschicht 50 mm, Unterbau aus frostfreiem und verdichtetem Material, U-Wert Bodenplatte 0,197 W/m²K

6 Aufkantung aus Stahlbeton als Schutz der Abdichtung 100 mm, Bitumenbahn

Quelle: Florian Nagler Architekten

3. Bauteilmonitoring

Das Ziel des Bauteilmonitorings ist es, die Dauerhaftigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dämmwirkung der in den Forschungshäusern eingesetzten Materialien und Konstruktionslösungen auf der Basis von Messdaten zu bewerten. So kann einerseits sichergestellt werden, dass mit den verwendeten Materialien eine dauerhafte Nutzung der Forschungshäuser möglich ist. Andererseits kann im Zusammenspiel mit dem ebenfalls in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Verbrauchsmonitoring (siehe Kapitel 4) die Leistungsfähigkeit der einzelnen Konstruktionen der drei Forschungshäuser hinsichtlich deren Dämmwirkung und so direkt auch deren potenzielle Energieeinsparung vergleichend bewertet werden.

Im Forschungsvorhaben wurden hinsichtlich des Bauteilmonitorings die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

Monitoring Leichtbetonwandquerschnitt:

Tiefengestaffeltes Tracking von Temperatur und Feuchte während der Nutzungsphase

Monitoring Massivholzwandquerschnitt

1. Überwachung des Feuchtegehalts der Luftkanäle und Holz (Konvektion)
2. Kontrolle der Feuchteaufnahme des gesamten Bauteils (Diffusion) über den Querschnitt

Monitoring Ziegelwandquerschnitt

1. Überwachung der Luftkammern (Konvektion)
2. Kontrolle der Feuchteaufnahme des gesamten Bauteils (Diffusion) über den Querschnitt

Da es sich bei den drei Außenwandkonstruktionen der Forschungshäuser um neuartige Bauprodukte handelt und Erfahrungswerte hierfür soweit noch fehlten, sollten hier neue Erkenntnisse aus Langzeitmonitoring über zwei Jahre vor Ort gewonnen werden.

Zur Bewertung der Gebäude hinsichtlich deren Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Dämmwirkung im Bereich der Bauphysik wurden deshalb Feuchte- und Wärmestromuntersuchungen durchgeführt. Um aussagekräftige Werte zu erhalten, waren hierzu

zudem Temperaturmessungen über den Bauteilquerschnitt der Außenwände, sowie den angrenzenden Bereichen erforderlich.

Ziel war es unter anderem herauszufinden, wie sich der Feuchteverlauf in den Außenwänden der drei Gebäude auf der West- und Nordseite entwickelt. Trocknet die anfängliche Baufeuchte in den Wänden über den Beobachtungszeitraum aus? Besteht eine Gefahr der Schimmelpilzbildung für die Massivholzwand?

Außerdem sollte überprüft werden, welche Wärmestromwerte vor Ort (in situ) gemessen wurden. Inwieweit unterscheiden sich diese von den Vorgaben der Hersteller?

Das hygrothermische Verhalten einer Außenwand wird maßgeblich vom Außenklima (beispielsweise Sonneneinstrahlung und Schlagregen) beeinflusst und steht deshalb in direkter Abhängigkeit zur Ausrichtung. Als relevante Außenwände, für eine aussagekräftige Untersuchung am Standort der Einfach Bauen Forschungshäuser, wurden hier die Nord- und Westseite identifiziert. Wie unterscheiden sich die gemessenen Werte hinsichtlich der Himmelsrichtungen?

3.1. Messaufbau/ Messkonzept

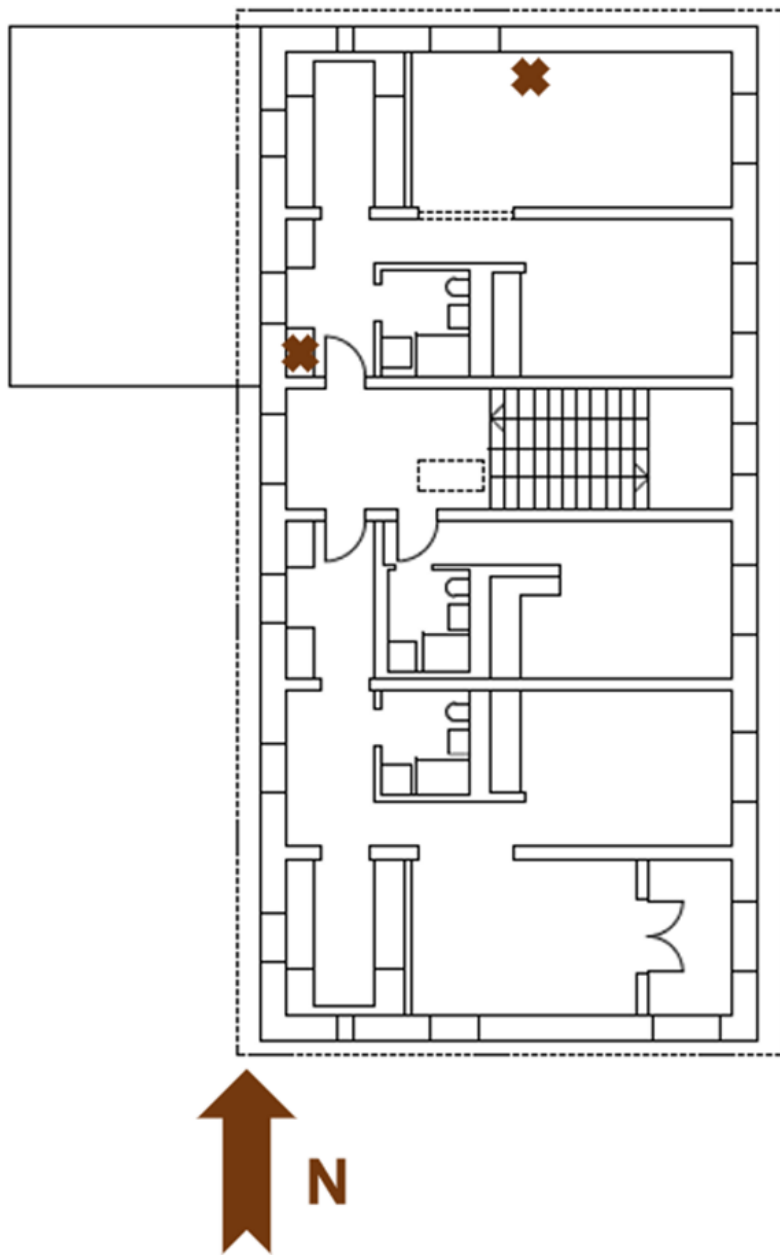


Abbildung 4: Messpunkte West- und Nordaußenwand, 2. OG Leichtbetongebäude (Florian Nagler Architekten)

Zur Bestimmung der Feuchte und deren zeitlicher Entwicklung wurden im Leichtbetongebäude an den in Abbildung 4 eingezeichneten Stellen an der Nord- und Westseite ein Messsystem installiert. Das Messsystem basiert auf Multiringelektroden (MRE, siehe Abbildung 5, links) in verschiedenen Tiefenlagen der Außenwand (siehe Abbildung 5, rechts), die mit einer Multiringsensorelektronik (MRSE) angesteuert werden. Die Messung mittels Multiringelektroden ist ein gängiges Verfahren zur Bestimmung der Feuchte

in Beton, wobei die Feuchte indirekt über den elektrischen Widerstand bestimmt wird. Jede der MREs besteht aus neun Ringen aus nicht-rostendem Stahl, zwischen denen der elektrische Widerstand des Elektrolyts 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 ermittelten Daten werden mittels eines Schnittstellenwandlers ausgelesen und mittels eines Datenloggers gespeichert. Zur Feuchtebestimmung erfolgte zwischen den einzelnen Ringen der MREs eine elektrische Widerstandsmessung durch Messung von Strömen bei gegebener sinusförmiger Spannung (108 kHz, 2 V_{ss}) mithilfe des MRSE. Alle Instrumente wurden in einer Schutzbox an der Innenwand gelagert. Die gemessenen Widerstände wurden anschließend mithilfe einer Regression für einen ähnlichen Beton aus [Breit et al. 2014] in Feuchtegehalte (M.-% Wassergehalt) umgerechnet. Zu beachten ist, dass die in [Breit et al. 2014] angegebenen Regressionsparameter für die Polynomfunktion nicht für die hier betrachtete Infralichtbetonrezeptur ermittelt wurden. Daher handelt es sich bei den im folgenden dargestellten Feuchteangaben lediglich um Näherungswerte. Da es sich jedoch sowohl bei dem in [Breit et al. 2014] untersuchten, als auch bei dem hier betrachteten Beton um Leichtbetone handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die Näherungsfunktion realistische Werte für die Regression des in diesem Projekt verwendeten Betons liefert.

Der Einbau erfolgte bereits vor Beginn des Teilprojekts Einfach Bauen 3 in der zweiten Projektphase während der Herstellung der Außenwände im Oktober 2019. Dabei wurden die MREs in der Schalung vormontiert und die Kabel durch Löcher in der Schalung herausgeführt. 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.

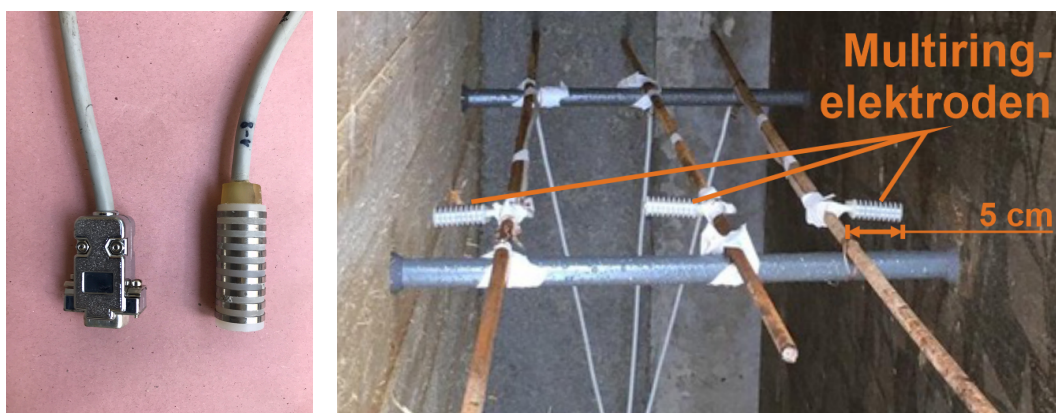


Abbildung 5: Aufbau einer Multiringelektrode (links) und Anordnung der Multiringelektroden an der Innenseite, mittig sowie der Außenseite der Nord- und Westwand des Leichtbetongebäudes (rechts)

Der Einbau der übrigen Messtechnik erfolgte (ausgenommen der MRE-Sensoren, die, wie bereits beschrieben, im Leichtbetongebäude bereits 2019 im Bauzustand mit eingebaut wurden) im Nordapartment im zweiten Stock im Februar 2021 auf der Westseite, vgl. Abbildung 4. Die Nachrüstung auf der Nordseite fand Ende April 2021 statt. Dies war notwendig, da der Unterschied der Oberflächentemperatur der Außenwand auf der Westseite im Messzeitraum Februar 2021 bis April 2021 10 K nicht überstieg und somit vergleichsweise gering ausfiel. Nach [Flexeder et al. 2021] [Desogus et al. 2011] können bei der Wärmestrommessung die besten Ergebnisse erreicht werden, wenn der Unterschied der innen- und außenseitigen Oberflächentemperatur des Bauteils, im vorliegenden Fall der Außenwand, mindestens einen Unterschied von 10 K aufweist. Anfang Juni 2021 wurden im Mauerwerksgebäude zusätzlich zur Optimierung der Feuchtemesstechnik Kunststoffrohre in die Wände eingebracht. Dadurch wurde der zusätzliche Luftkanal, welcher durch die Bohrungen entstanden war, vom restlichen Bauteil getrennt. So konnten eventuelle Messfehler reduziert werden.

Bei allen drei Gebäudevarianten wurden für die Wärmestrommessung Wärmestrommessplatten mit den Abmessungen von 120 mm x 120 mm innenseitig auf die Außenwand angebracht. Die Oberflächenmessung erfolgte außen mit PT 100 Temperaturfühlern und innen mit PT 1000 Temperaturfühlern. Die restliche Messtechnik bestand aus TinkerForge® Bauteilen. Die Außentemperaturen wurden der Wetterstation entnommen, die auf dem Dach des Leichtbetongebäudes befand.

Anhand des Aufbaus konnten sowohl für den Innen-, als auch für den Außenraum Daten erfasst werden. Anzumerken ist, dass bei der Erfassung und Speicherung der Daten während des Untersuchungszeitraums sowohl bei der Messtechnik im Raum, als auch bei der Wetterstation auf dem Dach, mehrmals Messausfälle auftraten. Dies führte zu einer Unterbrechung der vollständigen Aufzeichnung der Daten. Somit gab es teilweise nur gestückelte Messzeiträume, in denen sowohl im Innen-, als auch aus dem Außenraum erfasste Daten gesammelt werden konnten. Die Funktionsfähigkeit der Sensoren konnte teilweise auf Grund der schlechten Erreichbarkeit der Bewohnerinnen und der damit verhinderten Zugänglichkeit, über längere Zeitabschnitte hinweg nicht überprüft werden.

Für zukünftige Monitoring-Projekte sollte die Messtechnik extern beauftragt werden, um eine lückenlose Datenverfügbarkeit zu gewährleisten. Dennoch waren die Messdaten genügend, um ausreichende Erkenntnisse zur Feuchtentwicklung darzustellen und einen Vergleichswert zwischen Wärmestromergebnisse und Herstellerangaben zu schaffen.

	2021												2022											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Vorhandene Messdaten Leichtbetongebäude	08.03.2021		20.03.2021																					
Vorhandene Messdaten Leichtbetongebäude	24.03.2021		14.04.2021																					
Vorhandene Messdaten Leichtbetongebäude	22.04.2021		09.06.2021																					
Vorhandene Messdaten Leichtbetongebäude	24.11.2021										23.12.2021													
Vorhandene Messdaten Leichtbetongebäude	16.03.2022														02.06.2022									
Vorhandene Messdaten Leichtbetongebäude	02.08.2022																		09.10.2022					
Vorhandene Messdaten Leichtbetongebäude	17.10.2022																		19.12.2022					

	2021												2022																	
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12						
Vorhandene Messdaten Mauerwerksgebäude	08.03.2021		18.03.2021																											
Vorhandene Messdaten Mauerwerksgebäude			30.04.2021		09.06.2021																									
Vorhandene Messdaten Mauerwerksgebäude									07.09.2021		01.01.2022																			
Vorhandene Messdaten Mauerwerksgebäude													10.01.2022		21.05.2022															
Vorhandene Messdaten Mauerwerksgebäude																	30.05.2022		24.06.2022											
Vorhandene Messdaten Mauerwerksgebäude																			02.08.2022		09.10.2022									
Vorhandene Messdaten Mauerwerksgebäude																					19.10.2022		19.12.2022							

Einfach Bauen 3

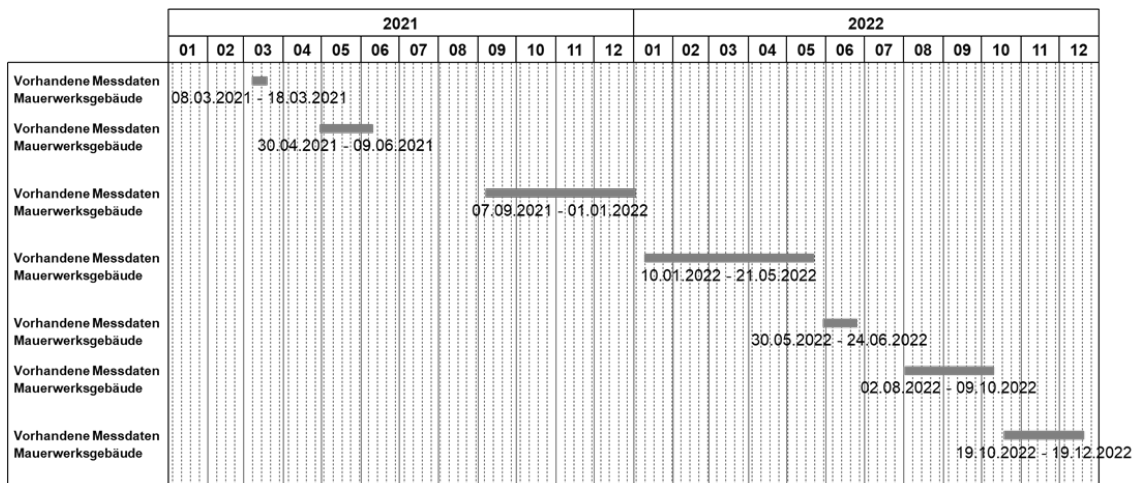


Abbildung 8: Vorhandene Messdaten für Temperatur, relative Luftfeuchte und Wärmestrom im Massivholzgebäude, Tinker-Forge-Messtechnik sowie Außenlufttemperatur der Wetterstation

Die Feuchtemessung der Außenwände im Mauerwerks- und Massivholzgebäude erfolgte nach [Flexeder 2022] hygrometrisch. Dazu wurden in einer Plastikhülse befestigte Humidity Bricklets in die Wand eingebracht und luftdicht mit Aluminiumbutylklebeband (sd- Wert > 100.000 m) verschlossen. Die Feuchtemessung über den Bauteilquerschnitt der Massivholzaußenwand erfolgte durch elektrische Widerstandsmessung mittels GANN®-Elektrodenpaaren sowie Gewindestangen und einem Messaufbau mit Gigamodul und Thermofox (Firma Scanntronik). Die installierte Messtechnik kann Abbildung 9 bis Abbildung 17 entnommen werden.

3.1.1. Leichtbetongebäude



Abbildung 9: links: Messtechnik Westwand, mittig: Messtechnik Nordwand, rechts: Temperaturfühler Oberfläche außen Westwand Leichtbetongebäude

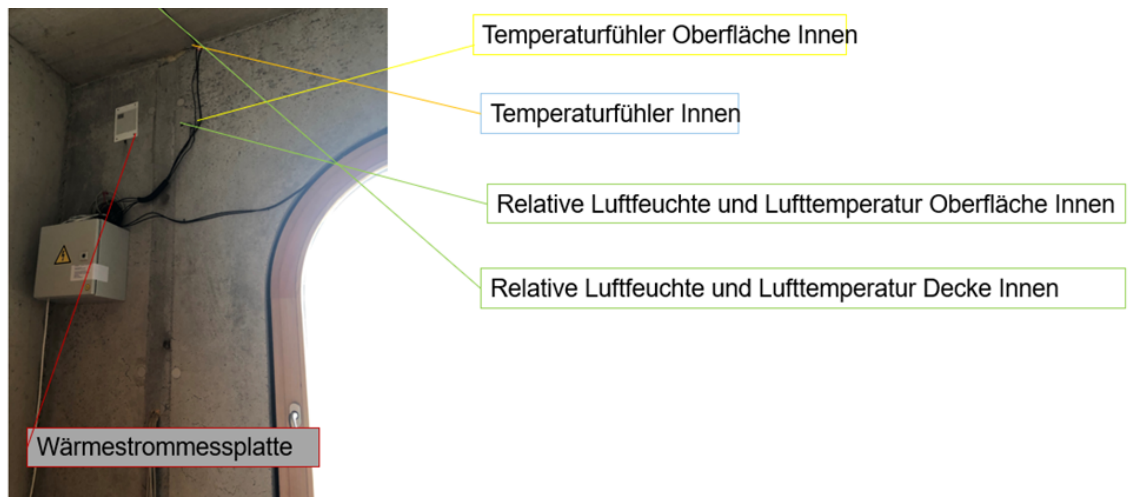


Abbildung 10: Aufbau Messtechnik Westseite Leichtbetongebäude

3.1.2. Mauerwerksgebäude



Abbildung 11: links: Messtechnik Westwand, mittig: Nordwand, rechts: Temperaturfühler Oberfläche außen Nordwand Mauerwerksgebäude

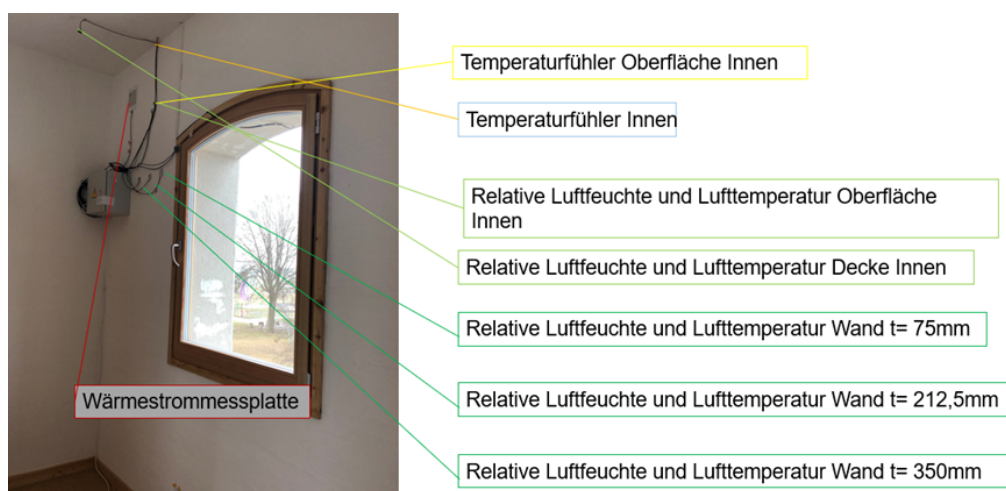


Abbildung 12: Aufbau Messtechnik Westseite Mauerwerksgebäude

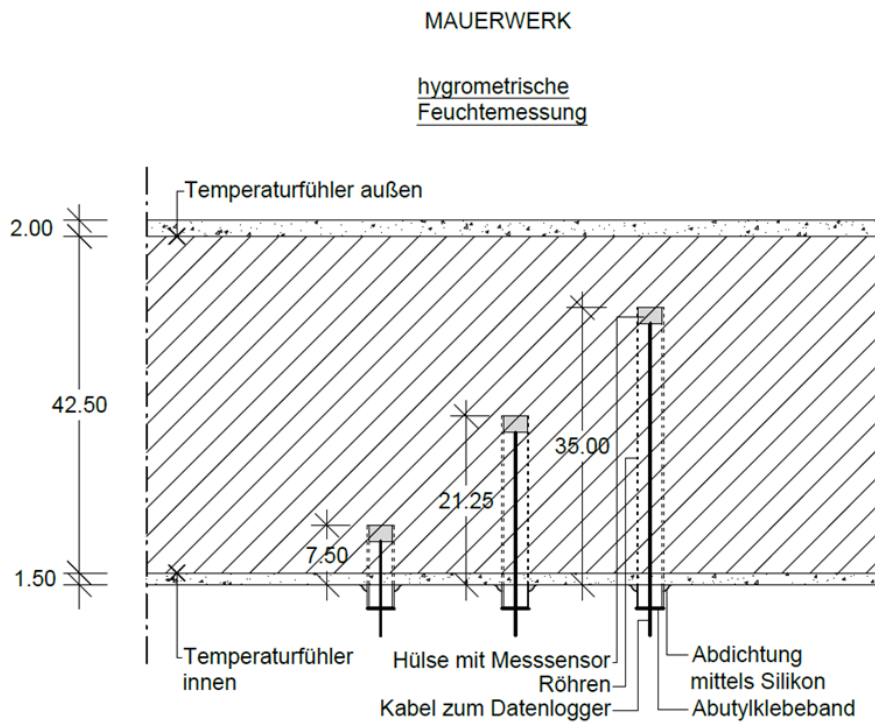


Abbildung 13: Übersicht Querschnitt Mauerwerksaußenwand mit Messtechnik im Bauteil, Jessica Nagl

3.1.3. Massivholzgebäude



Abbildung 14: links: Messtechnik Westwand, mittig: Messtechnik Nordwand, rechts: Temperaturfühler Oberfläche außen Westwand Massivholzgebäude



Abbildung 15: Aufbau Messtechnik Westseite

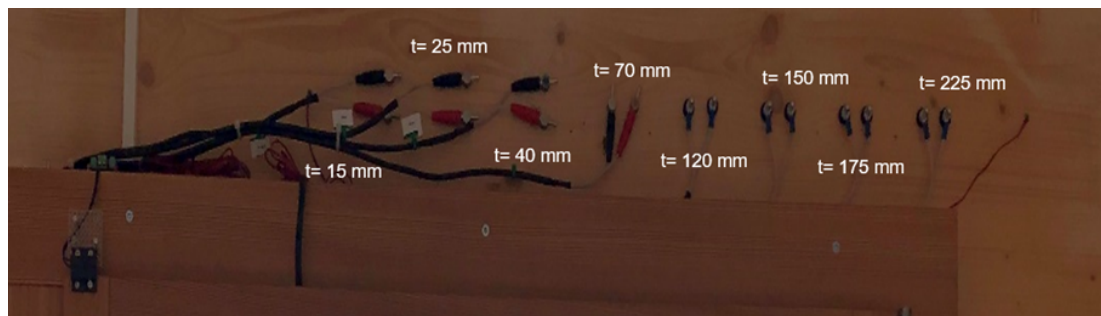


Abbildung 16: Aufbau Messtechnik zur Feuchtemessung mittels elektrischem Widerstand der verschiedenen Messtiefen t , mittels GANN-Elektroden und Gewindestangen

MASSIVHOLZ

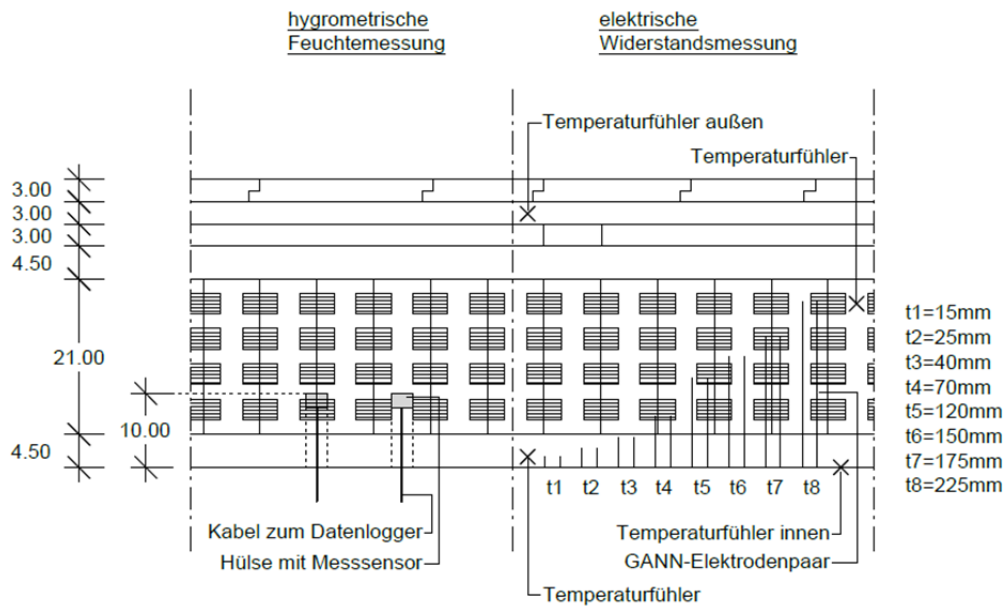


Abbildung 17: Übersicht Querschnitt Massivholzaußenwand mit Messtechnik im Bauteil, Jessica Nagl

3.2. Wärmestrommessungen - Hintergrund Average Method

Basierend auf den Messergebnissen wurde im Folgenden untersucht, inwieweit die Messdaten für eine Analyse mittels der „Average Method“ gemäß ISO 9869-1:2014 [ISO 9869-1:2014] ausreichen. Die ISO 9869-1:2014 ist nach heutigem Stand der Technik eines der gängigen Messverfahren, um in situ Wärmestrommessungen durchzuführen. Für die Messmethode werden Wärmestrom, Innen- und Außentemperatur sowie innen- und raumseitige Oberflächentemperatur von Bauteilen gemessen. Anschließend können instationäre R-Werte, U-Werte sowie λ -Werte für das Bauteil ermittelt werden. Werden die Bedingungen der „Average Method“ nach ISO 9869-1:2014 für eine ausreichend große Datenmenge nicht eingehalten, können sich die Schätzungen für die R-Werte und somit auch für die U-Werte, λ -Werte und Λ -Werte als irreführend herausstellen. [Flexeder et al. 2021]

Wie bereits im Schlussbericht von Einfach Bauen 2 [Jarmer et al. 2021] beschrieben, müssen bestimmte Bedingungen der „Average Method“ zur Sicherung der statistischen Relevanz der Daten eingehalten werden. Es wird davon ausgegangen, dass Bedingung 1, die Messdauer von 72 h bei jeder Messperiode eingehalten wird. Alle restlichen Bedingungen 2 bis 4, im vorliegenden Fall als A, B und C, bezeichnet, werden im Folgenden beschrieben:

„

- A) der R-Wert RDT der letzten Messung soll, verglichen mit dem 24 Stunden zuvor durchgeführten Messung RDT-24h, nicht mehr als um 5% abweichen

- B) die Differenz zwischen den R-Werten der ersten Messperiode $\text{INT}(2 \times \text{DT}/3)$ -Tage soll max. um 5% von der gleich dauernden letzten Messperiode abweichen. Dabei sind DT die Dauer der Testperiode; INT (ganzzahliger Anteil)

- C) die im Wandbauteil gespeicherte Wärme soll maximal einen Bruchteil von 5 % der durch das Wandbauteil transmittierten Wärme im Testzeitraum betragen (ISO 9869-1:2014)

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

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

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

R : Wärmedurchlasswiderstand [$\frac{m^2}{W} \cdot K$]

q : Wärmestromdichte [$\frac{W}{m^2}$]

U : Wärmedurchgangskoeffizient [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

T_{sij} : Innenoberflächentemperatur [K]

T_{sej} : 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, werden die Außentemperaturen ermittelt. Das treibende Potential für die innenseitige Wärmestromdichte q [$\frac{W}{m^2}$] 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 λ [$\frac{W}{m \cdot K}$], spezifische Wärmekapazität der einzelnen Bauteilschichten c [$\frac{J}{kg \cdot K}$], 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] [Jarmer et al. 2021]

3.3. Wärmestrommessungen - Ergebnisanalyse nach Average Method

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Wärmestrom- und Oberflächentemperaturmessungen der verschiedenen Gebäude aufgezeigt werden. Messdatenlücken wurden mit grauer Farbe hinterlegt.

3.3.1. Leichtbetongebäude

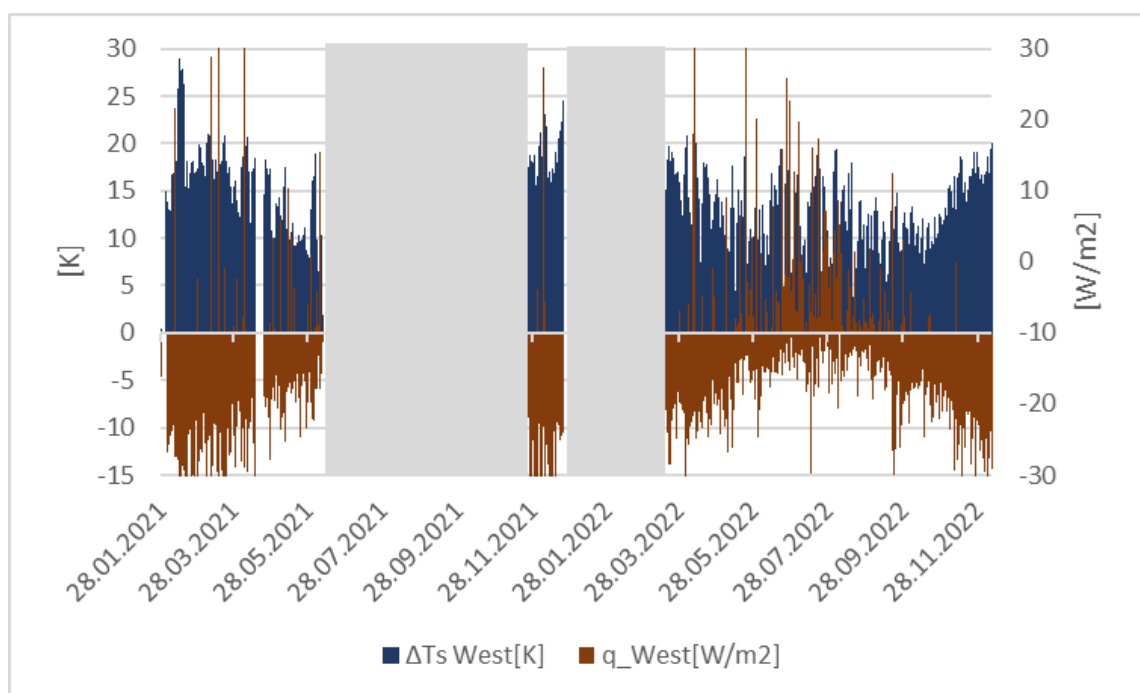


Abbildung 18: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Westwand, Leichtbetongebäude, Zsolia Varga

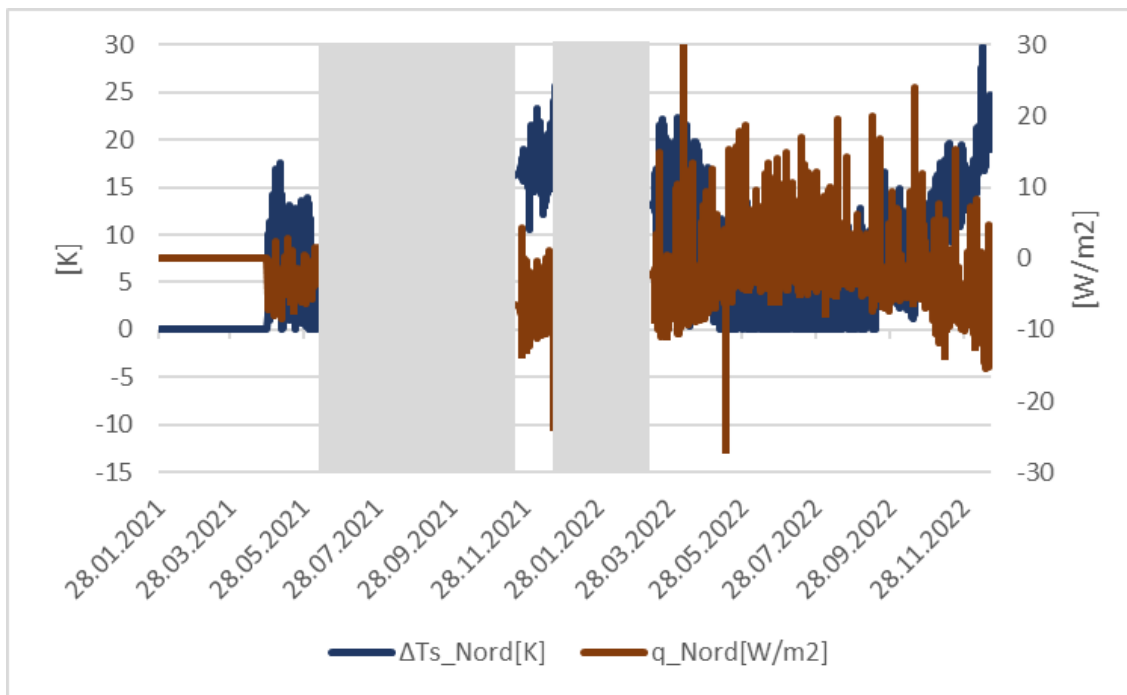


Abbildung 19: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Nordwand, Leichtbetongebäude, Zsafia Varga

Um alle Umwelteinflüsse, die auf die Außenwand einwirken, wie Niederschlag, Sonneneinstrahlung sowie Außentemperaturunterschiede, darzustellen, wurde der Temperaturunterschied ΔT_s der Außenwandoberflächen als repräsentativer Wert ausgewählt. ΔT_s gibt den Unterschied zwischen der raumseitigen und der außenseitigen Oberflächentemperatur der Außenwand an.

Im Folgenden soll untersucht werden, inwieweit bei den Wärmestrommessungen die „Average Method“ der ISO 9869-1:2014 anwendbar war (Tabelle 1).

Leichtbetongebäude								
Zeitraum	Tage	Wand	A<5%	B<5%	C<5%	Λ	U [W/m²K]	λ [W/mK]
08.03.21-20.03.21	12	West	0	7,5	113,1	0,487	0,397	0,243
24.03.21-14.04.21	21	West	2,3	8,3	60,7	0,518	0,279	0,259
22.04.21-09.06.21	48	West	1,6	25,8	22,3	0,618	0,144	0,309
24.11.21-23.12.21	29	West	0,5	0	47,3	0,481	0,444	0,24
16.03.22-02.06.22	78	West	0,3	5,1	16,3	0,518	0,183	0,259
02.08.22-09.10.22	68	West	0,3	17,5	24,3	0,4	0,071	0,2
17.10.22-19.12.22	63	West	0,1	4,8	22,8	0,459	0,318	0,23
28.04.21-09.06.21	40	Nord	0,2	6	31,8	0,519	0,398	0,259
24.11.21-23.12.21	29	Nord	0,7	0,4	46,6	0,489	416	0,245
16.03.22-02.06.22	78	Nord	0,3	1,1	16,6	0,512	0,403	0,256
02.08.22-09.10.22	68	Nord	0	18	23,8	0,407	0,319	0,204
17.10.22-19.12.22	63	Nord	1	40,5	42,5	0,247	0,221	0,123

Tabelle 1: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Leichtbetongebäude

Die in Kapitel 3.2 beschriebenen Bedingungen A, B und C sollten unter 5 % liegen. Es wurde überwiegend die Bedingung C nicht erfüllt. Bei der Bedingung C wird die gespeicherte Wärme im Bauteil zu der Wärme, welches das Bauteil über den Messzeitraum verlässt, ins Verhältnis gesetzt [Flexeder et al. 2021]. Das Verhältnis sollte 5 % nicht übersteigen. Die Vermutung liegt nahe, dass die obigen Messzeiträume zu kurz sind, um diese Bedingung zu erfüllen. Der höchste Λ -Wert konnte mit $\Lambda = 0,309$ W/mK festgestellt werden. Gemäß dem Schlussbericht Einfach Bauen 2 beträgt die Wärmeleitfähigkeit von konditioniertem Leichtbeton, bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, $\lambda = 0,239$ W/mK [Jarmer et al. 2021].

3.3.2. Mauerwerksgebäude

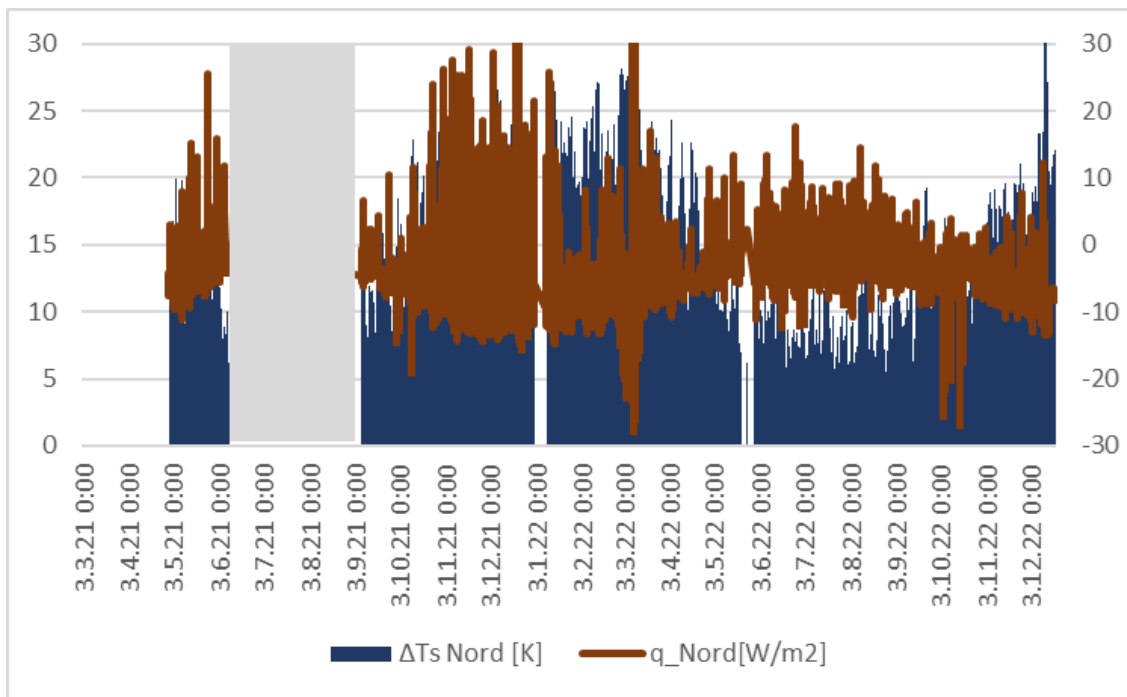


Abbildung 20: Temperaturunterschied Oberfläche Ts und Wärmestrom q Nordwand, Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga

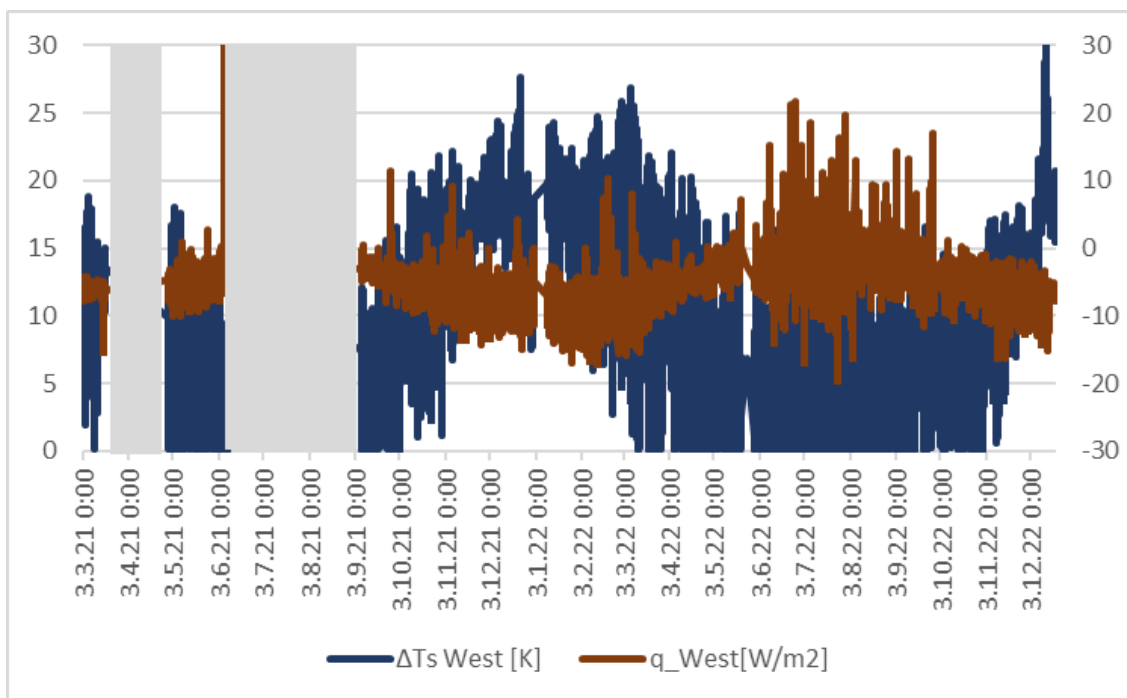


Abbildung 21: Temperaturunterschied Oberfläche Ts und Wärmestrom q Westwand, Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga

Mauerwerksgebäude								
Zeitraum	Tage	Wand	A<5%	B<5%	C<5%	Λ	U [W/m²K]	λ [W/mK]
08.03.-18.03.21	10	West	1,4	6,3	78,9	0,53	0,499	0,225
30.04.-09.06.21	40	West	0,5	13	18,3	0,57	0,43	0,242
07.09.21-01.01.22	115	West	0	1,4	7,9	0,461	0,405	0,196
10.01.-21.05.22	131	West	0,2	1,7	7,2	0,443	0,381	0,188
30.05.-24.06.22	25	West	3,4	24,4	23	0,726	0,295	0,308
02.08.-09.10.22	68	West	0,4	7,7	15,7	0,391	0,246	0,166
19.10.-19.12.22	61	West	0,2	1,7	18,8	0,364	0,329	0,155
30.04.-09.06.21	40	Nord	0,2	15,2	19,7	0,53	0,439	0,225
07.09.21-01.01.22	115	Nord	0,1	0,8	7,9	0,461	0,446	0,195
10.01.-21.05.22	131	Nord	0,1	0	7,1	0,449	0,443	0,191
30.05.-24.06.22	25	Nord	0,7	5,1	32	0,523	0,409	0,222
02.08.-09.10.22	68	Nord	0,4	12,5	16,1	0,382	0,356	0,162
19.10.-19.12.22	61	Nord	0,2	2,1	17,4	0,395	0,405	0,168

Tabelle 2: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Mauerwerksgebäude

Die Bedingungen A, B und C sollten auch für die Mauerwerksbauteile unter 5 % liegen. Es wurde nur die Bedingung A bei allen Messungen erfüllt. Der höchste λ -Wert konnte mit $\lambda = 0,242$ W/mK festgestellt werden. Die Angaben des Herstellers für den Ziegel KELLERER ZMK 11 lagen für den λ -Wert bei $\lambda = 0,111$ W/mK [Ziegelsysteme Michael Kellerer GmbH & Co. KG].

3.3.3. Massivholzgebäude

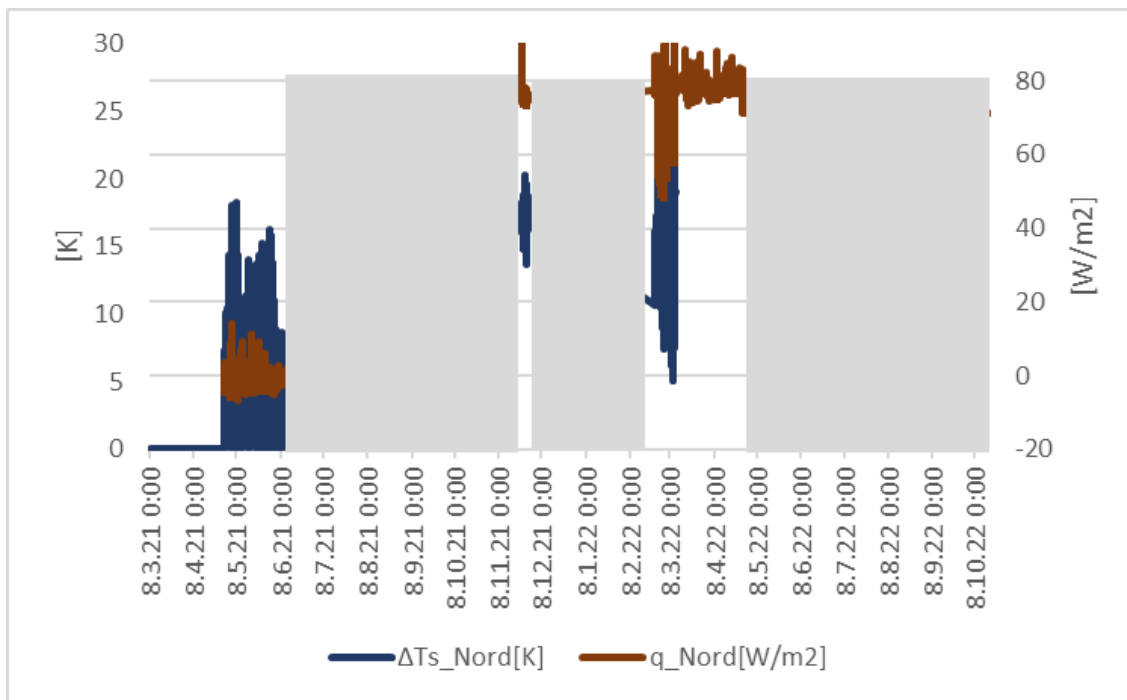


Abbildung 22: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Nordwand, Massivholzgebäude, Zsofia Varga

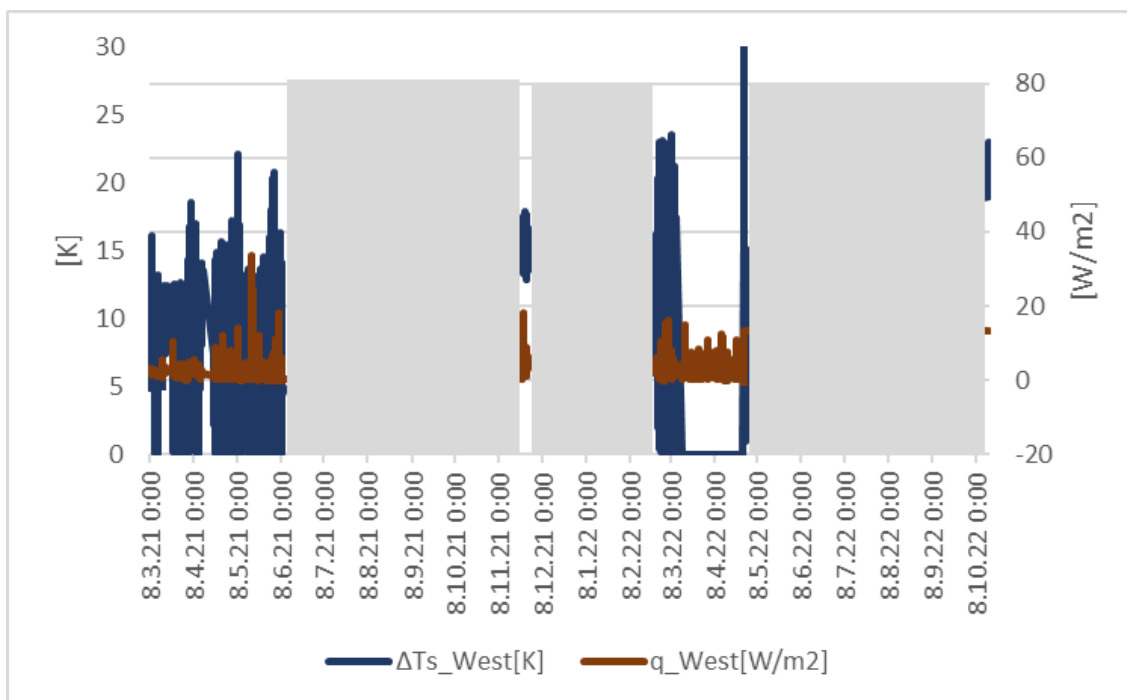


Abbildung 23: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Westwand, Massivholzgebäude, Zsofia Varga

Massivholzgebäude								
Zeitraum	Tage	Wand	A<5%	B<5%	C<5%	Λ	U [W/m²K]	λ [W/mK]
08.03.-20.03.21	12	West	0	10,6	68,7	0,225	0,195	0,067
24.03.-14.04.21	21	West	3,4	12,9	36,2	0,244	0,198	0,073
22.04.-09.06.21	48	West	1,2	20,1	12,3	0,314	0,204	0,094
24.11.-28.11.21	4	West	5,4	8,7	179,4	0,258	0,236	0,077
25.02.-12.03.22	15	West	0,6	9,7	48,6	0,254	0,233	0,076
29.04.-09.06.21	41	Nord	0,6	12,6	17	0,266	0,198	0,08
24.11.-28.11.21	4	Nord	0,1	0,6	10,6	4,373	3,99	1,312
25.02.-12.03.22	15	Nord	0,4	2,5	2,6	4,691	4,745	1,407

Tabelle 3: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Massivholzgebäude

Die Bedingungen A, B und C wurden bei keinem der Messzeiträume durchgängig eingehalten. Der durchschnittliche Λ -Wert befand sich bei $\Lambda = 0,078 \text{ W/mK}$ mit erhöhten Abweichungen auf der Nordseite. Der Λ -Wert aus der ETA ($\Lambda = 0,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) [Österreichisches Institut für Bautechnik 2018] und aus der Leistungserklärung ($\Lambda = 0,0722 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) [ARS Starkholzplatten GmbH 2020] widersprechen sich. Die angewandte Prüfnorm der Leistungserklärung war nicht nachvollziehbar. Deshalb wird dem Hersteller empfohlen eine Prüfung nach DIN EN ISO 10 456 [Norm DIN EN ISO 104566], ISO 8302 [ISO 8302] und DIN EN 12 664 [Norm DIN EN 12664] vorzunehmen.

Bei allen drei Gebäuden wurden selten alle drei Bedingungen A, B und C der „Average Method“ der ISO 9869-1:2014 (ISO 9869-1:2014) eingehalten. Dies ist auf die relativ kurzen Messzeiträume zurückzuführen. Es wird empfohlen auf eine robuste Messtechnik zu setzen. TinkerForge® als Messsystem erfüllte die Bedingungen eines durchgängig funktionierenden Messsystems nicht.

Anzumerken ist, dass die Ergebnisse für den Λ -Wert aus diesem Forschungsprojekt auf Untersuchungen mit spezifischen Randbedingungen basieren und sie folglich aus der Forschung stammen und nicht zur Anwendung in der Praxis geeignet sind. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Generell es gab Unterschiede zwischen den Ergebnissen der vor Ort (in situ) Langzeitmessungen und den Herstellerangaben. Die Gründe dafür sollten in weiteren Forschungsprojekten untersucht werden.

3.4. Feuchtemessungen - Ergebnisse

3.4.1. Leichtbetongebäude

Die Ergebnisse der Messungen mittels der MREs zwischen Oktober 2019 und August 2022 sind in Abbildung 24 und 25 als Mittelwerte aller Messungen der acht Einzelwiderstände der elektrischen Widerstände dargestellt. In den Abbildungen 26 und 27 wurden für alle Feuchteangaben in M.-% Regressionsparameter sowie eine Näherungsformel zur Umrechnung der Widerstände früherer Untersuchungen an Infraleichtbeton verwendet [Breit et al. 2014]. Daher handelt es sich bei den Feuchteangaben, als absolute physikalische Größe, um eine Näherung. Durch die Proportionalität zwischen elektrolytischem Widerstand und Feuchte eignet sich die Darstellung dennoch zur Bestimmung von Änderungen oder konstanten Feuchtegehalten.

Die Mittelwerte der drei Cluster für alle Messstellen Innen, Mitte und Außen zeigen einen Anstieg der elektrischen Widerstände über die Zeit, was mit einer generellen Abnahme der Feuchte gleichzusetzen ist. Besonders in der Westwand zeigen die stetigen Datensätze eine Abnahme der Feuchte mit Frequenzen im Tages- bzw. Wochenbereich, die neben Feuchtetransportprozessen auch auf die temperatursensitive Messtechnik zurückzuführen sind. Eine Erhöhung der Widerstände über die Zeit ist auch bei den drei Clustern der Nordwand festzustellen, wobei bei den MREs Innen und Mitte eine große Schwankungsbreite zu beobachten ist. Auch aus den Erfahrungen eines Sensoreinbaus in einer Testwand aus demselben Infraleichtbeton kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund des verhältnismäßig hohen Schwindmaßes des Betons eine ideale Ankopplung zwischen Sensorik und Material nicht immer sichergestellt werden kann. Hinzu kommt, dass eine vergleichsweise schnellere Dynamik des Feuchtetransports aufgrund des hohen Anteils größerer Poren im Material im Zusammenspiel mit einer unvollständigen Ankopplung zu diesen Schwankungen beitragen kann. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der Messungen, dass die Feuchte über die Zeit abnimmt und keine hohen Eindringtiefen von Wasser durch kapillares Saugen beobachtet werden konnten.

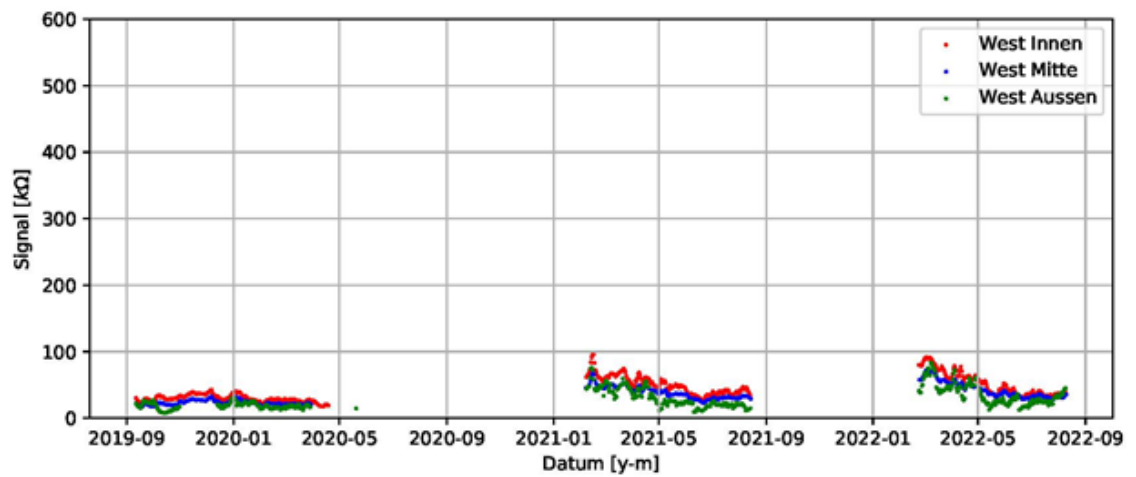


Abbildung 24: Gemessene elektrische Widerstände in den drei Tiefenlagen der Westwand

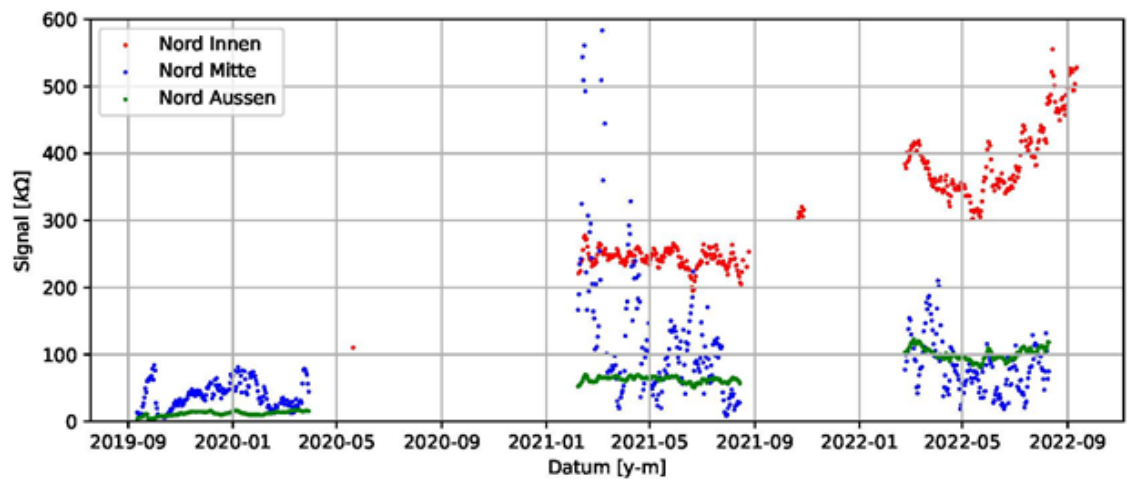


Abbildung 25: Gemessene elektrische Widerstände in den drei Tiefenlagen der Nordwand

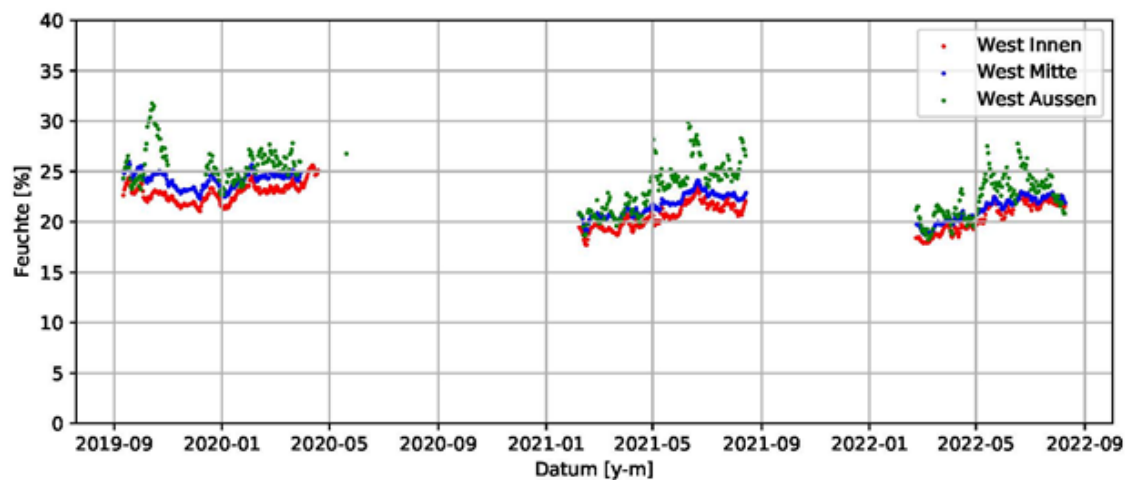


Abbildung 26: Ermittelte Feuchtegehalte in den drei Tiefenlagen der Westwand

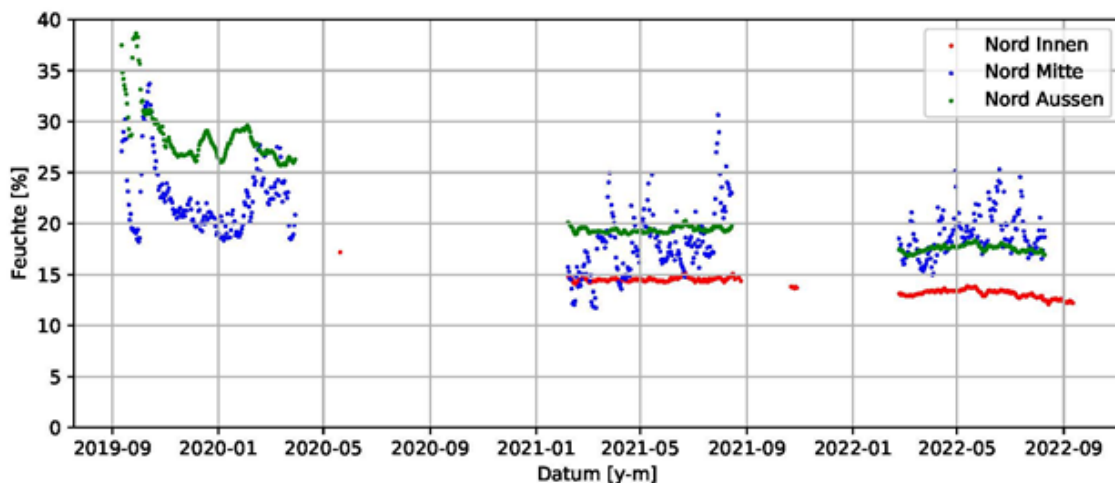


Abbildung 27: Ermittelte Feuchtegehalte in den drei Tiefenlagen der Nordwand

Weitere Ergebnisse zu Messungen mechanischer Kennwerte, der Wärmeleitfähigkeit unter Laborstandards und Infrarotthermographiemessungen am Gebäude wurden im Projektbericht der Phase 2 im Detail diskutiert. Wir verweisen an dieser Stelle auf den Bericht „Einfach Bauen 2: Planen, Bauen, Messen“. [Jarmer et al. 2021]

Fazit Leichtbetongebäude

Die Ergebnisse der Labormessungen zu mechanischen Kennwerten sowie die für die Einhaltung der EnEV entscheidende Wärmeleitfähigkeit als auch der Feuchtemessungen validierten die Ergebnisse vorhergehender Studien [Breit et al. 2014, Callsen et al. 2017, Knippers et al. 2014, Schlaich et al. 2017, Schwenk et al. 2014] und zeigen insbesondere die Funktionalität der monolithischen Außenwände aus Infraleichtbeton in Bezug auf die geforderte Wärmedämmung. Die Messungen des elektrischen Widerstands zeigten eine Austrocknung der Außenwände, was eine Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften mit sich bringt. Dennoch wird eine Hydrophobierung der Außenwände als präventive Schutzmaßnahme empfohlen, da diese ein einfaches Mittel darstellt, das Eindringen von Wasser in die Außenwände auch langfristig zu vermeiden. So kann auch langfristig (über den betrachteten Untersuchungszeitraum hinaus) eine hohe Wärmedämmeigenschaft der Außenwände sichergestellt werden.

3.4.2. Vergleich Nord-/ Westwand Massivholz

Im Folgenden können die Daten der Feuchtemessungen der Nord- und Westwand des Massivholzgebäudes entnommen werden. Da die Messtechnik auf der Nordseite erst im April 2021 eingebaut wurde, sind bei dieser Außenwand erst ab diesem Zeitraum Messdaten vorhanden.

Bei beiden Außenwänden, der nach Norden und der nach Westen ausgerichteten, fand eine hygrometrische Feuchtemessung in der Bauteiltiefe von 100 mm statt. Das Bauteil wies eine Gesamttiefe von 300 mm auf. Es wurden jeweils im Bereich der Luftkammern und im Bereich ohne Luftkammern relative Luftfeuchte sowie Lufttemperatur mittels des HumidityBricklets von TinkerForge® und der Messvorrichtung nach [Flexeder, 2022] gemessen. Der Messaufbau kann Abbildung 17 entnommen werden. Die Messergebnisse wurden in Abbildung 28 dargestellt.

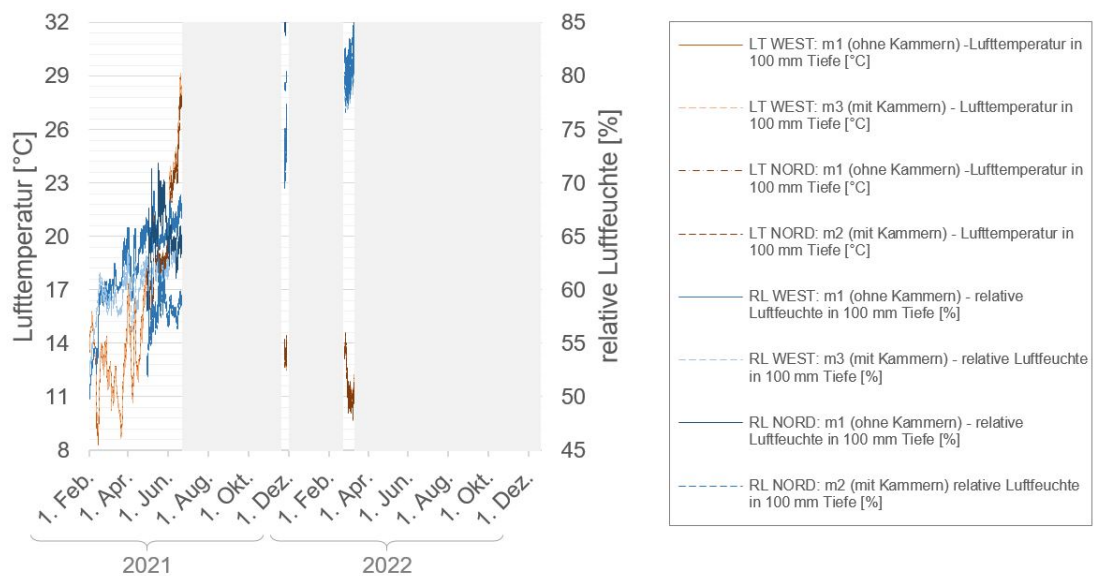


Abbildung 28: Vergleichende Feuchte- und Temperaturmessungen in zwei Außenwänden des Massivholzgebäudes, jeweils in einer Tiefe von 100 mm, jeweils in der Luftkammer / nicht in der Luftkammer. Bei fehlenden oder ungenügend Daten sind die jeweiligen Zeitabschnitte ausgegraut dargestellt. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)

Die Temperaturwerte bewegten sich zwischen 8 und 30 °C, die relativen Luftfeuchten zwischen 45 und 85 %. Die Lufttemperaturen in den Kammern und außerhalb der Kammern unterschieden sich geringfügig voneinander. Die Unterschiede der relativen Luftfeuchten bewegten sich zwischen 3 und 10 % im Bauteil mit und ohne Luftkammern. Die Messdaten weisen ab Mitte 2021 sehr große Lücken und Ausfälle auf, weshalb in der folgenden Auswertung lediglich auf den ersten Abschnitt im Zeitraum Februar bis Juli 2021 eingegangen wird. Abbildung 28 sind die Ergebnisse beider Außenwände, Abbildung 29 die Ergebnisse der West- und Abbildung 30 der Nordaußenwand zu entnehmen

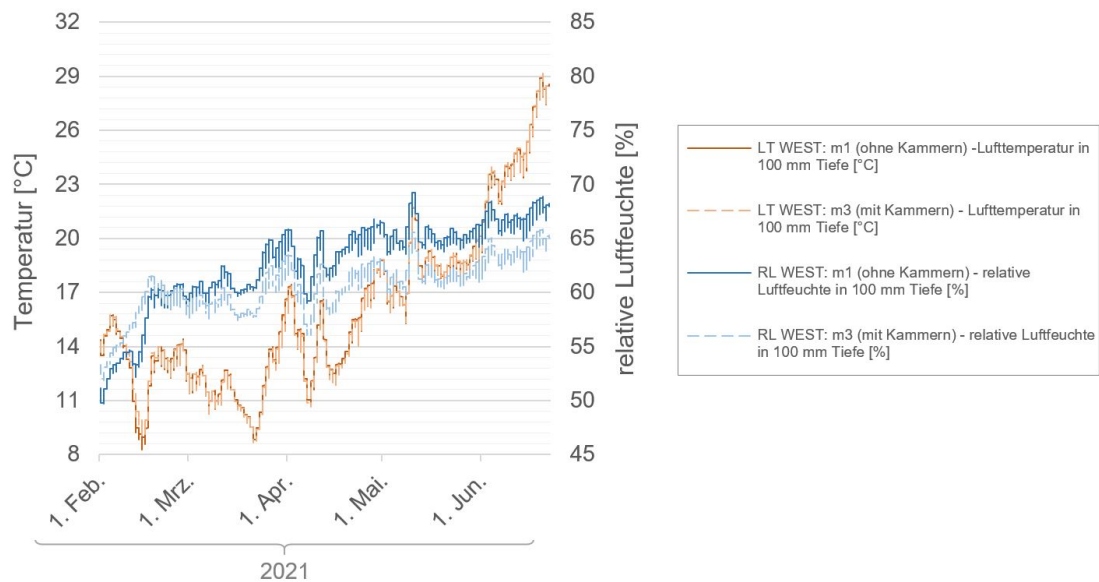


Abbildung 29: Feuchte und Temperaturmessungen in der Tiefe von 100 mm, in der Luftkammer/ nicht in der Luftkammer Westwand Massivholzgebäude. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)

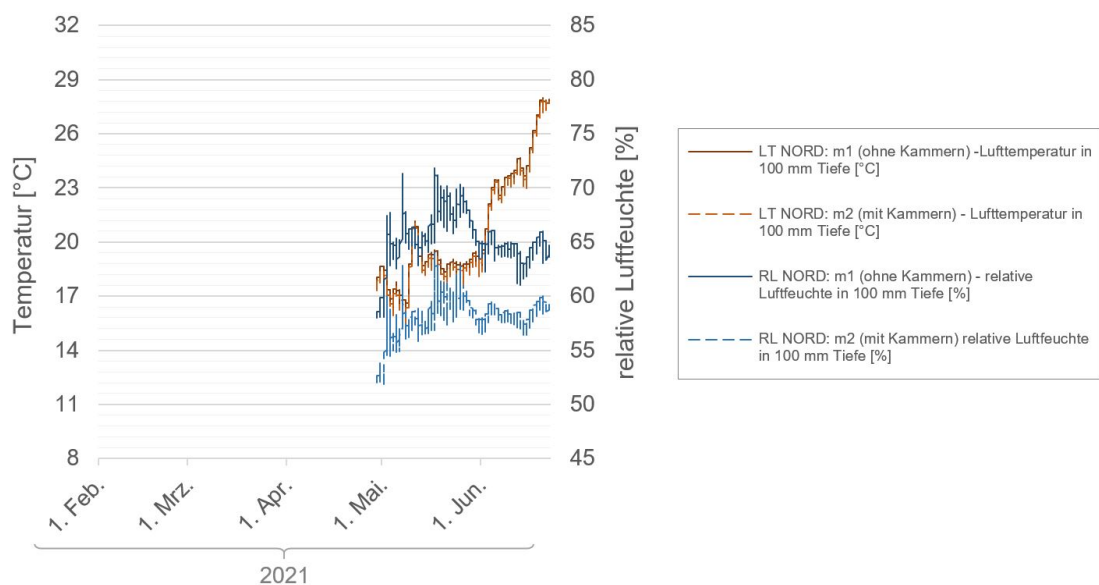


Abbildung 30: Feuchte und Temperaturmessungen in der Tiefe von 100 mm, in der Luftkammer/ nicht in der Luftkammer Nordwand Massivholzgebäude. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)

Bei beiden Außenwänden West (Abbildung 29) und Nord (Abbildung 30) ist ersichtlich, dass es kaum Unterschiede bei den Lufttemperaturen im Bauteil mit und ohne Kammern gab. Im Bereich der relativen Luftfeuchten hingegen unterschieden sich die Bauteile mit und ohne Luftkammern. Die relativen Luftfeuchten waren im Bauteil ohne Kammern höher als im Bauteil mit Luftkammern.

Beim Verhältnis Lufttemperatur zu relativer Luftfeuchte gab es Unterschiede bei den Außenwänden. Bei der Westwand stieg die relative Luftfeuchte mit zunehmender Temperatur (Abbildung 29). Bei der Nordwand stieg die Lufttemperatur mit fallender relativer Luftfeuchte (Abbildung 30).

Zu Beginn der Messungen gab es höhere Temperaturen und eine erhöhte relative Luftfeuchte auf der Nordseite (Abbildung 28). Diese pendelten sich mit der Zeit ein und sanken anschließend. Langfristig gesehen wies die Westseite im Untersuchungszeitraum höhere relative Luftfeuchtwerte auf.

Ergänzend wurde die Holzfeuchte mittels elektrischer Widerstandsmessungen geschätzt.

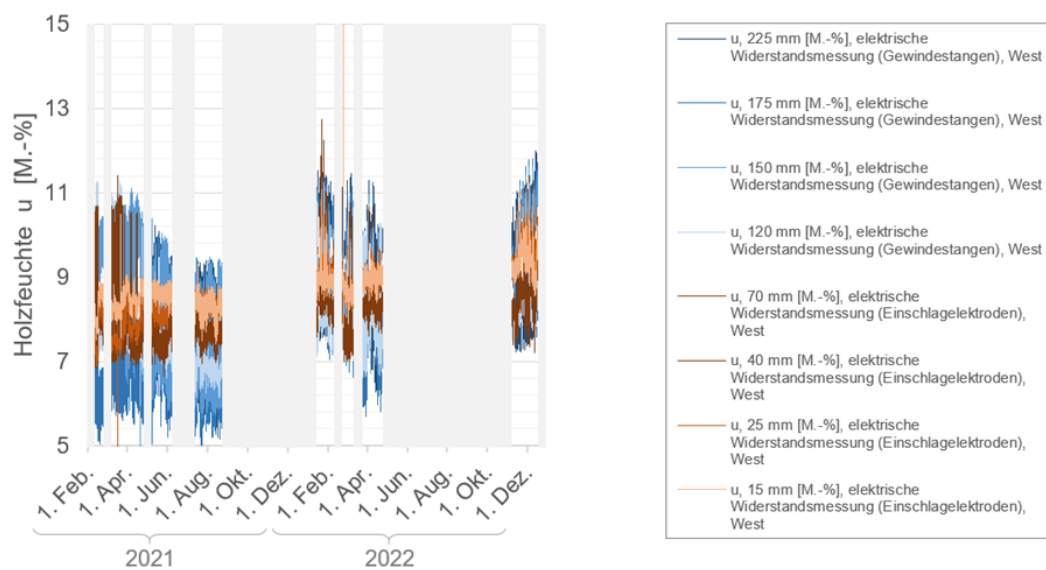


Abbildung 31: Ergebnisse der Holzfeuchteschätzung mittels elektrischer Widerstandsmessung in der nach Westen orientierten Außenwand. Bei fehlenden oder ungenügend Daten sind die jeweiligen Zeitabschnitte ausgegraut dargestellt. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)

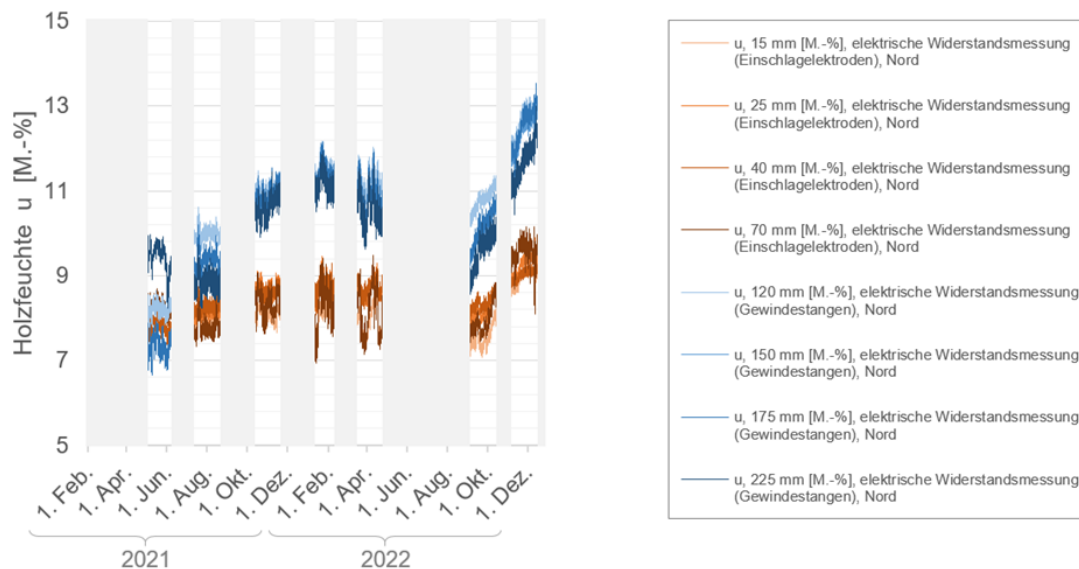


Abbildung 32: Ergebnisse der Holzfeuchteschätzung mittels elektrischer Widerstandsmessung in der nach Norden orientierten Außenwand. Bei fehlenden oder ungenügend Daten sind die jeweiligen Zeitabschnitte ausgegraut dargestellt. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)

Die Holzfeuchte lag im Untersuchungszeitraum über den Bauteilquerschnitt zwischen 5 M.-% und 13 M.-%, vgl. Abbildung 30 und Abbildung 31. Somit wurden die Anforderung der DIN 68800-1 erfüllt. Nach DIN 68800-1 [Norm DIN 68800-1:2019-06] besteht die Gefahr der Schimmelpilzbildung, wenn die Holzfeuchte 20 M.-% übersteigt.

Im Massivholzgebäude gab es höhere Luftfeuchten in der Außenwand im Bauteilbereich ohne Luftkammern als mit Luftkammern. Für die Temperaturen innerhalb des Bauteils machte es keinen Unterschied, ob sich die Sensoren im Bereich mit Luftkammern oder ohne Luftkammern befanden.

Auf Grund der Messergebnisse kann davon aufgegangen werden, dass im Untersuchungszeitraum keine Gefahr zur Schimmelpilzbildung bestand.

Beim Vergleich der Nord- und Westaußenwand gab es zu Beginn der Messungen höhere relative Luftfeuchten auf der Nordseite. Diese pendelten sich ein und wurden von den relativen Luftfeuchten der Westseite überstiegen.

3.4.3. Vergleich Nord-/ Westwand Mauerwerksgebäude

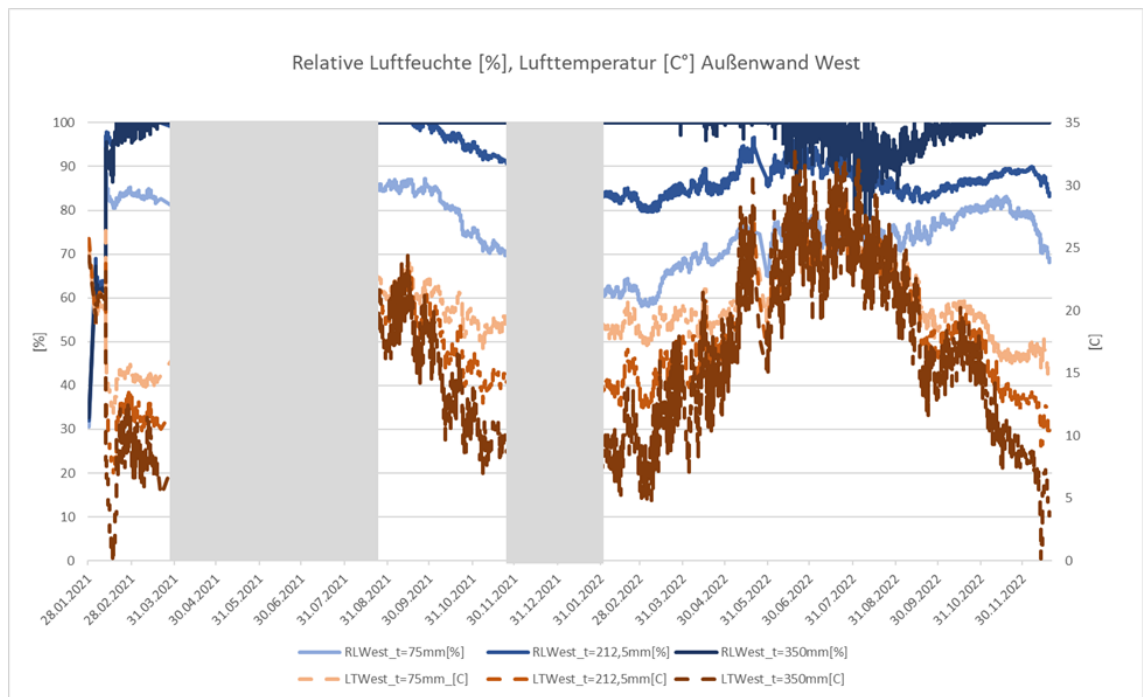


Abbildung 33: relative Luftfeuchte (blau) und Lufttemperatur (rot) Westwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga

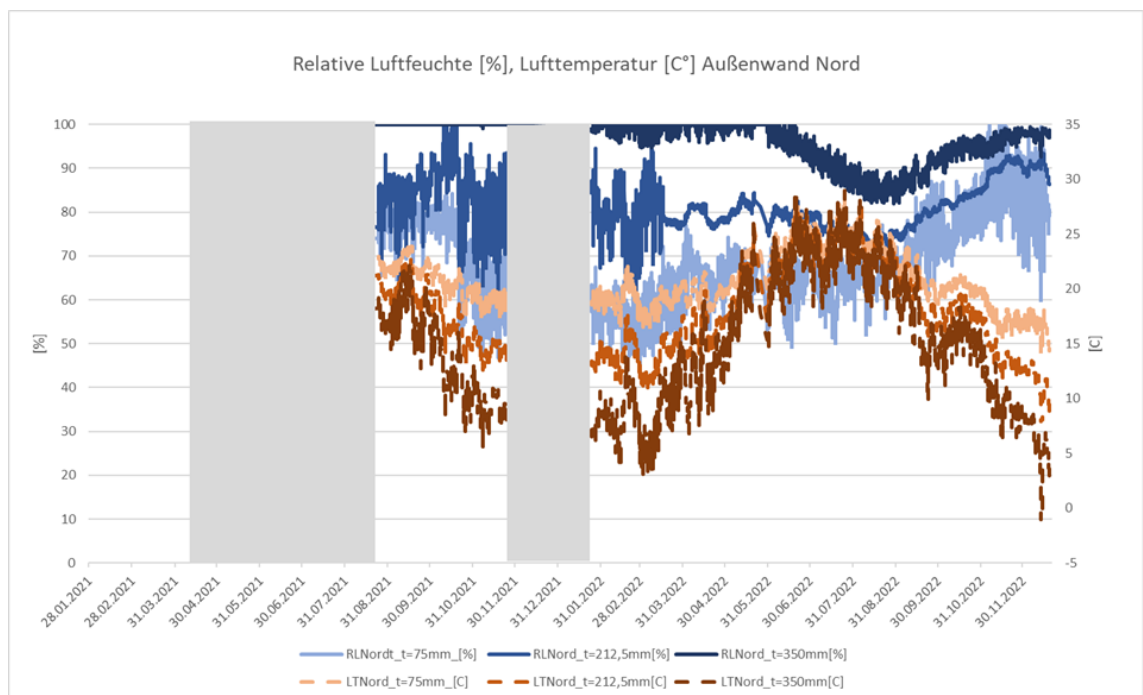


Abbildung 34: relative Luftfeuchte (blau) und Lufttemperatur (rot) Nordwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga

Abbildung 33 und Abbildung 34 können die relativen Luftfeuchten sowie Lufttemperaturen der West- und Nordaußenwand des Mauerwerksgebäudes in den Tiefen $t=75$ mm, $t=212,5$ mm und $t=350$ mm entnommen werden. Die relativen Luftfeuchten sind in Blau-

, die Lufttemperaturen in Rottönen abgebildet. Je tiefer der Sensor im Bauteil lag, desto dunkler wurde sie dargestellt. Die relativen Luftfeuchten bewegten sich zwischen 48-100%, die zugehörigen Lufttemperaturen zwischen 0-32 °C. Wobei die Werte von 100% in dunkelblau auch auf defekte Sensoren zurückzuführen sein könnten. Die Funktionsfähigkeit der Sensoren konnte, wie bereits erläutert, auf Grund der schlechten Erreichbarkeit der Bewohnerinnen und der damit verhinderten Zugänglichkeit nicht überprüft werden. Die Nordwand wies auch deutlich höhere Schwankungen als die Westwand auf.

Die Westaußenwand des Mauerwerksgebäudes wies im Vergleich zur Nordaußenwand höhere relative Luftfeuchtwerte auf. Hinsichtlich der Lufttemperaturen im Bauteil konnten bei der Westwand höhere Werte, als bei der Nordwand festgestellt werden.

3.5. Zusammenhang Feuchte - Wärmestrom

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Feuchte- und Wärmestrommessungen der drei verschiedenen Gebäudevarianten gegenübergestellt werden. Es soll untersucht werden, ob und wie weit die Werte im Zusammenhang zueinander stehen.

Vergleich Nord-/ Westwand Massivholzgebäude

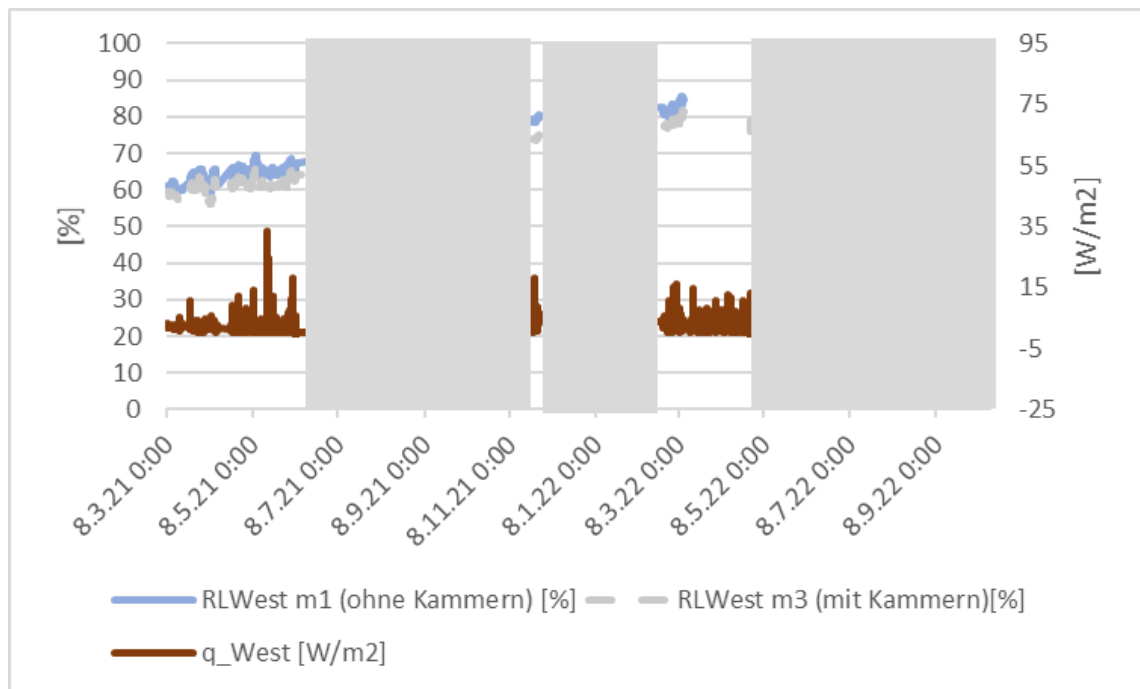


Abbildung 35: relative Luftfeuchte im Bauteil ohne Kammern (blau,) relative Luftfeuchte im Bauteil mit Kammern (grau) und Wärmestrom (rot) Westwand Massivholzgebäude, Zsolia Varga

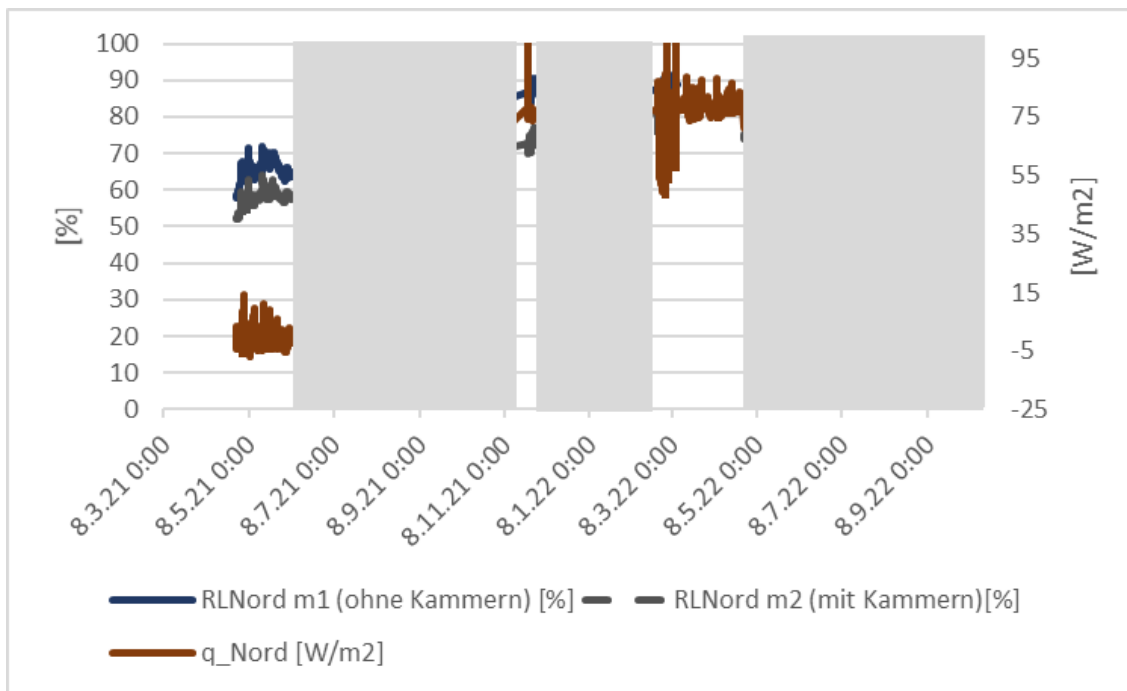


Abbildung 36: relative Luftfeuchte im Bauteil ohne Kammern (orange), relative Luftfeuchte im Bauteil mit Kammern (gelb) und Wärmestrom (rot) Nordwand Massivholzgebäude, Zsofia Varga

Abbildung 35 und Abbildung 36 können die relativen Luftfeuchten sowie Lufttemperaturen der West- und Nordaußenwand des Massivholzgebäudes in der Tiefe $t=100$ mm im Bauteil im Bereich der Luftkammern / ohne Luftkammern entnommen werden. Die relativen Luftfeuchten sind in blau und grau, der Wärmestrom q in rot abgebildet.

Der Wärmestrom bewegte sich zwischen -5 - 95 W/m^2 . Die Nordwand wies deutlich höhere Schwankungen hinsichtlich des Wärmestroms als die Westwand auf.

Es konnte festgestellt werden, dass sich sowohl in der Westwand (Abbildung 35), als auch in der Nordwand (Abbildung 36), der Wärmestrom gleich zur Feuchte verhielt. Der Wärmestrom fiel und stieg genauso, wie die relativen Luftfeuchtwerte.

Vergleich Nord-/ Westwand Mauerwerksgebäude

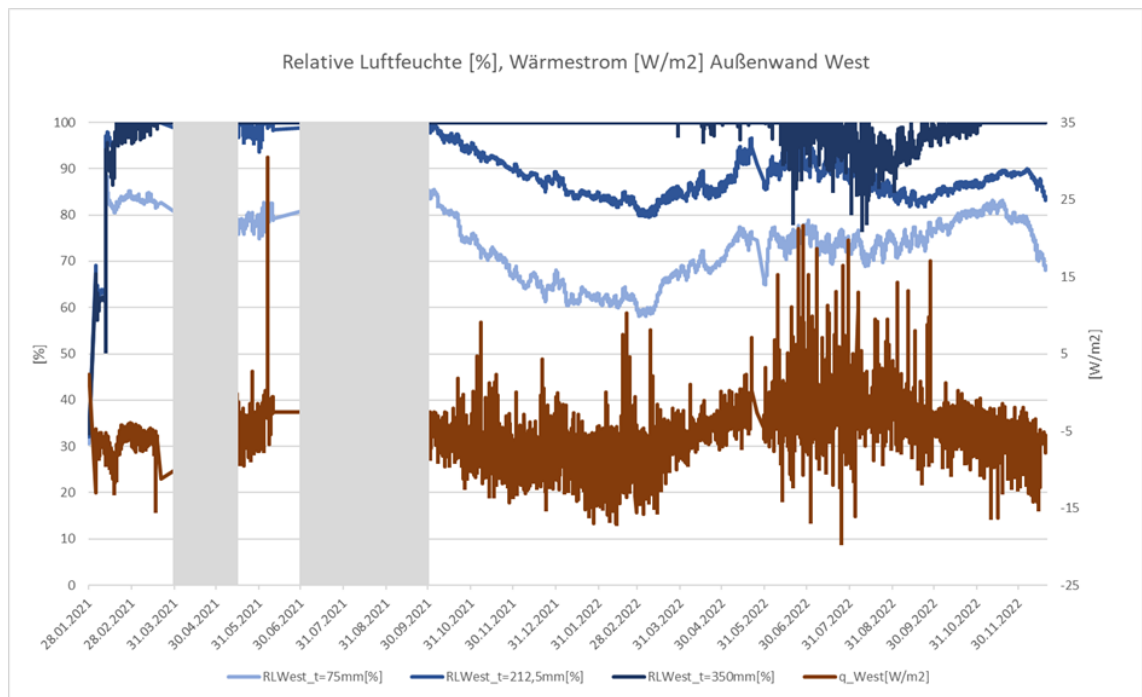


Abbildung 37: relative Luftfeuchte (blau) und Wärmestrom (rot) Westwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga

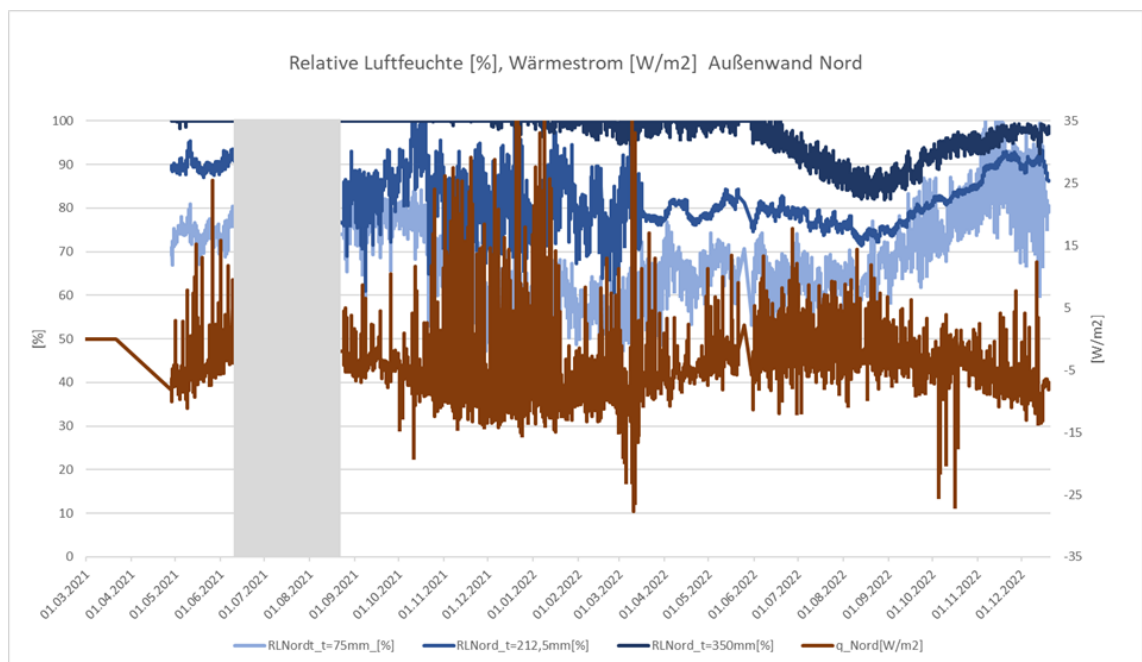


Abbildung 38: relative Luftfeuchte (blau) und Wärmestrom (rot) Nordwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga

Abbildung 37 und Abbildung 38 können die relativen Luftfeuchten des Bauteiles Mauerwerksaußenwand entnommen werden. Die Werte wurden in den Tiefen $t = 75 \text{ mm}$, $t = 212,5 \text{ mm}$ und $t = 350 \text{ mm}$ gemessen. Das Bauteil hatte dabei eine Gesamttiefe von 425 mm . Je tiefer die Sensoren eingebracht sind, desto dunkler ist der blaue Farbton in der

Abbildung. In roter Farbe wurde der Wärmestrom abgebildet. Diese bewegte sich zwischen -25 - 35 W/m^2 . Die Nordwand wies deutlich höhere Schwankungen hinsichtlich des Wärmestroms als die Westwand auf.

Es konnte festgestellt werden, dass sich sowohl in der Westwand (Abbildung 37), also auch in der Nordwand (Abbildung 38) der Wärmestrom gleich zur Feuchte verhielt. Der Wärmestrom fiel und stieg im selben Maße, wie die relativen Feuchtwerte, unabhängig davon, in welcher Tiefe sich der Sensor im Bauteil befand.

Sowohl beim Mauerwerks-, als auch beim Massivholzgebäude gab es höhere relative Luftfeuchtwerte auf der Westseite als auf der Nordseite.

Der Wärmestrom nahm beim Massivholz- und im Mauerwerksgebäude mit steigender relativer Feuchte zu.

3.6. Fazit

Es wurden bei allen drei Gebäuden das Feuchteverhalten aus der Nord- und Westaußenwand, sowie die Wärmestromwerte untersucht. Es konnte bei allen drei Gebäudevarianten ein abnehmendes Feuchteverhalten und somit eine Austrocknung der Wände festgestellt werden.

Die vor Ort gemessenen Wärmestromwerte unterschieden sich von den Herstellerangaben.

Dies ist einerseits, darauf zurückzuführen, dass die Herstellerangaben auf Laborwerten mit festen Umgebungsbedingungen beruhen. Dennoch besteht hier noch genauer Forschungsbedarf.

Die Messtechnik aus TingerForge® Bauteilen bestehend, erwies sich als nicht robust genug und fehleranfällig. Oftmals ist die Messtechnik aus nicht ersichtlichen Gründen ausgefallen, weshalb die Verwendung dieses Systems nicht für Langzeitmessungen zu empfehlen ist. Auch war eine durch Bewohnerinnen erschwerte Zugänglichkeit zu den Messinstrumenten gegeben, weshalb die Programmierung bzw. Fehler in der Messtechnik nicht gleich erkannt und behoben werden konnten. Für zukünftige Projekte sollte folglich, wenn für die Messsysteme möglich, ein Remote-Zugriff auf das System ermöglicht werden, damit von außen die Funktion der Messtechnik und somit eventuelle Messausfälle überwacht und erkannt werden können. Das Auslesen der Messergebnisse der GANN®-Messtechnik muss beispielsweise händisch erfolgen. Messtechnik sollte am besten von erfahrenen Firmen eingebaut werden, damit das Vorliegen von Ergebnisse mit Sicherheit gewährleistet ist.

4. Raumkomfort und Energie

Das Übergeordnete Ziel dieses Forschungsteils ist es, zu überprüfen, ob das entwickelte Gebäudekonzept Einfach Bauen in der Realität hinsichtlich Energieverbrauch und thermischen Komfort „funktioniert“. Dabei sind die Teil-Ziele das Monitoring der Forschungshäuser bezüglich Energieverbrauch und thermischen Komfort durchzuführen, eine Datenverarbeitungsumgebung aufzubauen, die Daten zu bereinigen und auszuwerten, das Simulationsmodell aus Einfach Bauen 2 anhand der Messdaten zu validieren, und Rückkopplungseffekte zu definieren. Dabei sollen folgende detaillierte Forschungsfragen beantwortet werden:

- 1. Können vergleichende Aussagen zu den drei Forschungshäusern bezüglich Konstruktion, thermischer Komfort und Energieverbrauch getroffen werden? Wenn ja, welche Gebäudekonstruktion schneidet am besten ab und warum?**
- 2. War die Annahme eines idealen Nutzers sinnvoll, um vergleichende Aussagen zu thermischem Komfort und Energieverbrauch zu erhalten?**
- 3. Spiegeln sich die Simulationsergebnisse bezüglich Raumlufthtemperatur, Lüftungsverhalten, Heizwärmebedarf und Überhitzungsstunden in der tatsächlichen Nutzung wieder? Besteht ein Performance Gap?**
- 4. Treten die Annahmen aus der Simulation auch in der tatsächlichen Nutzung ein? Wenn nicht – wie müsste das Konzept angepasst werden?**

Um die Forschungsfragen zu beantworten, beschreibt Kapitel 4 die Umsetzung der Ziele, gegliedert in fünf Teile: beginnend mit der Vorstellung des Messkonzepts (4.1) sowie der Messtechnik (4.2), gefolgt von der Zusammenfassung der Messergebnisse (4.3), der Umsetzung von Validierung und Rückkopplung (4.4), und abrundend mit dem Fazit (4.5), welches auf die Forschungsfragen eingeht.

4.1. Messkonzept

Um die drei Forschungshäuser bezüglich ihres thermischen Raumkomforts und Energieverbrauchs vergleichen und Aussagen treffen zu können, wurden die finanziellen, technischen und organisatorischen Möglichkeiten darauf fokussiert jeweils drei Wohnungen je Haus mit detaillierter Messtechnik auszustatten. Die Entscheidung fiel auf das zweite Obergeschoss (2. OG) jedes Gebäudes, um somit das „Worst-Case Scenario“ bezüglich der Überhitzungsstunden im Sommer untersuchen zu können. Die Verschattung der Gebäude untereinander ist im 2. OG am geringsten. Die fast exakte Nord-Süd-Ausrichtung der Gebäude ermöglicht diesen Fall in den Süd-Wohnungen, die über ihre Süd-/Ost- und West-Fenster im 2. OG am meisten Sonnenstrahlung erhalten – im Vergleich zu den tiefer liegenden Geschossen. Das Erdgeschoss (EG) und erste Obergeschoss (1. OG) wurden nicht gemessen. Die Abfrage des Gesamtverbrauchs für Trinkwarmwasser- und Heizwärmeverbrauch der drei Häuser erfolgte über die B&O Hausverwaltung, die Abfrage für den Stromverbrauch über die Stadtwerke Bad Aibling.

Der Einbau der Messtechnik erfolgte in den Monaten Dezember 2020 und Januar 2021. Im Februar 2021 wurde die Dateninfrastruktur aufgebaut und jeder Sensor programmiert. Auf diese Weise wurde ein Netz aus insgesamt mehr als 300 Sensoren aufgebaut. Von März bis August 2021 wurden die Häuser durch die Hausverwaltung der B&O Mitverträge mit den Mietparteien geschlossen. Diese Zeitspanne wurde als Testphase der Messung genutzt, die Datenübertragung verbessert, das Energiemonitoring eingebaut und Sensoren kalibriert und nachgerüstet, wie z.B. die Schwarzkugeltemperatur in den Schlaf- und Wohnräumen. Zum Beginn der Heizphase 2021 konnte mit der vollständigen Aufzeichnung begonnen werden. Hieraus resultiert für den vorliegenden Schlussbericht das Messjahr September 2021 bis August 2022, das den Abbildungen der Messergebnisse in diesem Kapitel zu Grunde liegt.

Aufgrund der nahezu Nord-Süd-Ausrichtung der drei Forschungshäuser werden im 2. OG die gemessenen Wohneinheiten im Folgenden als Nord-, Ost- und Süd-Wohnung bezeichnet. Abbildung 39 stellt die Zuordnung dar.

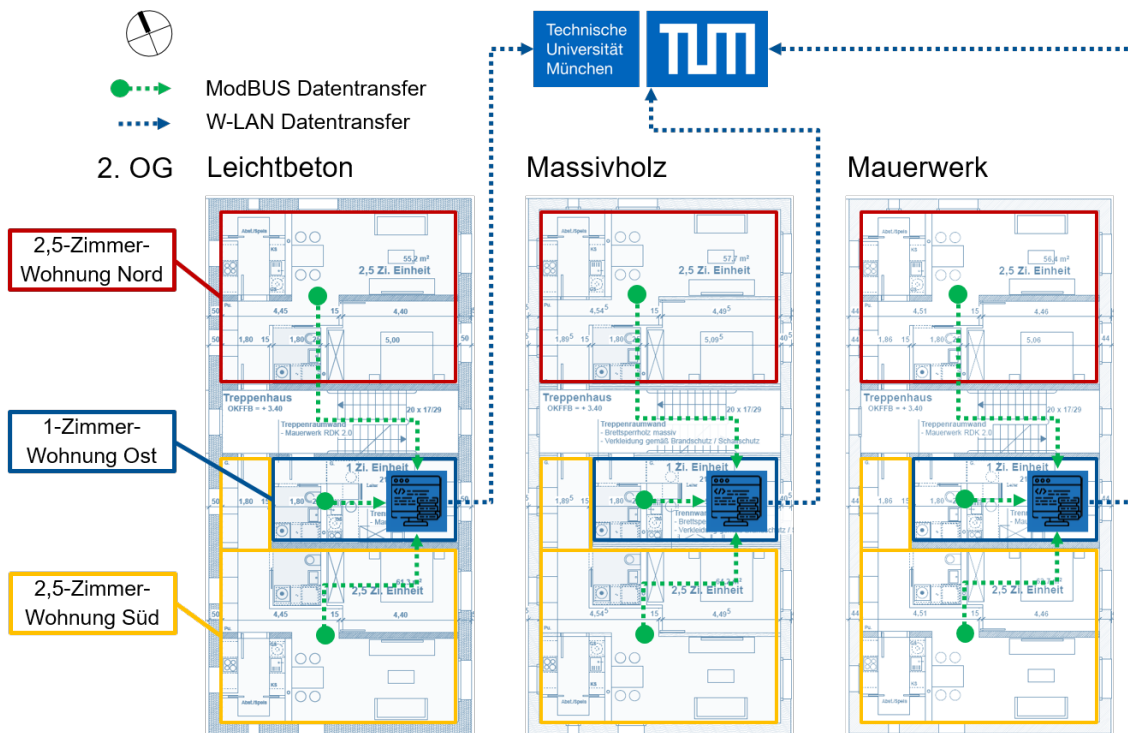


Abbildung 39: Datentransfer intern und extern der Forschungshäuser

Im Grundriss unterscheidet sich die Süd-Wohnung von der Nord-Wohnung lediglich durch einen um die Breite der Ost-Wohnung verlängerten Flur, sowie eine Loggia, die an das Wohnzimmer anschließt. Die Nord- und Süd-Wohnungen sind bewohnt, die 1-Zimmer-Ost-Wohnung hingegen bleibt für die Zeit des Monitorings unbewohnt. Grund hierfür ist eine Vergleichsmessung der drei Bauweisen ohne den Einfluss der BewohnerInnen. Die Wohnung bietet damit auch Platz für Datensammlung und Datentransfer. Abbildungen 39 und 40 zeigt die am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen entwickelte Dateninfrastruktur in Bad Aibling: In jedem Gebäude werden die Komfort- und Energieparameter via ModBUS-RS485-Datenprotokoll von den Wohneinheiten Nord, Ost und Süd auf einen Rechner in der Ost-Wohnung und via Router an die TUM übertragen. Die Datenerhebung funktioniert in den drei Forschungshäusern unabhängig voneinander, sodass im Falle eines Stromausfalls in einem Gebäude die anderen zwei Häuser weiter Daten senden können. Die Wetterstation ist auf dem Dach des Leichtbetonhauses installiert und überträgt die Wetterdaten via Rechner des Leichtbetonhauses an die TUM (s. WD in Abbildung 40).

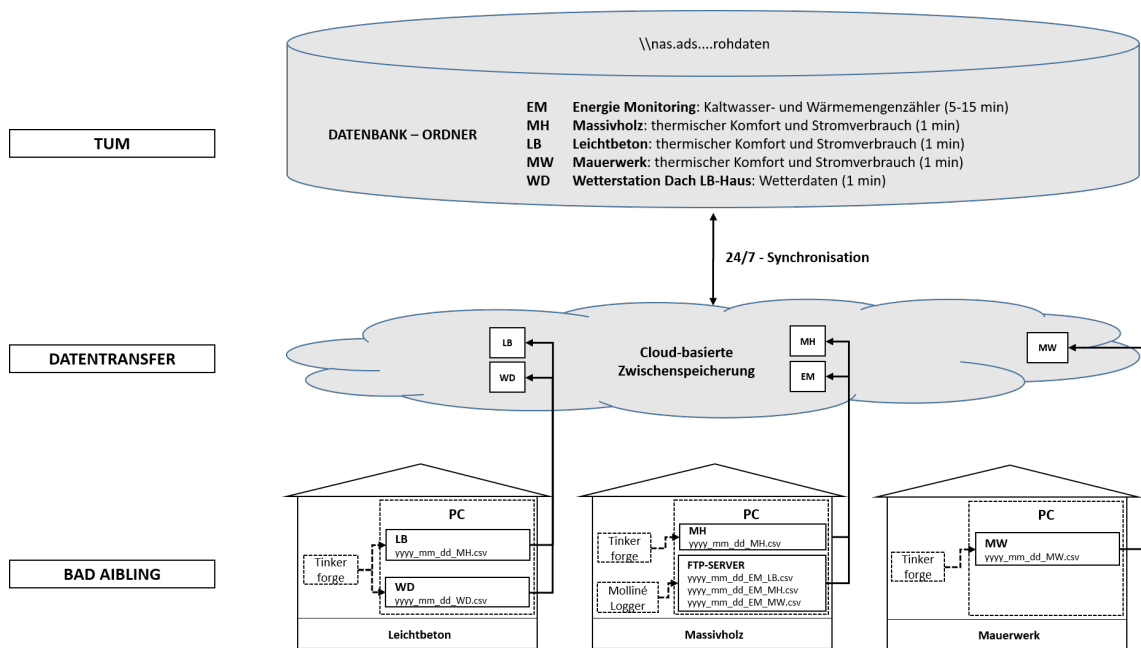


Abbildung 40: Dateninfrastruktur der Forschungshäuser in Bad Aibling

Die Datenerhebung erfolgte im 1-Minuten-Zeitintervall, das Energie-Monitoring wurde aufgrund der unregelmäßigen Funkabfrage in wechselnden Zeitintervalle von 5 bis 15 Minuten aufgezeichnet. Alle 24 Stunden speicherte das Sensorsystem vor Ort auf den Rechnern für jede Sensor-Gruppe eine CSV-Datei ab, die via Datentransfer (W-LAN Router) im entsprechenden Zielordner der TUM-Datenbank abgelegt wurde. Die Cloud-basierte Zwischenspeicherung ermöglichte eine konstante Synchronisation der CSV-Dateien, sodass eine aktuelle Dateneinsicht und Datenbearbeitung mit einem Verzug von einem Tag möglich war.

Für die Datenverarbeitung der CSV-Dateien wurde ein Sensorkennzeichnungssystem (SKS) entwickelt. Der dabei entstehende Datenpunktname beschreibt einen Datenpunkt eindeutig. Die Bezeichnung ist zusammengesetzt aus mehreren Teilen, die jeweils eine bestimmte Information transportieren. In vorliegendem Fall besteht der Name aus den Teilen Gebäude, Wohneinheit, Zimmer, Wandorientierung und Sensortyp. Somit kann jeder Sensor eindeutig zugeordnet werden. Abbildung 41 zeigt das SKS der Komfortmessung und die daraus ableitbaren Informationen.

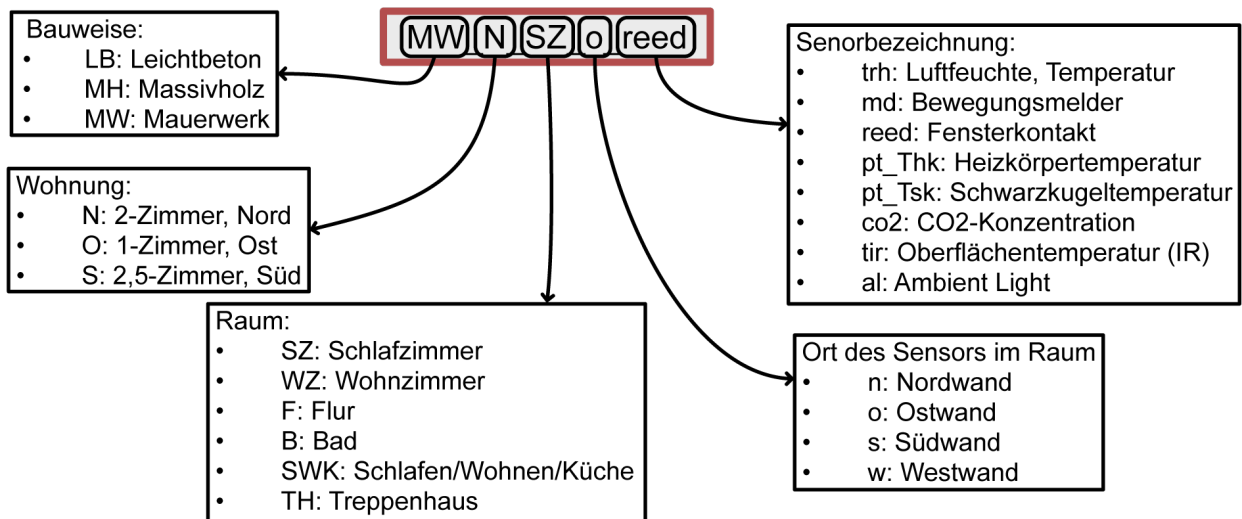


Abbildung 41: Sensorkennzeichnungssystem des Komfortmonitorings

Der gezeigte Beispielname MW_N_SZ_o_reed sagt aus (von links nach rechts), dass sich im Mauerwerkshaus, in der Nordwohnung, im Schlafzimmer, an der Ostwand ein Fensterkontakt (Reed Sensor) befindet, der ein Auf-/Zu-Signal (1/0) sendet. Mit Hilfe dieses SKS wurden im Messprojekt die semantischen Informationen über einen Datenpunkt konkret und sicher abgeleitet. Abbildung 42 zeigt beispielhaft für das 2.OG des Leichtbetonhauses den nach SKS entwickelten Sensorplan.

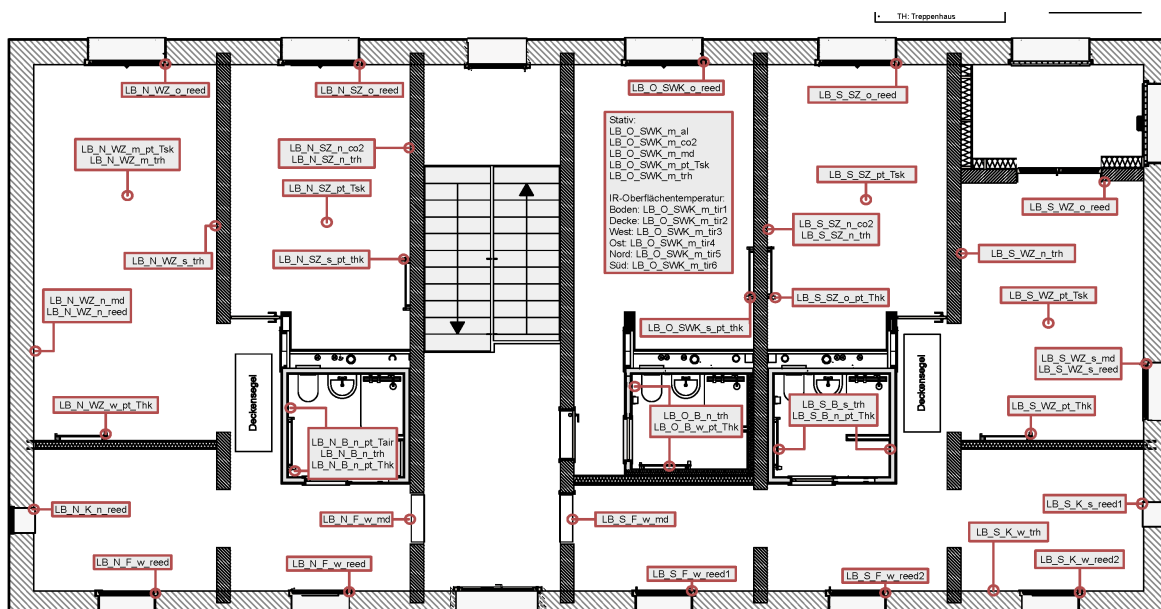


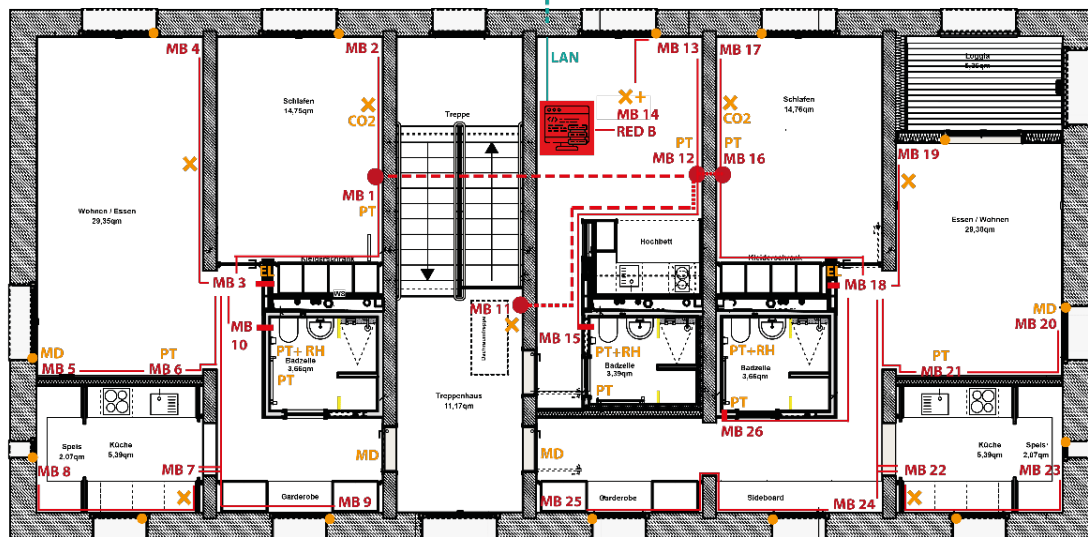
Abbildung 42: Sensorplan nach SKS; Grundrissplan 2.OG Leichtbetonhaus (links: Norden)

Folgende Aufzählung teilt die eingebauten Sensoren in ihre Parametergruppen ein:

- Fensterkontakte an allen Fenstern der Wohneinheiten
- Lufttemperatur- und Luftfeuchtesensoren in allen Räumen
- Schwarzkugeltemperatursensoren in allen Schlaf- und Wohnzimmern
- CO2-Sensoren in den Schlafzimmern
- Oberflächentemperatursensoren an den Heizkörpern
- Infrarotbewegungsmelder an den Wohnungstüren und Wohnzimmerfenstern
- Wandoberflächensensoren der 1-Zi-Ost-Wohnung

Abbildung 43 zeigt die Anordnung der Sensoren im Grundriss

Forschungshäuser Bad Aibling
Leichtbetonhaus
2. OG



Legende

—	2-fach ModBUS Kabel	PT	Temperatursensor Heizung	X+	Temperatur-, Feuchte-, Oberflächen- und Strahlungssensoren in Raummitte
MB x	Masterbrick + RS485 + SDPS	RH	Feuchtesensor Bad	●	Durchbruch ins Dach
X	Temperatursensor und Feuchtesensor Raumluft	EL	Stromsensor		Kabelführung ins Dach
CO2	CO2-Sensor	●	Fensterkontakt		LAN-Anschluss
		MD	Präsenzmelder		

Abbildung 43: Sensorplan nach Parametern; Grundrissplan 2.OG Leichtbetonhaus

4.2. Messtechnik

Für die Messtechnik des thermischen Komforts und des Stromverbrauchs fiel die Entscheidung auf das Open Source Baukastensystem der Firma Tinkerforge GmbH. Das System bietet eine modulare Bauweise, die per Klickverbindung einfach zu montieren und direkt per USB-Anschluss von einem PC oder Raspberry Pi gesteuert werden können. Die Open Source Software und Protokolle sowie die im Vergleich kostengünstigen und flexibel kombinierbaren und erweiterbaren Bauteile und Sensoren ermöglichten ein Messkonzept dieses Umfangs. Durch Anforderung von Kostenanfragen anderer Messtechnik-Systeme, wie z.B. die der Firma Ahlborn (DE) oder IC-Meter (DK), konnte kein vergleichbares Preis-Leistungsverhältnis und entsprechende Flexibilität gefunden werden.

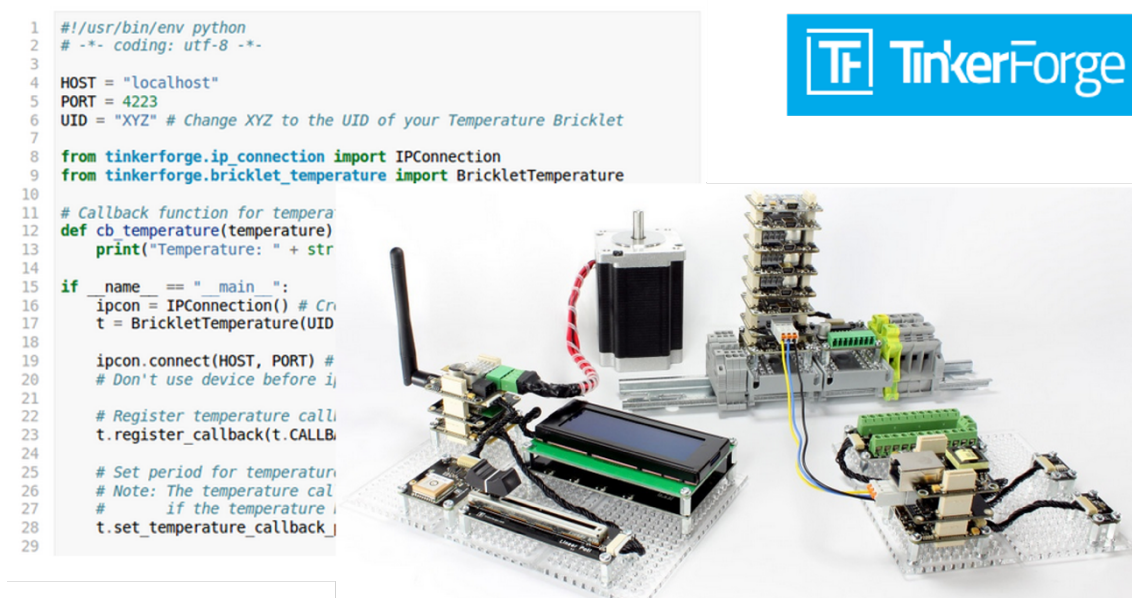


Abbildung 44: Baukastensystem der Firma Tinkerforge GmbH für die Komfortmessung

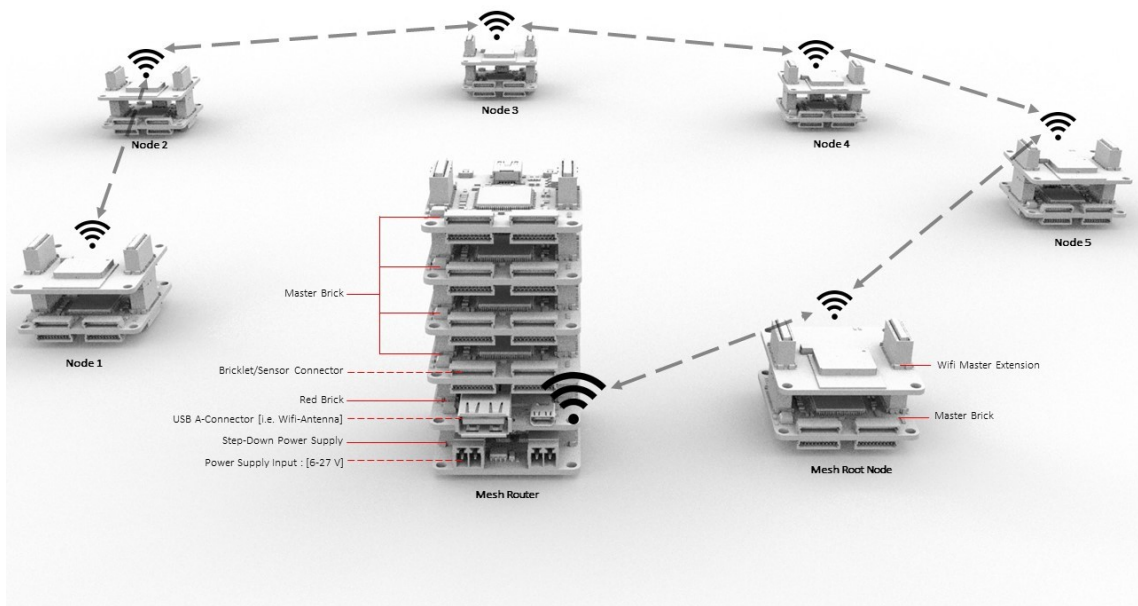


Abbildung 45: Ursprüngliches Messkonzept mit Funk-Datenübertragung via Sensorknotenpunkten

Das ursprüngliche Konzept der Datenübertragung via Funk, wobei jeder Sensorknotenpunkt empfängt als auch weitersendet (Kettenreaktion), scheiterte im Testversuch im Leichtbetonhaus an der Funkübertragung. Störeinflüsse durch Geräte der BewohnerInnen, als auch die benachbarten Abschirmungsanlagen des BND und der NSA wurden als mögliche Ursachen in Betracht gezogen.

Die daraufhin notwendige Konzeptänderung hin zu einer kabelbasierten Datenübertragung erforderte einen aufwendigen Einbau von Kabelkanälen, Aufputzverteilerdosen, sowie die Verlegung von Sensor-, Daten- und Stromkabeln. Die Kabel wurden dabei über das Kaltdach (Abbildung 46). Dies hat zum Nachteil, dass die Messtechnik der Hitze und Kälte des Dachs ausgeliefert ist und es in den aus wissenschaftlicher Sicht interessanten extrem kalten und heißen Tagen zu Datenausfällen kam.

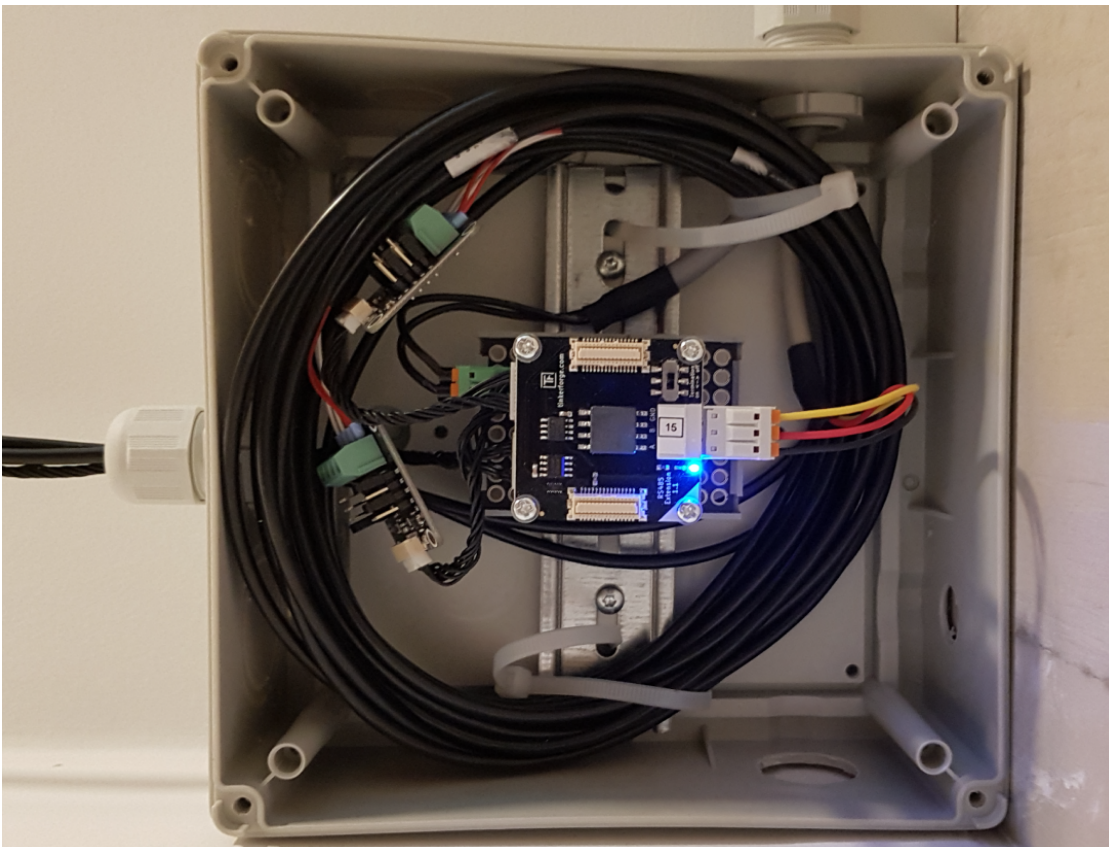
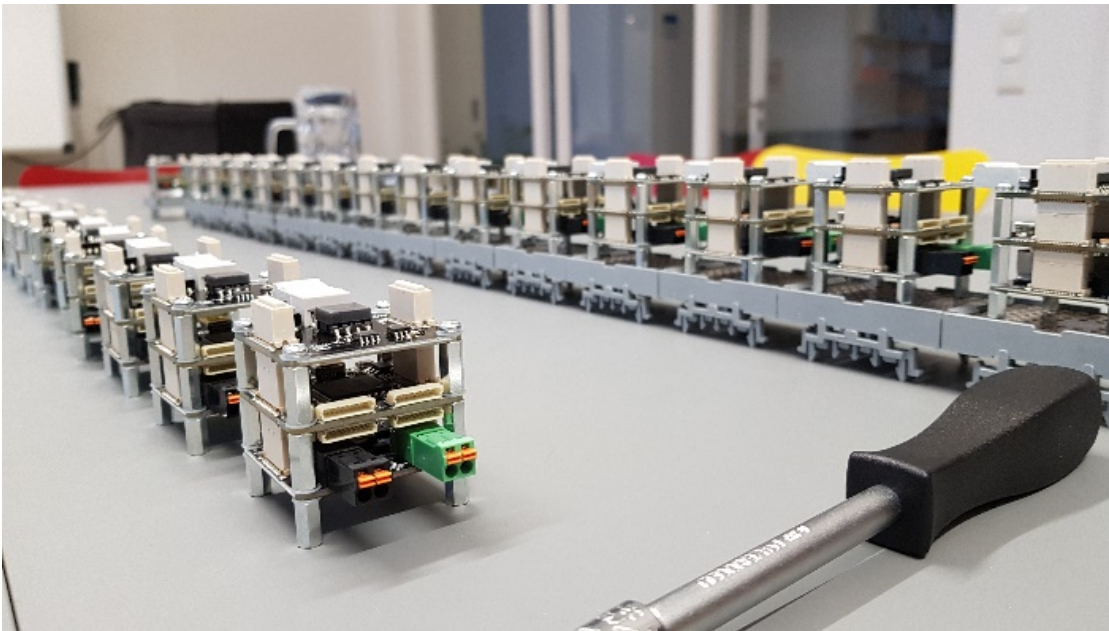


Abbildung 46: Sensorknotenpunkte (Stacks); oben: Vorfertigung, links: Installation vor Ort

Folgende Abbildung zeigt beispielhaft Nahaufnahmen der Sensoren in den Wohneinheiten, sowie die Installation der Wetterstation auf dem Dach des Leichtbetonhauses.



Abbildung 47: Tinkerforge GmbH Sensoren (v.l.n.r.): Fensterkontakt, CO2 (oben, im Bild links), Temperatur und Feuchte (oben, im Bild rechts), PT-Sensor an Heizkörper (unten), Wetterstation mit Pyranometer der Firma Ahlborn



Abbildung 48: Sensor-Installation im Holzhaus; 1-Zi-Ost-Wohnung (links): Sensor-Stativ mit Datentransfereinheit (PC, Monitor, Router); Süd-Wohnung (rechts): Fensterkontakt an Loggia-Türe mit Kabelkanal zum Knotenpunkt

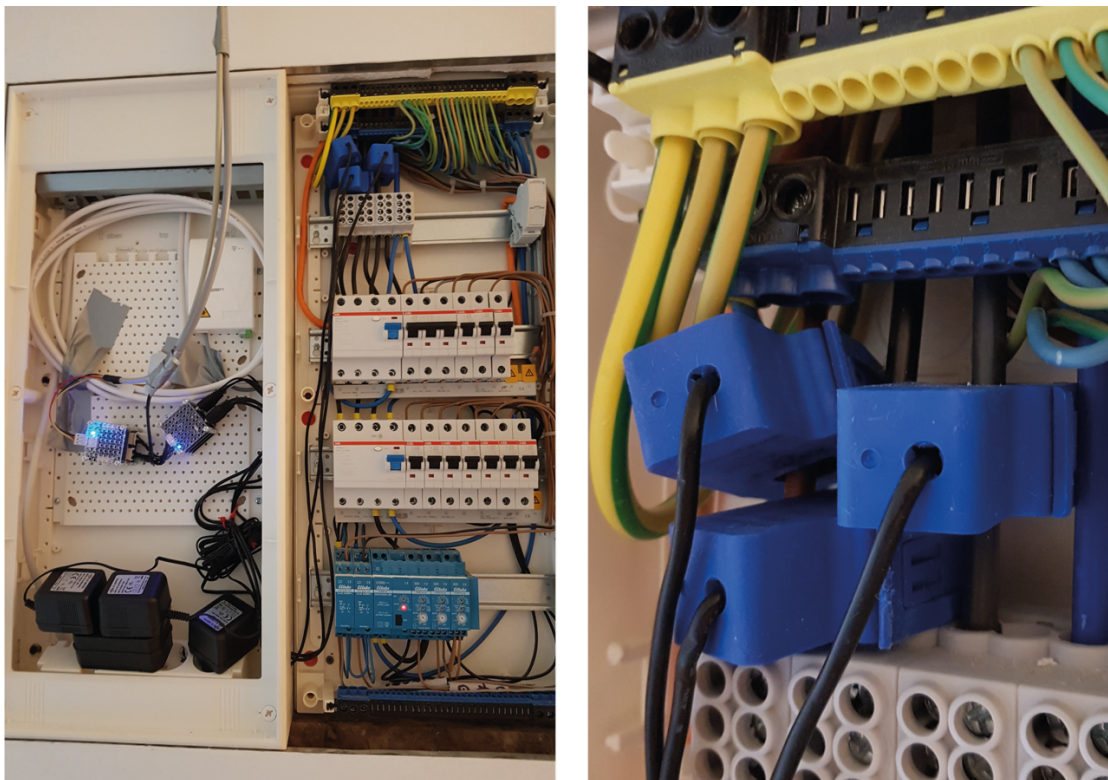


Abbildung 49: Tinkerforge GmbH Stromwandler (rechts) im Sicherungskasten einer Wohneinheit im Leichtbetonhaus

Aufgrund der Flexibilität des Messsystems mit Tinkerforge GmbH Modulen wurden Tinkerforge GmbH Stromwandler an die Phasen der Stromkreise einer Wohnung angebracht. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Messdaten auch nach Korrektur aller Randparameter unlogische Werte anzeigten. Beispielsweise lieferte die Messung negative oder keine Verbrauchswerte bei laufenden elektrischen Endgeräten, die an der gemessenen Phase angeschlossen waren. Selbst die Beratung durch die Tinkerforge GmbH, die Stadtwerke Bad Aibling und der B&O Elektro Bayern GmbH konnte keine Lösung herbeiführen. Anstelle der Messwerte behalf sich das Messteam mit dem regelmäßigen Ablesen der Stromzähler der Wohneinheiten ab Februar 2022.

Für die Bereitstellung von Heizenergie wurde jede Wohneinheit mit einer „Wohnungsstation Typ BM“ der Firma Strasshofer ausgestattet. Bei dieser dezentralen Anlage erwärmt sich das Trinkwarmwasser (TWW) im Durchflussprinzip nur bei Anforderung über einen Edelstahl-Plattenwärmetauscher. Der Plattentauscher wird nicht warm vorgehalten, um unnötige Zirkulationsverluste und Legionellenbildung zu vermeiden.

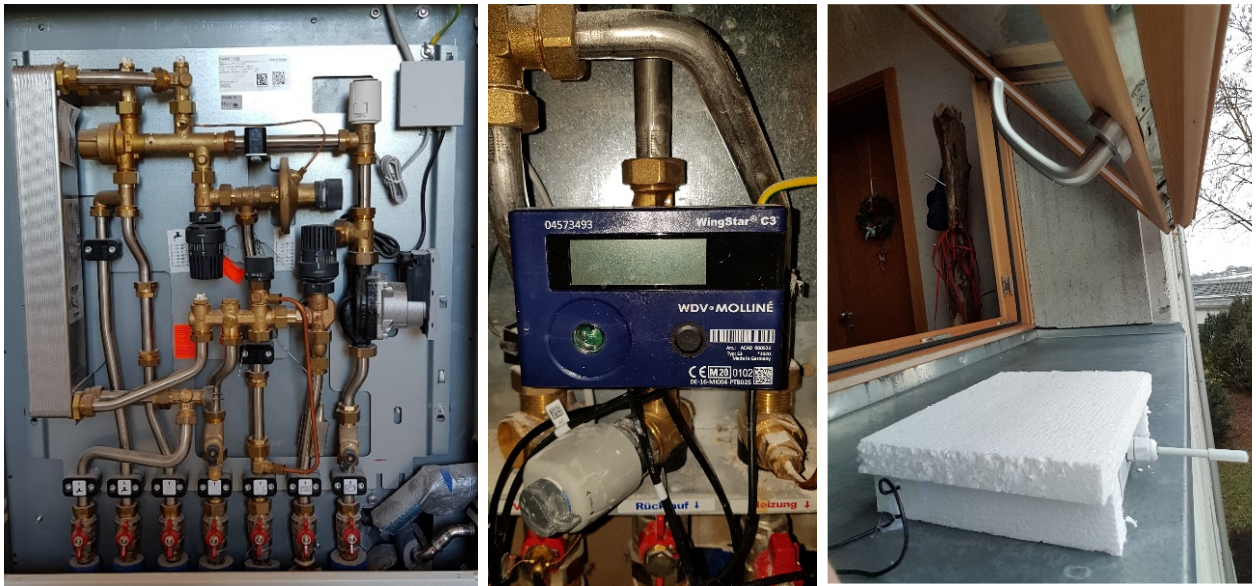


Abbildung 50: links: dezentrale Wohnungsstation für TWW und Heizen der Firma Strasshofer; mitte/rechts: Wärmemengenzähler und Funkverstärker der WDV Molliné GmbH

Die Messung erfolgte via Funkabfrage von Wärmemengenzählern der WDV Molliné GmbH (Abbildung 50). Die Zähler lieferten das Durchflussvolumen in m^3 und die Vor- und Rücklauftemperaturen in $^{\circ}\text{C}$. Die vorgefertigte platzsparende Wohnungsstation machte den nachträglichen Einbau eines zweiten Sensors zur Abfrage der TWW-Menge unmöglich. Aus diesem Grund lieferte das Messprojekt thermische Energieverbrauchsdaten für TWW und Heizenergie. Eine Abschätzung des TWW kann aber im Messprojekt über die Auswertung der Sommerphase 2022 erfolgen (Kapitel 4.4).

Nach Aufbau der Messtechnik und Programmierung der Sensoren wurde das Messsystem getestet und Fehler in der Datenerhebung und dem Datentransfer behoben. Die Werte der kalibrierten Sensoren wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Dabei kam es zu Abweichungen, die entweder behoben wurden (Austausch fehlerhafter Sensoren) oder im Nachbereitungsprozess der Daten korrigiert wurden. Abbildung 51 zeigt ein Beispiel für Abweichungen der Temperatur- und Feuchtesensoren in den drei Forschungshäusern. Während die Abweichungen der Raumlufttemperaturen vernachlässigbar gering waren, mussten die Abweichungen der relativen Luftfeuchten im Nachbereitungsprozess korrigiert werden. Hier war die größte Abweichung im Mauerwerkshaus zu verzeichnen – 12.8%-Punkte in der mittleren Differenz – welche auch auf große Schwankungen der Luftfeuchte im Mauerwerkshaus hinweist.

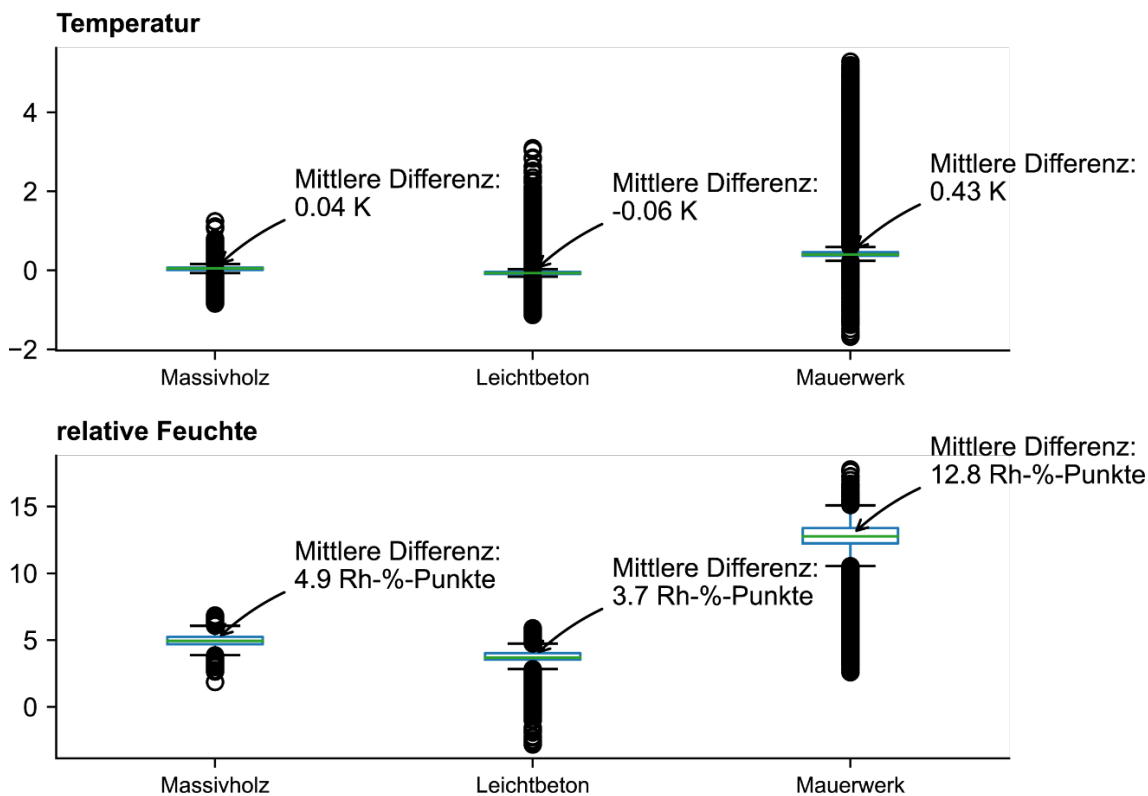


Abbildung 51: Beispiel für Abweichungen der Temperatur- und Feuchtesensoren

Im letzten Schritt der Nachbearbeitung wurden die Daten hinsichtlich nicht plausibler Werte (Ausreißer) bereinigt. Im Anschluss erfolgte die Auswertung der Messergebnisse, die im Kapitel 4.3 zusammenfassend gezeigt und diskutiert werden.

4.3. Messergebnisse

4.3.1. Thermischer Komfort

Für das Messjahr September 2021 bis August 2022 wird der gemessene thermische Komfort nach der Komfortbewertung der DIN EN 16798-1:2021 als vergleichender Maßstab dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Norm auf die für die Planung benötigte Berechnung (Simulation) des thermischen Komforts bezieht. Deshalb wird erwartet, dass die Messwerte deutlich vom Komfortbereich nach Norm abweichen können. Dennoch lohnt diese Form der Komfortbewertung, da anhand der Ergebnisse die Komfortbereiche der Norm diskutiert werden können.

Die Messdaten der Raumluft- und Strahlungstemperatur mit Minuten-Zeitschritt wurden auf ein stündliches Zeitintervall reduziert, die operative Temperatur (Top) berechnet und mit dem ermittelten Anwesenheitssignal verknüpft. Aus der ebenfalls auf ein stündliches Intervall reduzierte Außenlufttemperatur (Tamb) wurde nach DIN EN 16798-1:2021-B2.2

der gleitende Mittelwert berechnet, der das adaptive Komfortband auf der x-Achse definiert. Somit stellt jeder rote Punkt als „Tamb/Top-Datenpaar“ einen Zustand pro Stunde über das Messjahr dar.

Die Grafen sind sortiert nach Wohnung und Raum (je Abbildung), sowie nach Gebäude (Leichtbeton, Massivholz, Mauerwerk). Je Gebäude sind zwei Komfortgrafiken dargestellt: der obere Graf zeigt das Komfortband nach DIN EN 16798-1/NA:2021-06, welches für das gesamte Jahr definiert ist. Der untere Graf zeigt das adaptive Komfortband nach DIN EN 16798-1:2021-B2.2 bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes, beginnend ab 10°C gemittelter Außenlufttemperatur. Beide Komfortdefinitionen gelten für Konzepte ohne maschinelle Kühlungsanlagen. Folgende Abbildungen zeigen die Auswertungen für Schlaf- und Wohnzimmer der Nord-Wohnungen, gefolgt von den Schlaf- und Wohnzimmern der Süd-Wohnungen.

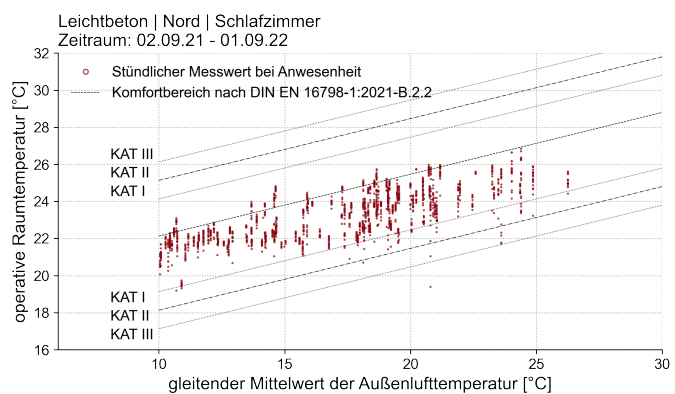
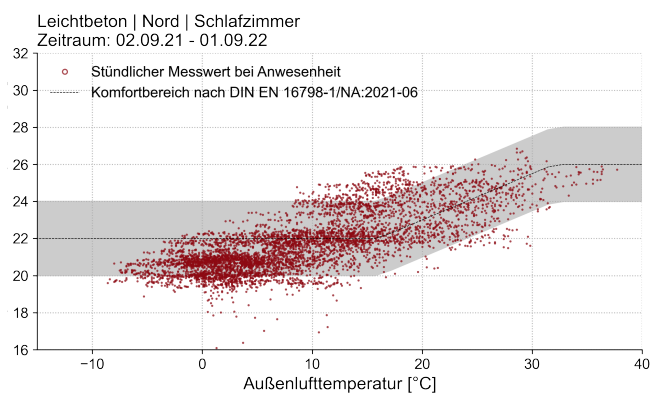
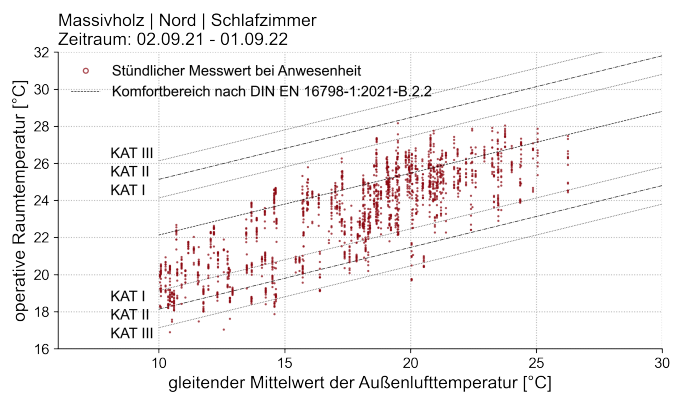
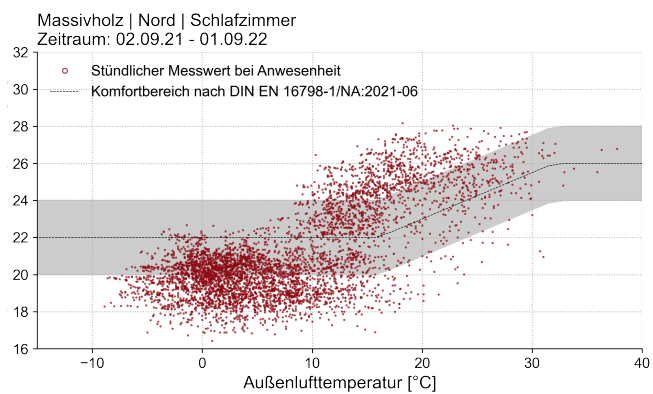
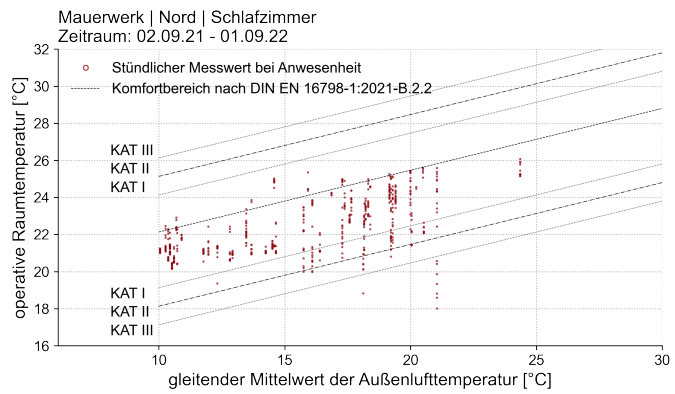
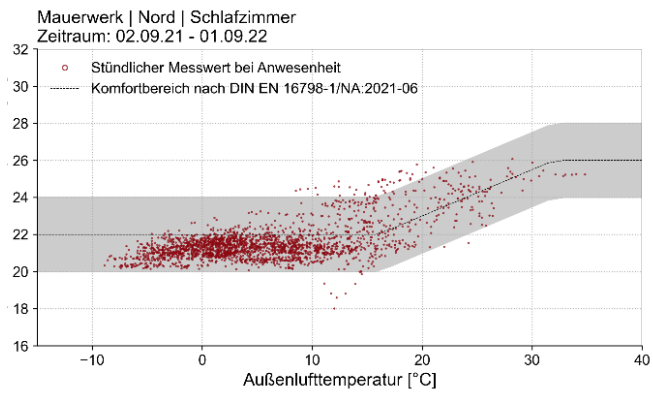
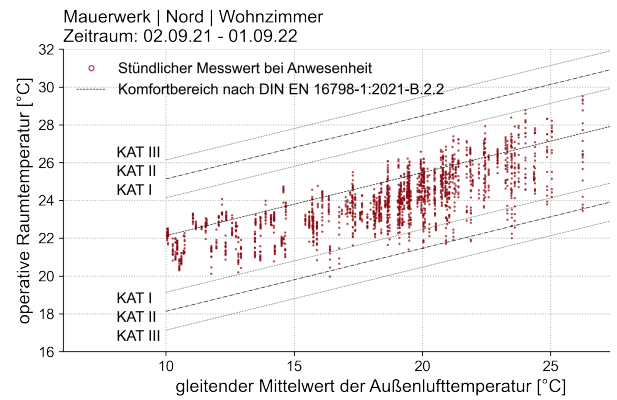
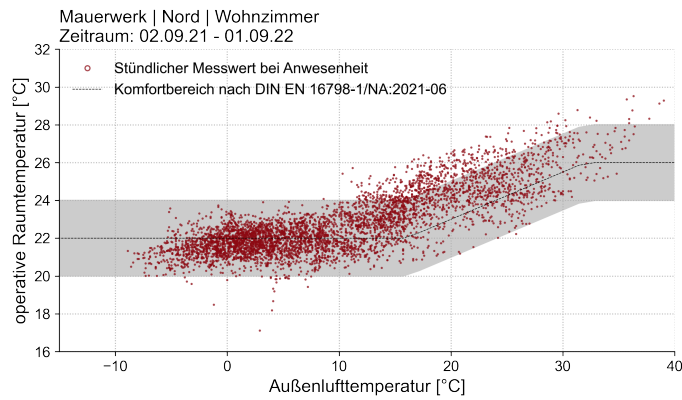
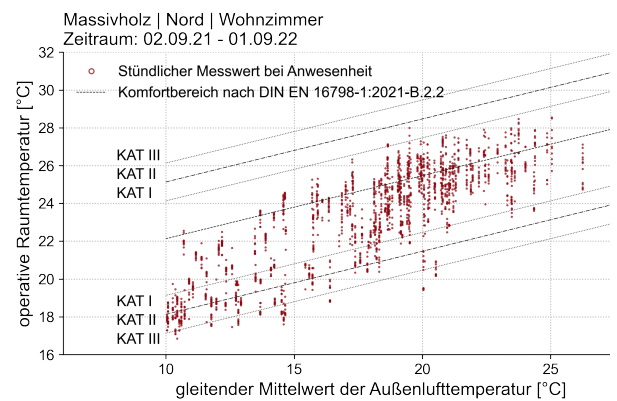
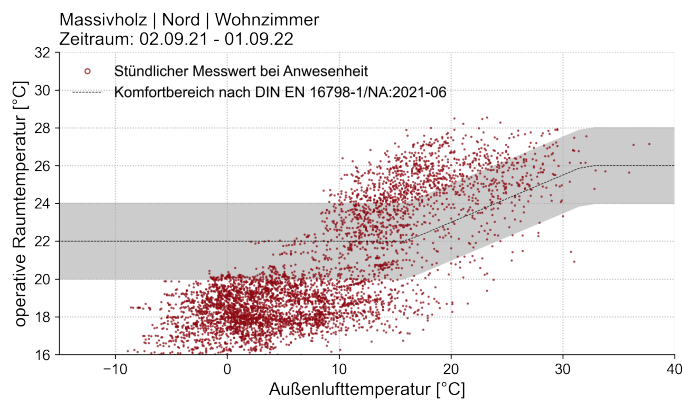


Abbildung 52: Thermischer Komfort – 2. OG | Wohnung Nord | Schlafzimmer

Mauerwerk



Massivholz



Leichtbeton

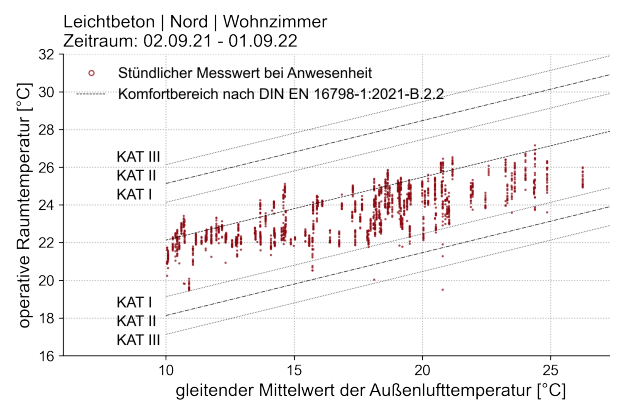
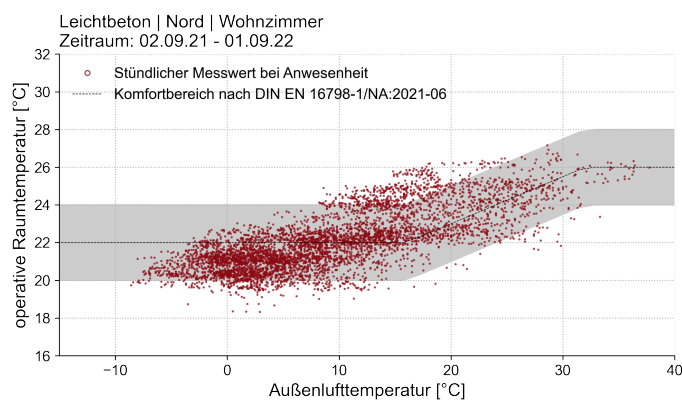


Abbildung 53: Thermischer Komfort – 2. OG | Wohnung Nord | Wohnzimmer

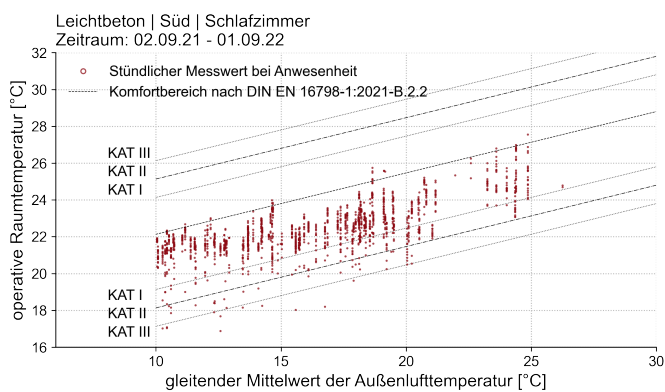
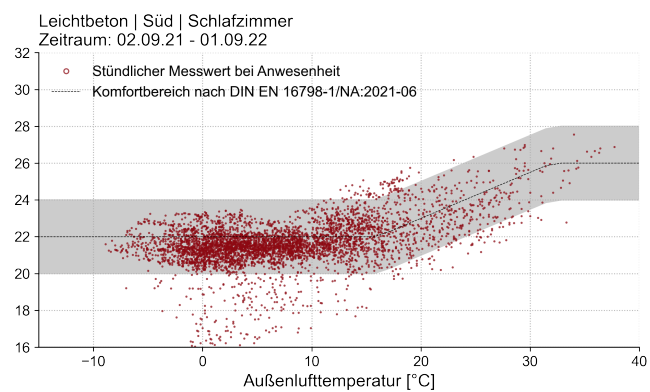
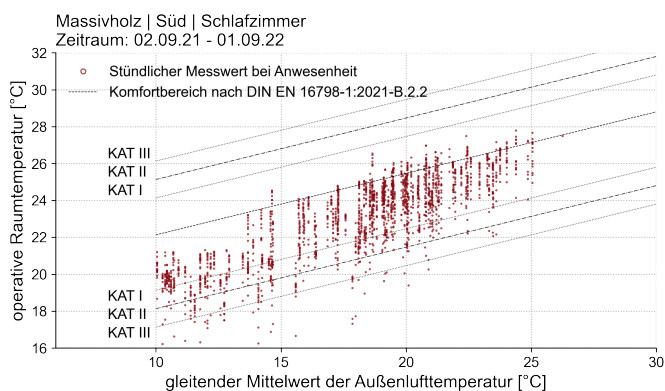
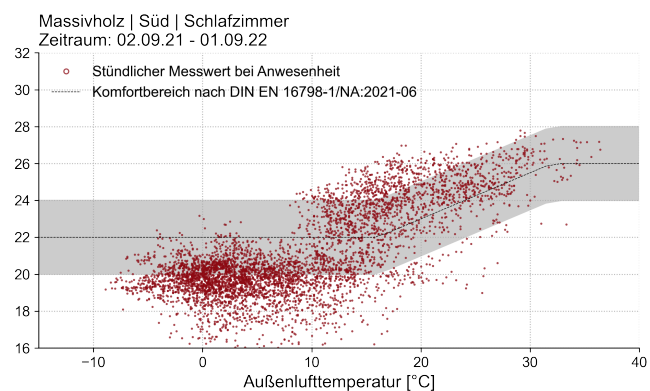
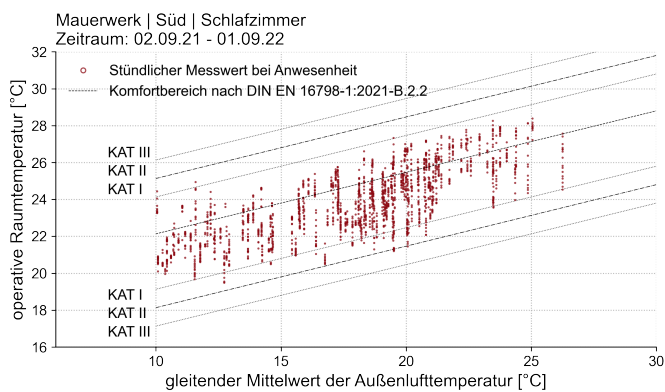
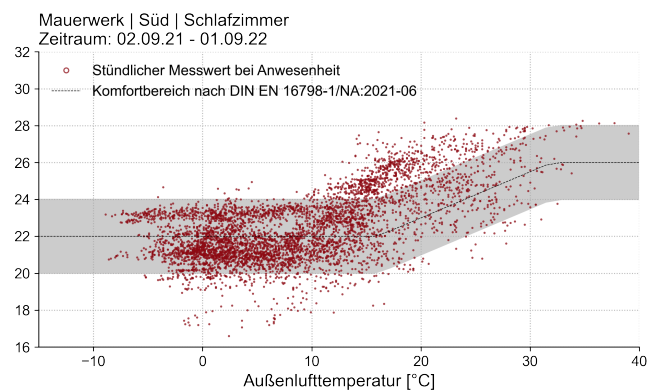


Abbildung 54: Thermischer Komfort – 2. OG | Wohnung Süd | Schlafzimmer

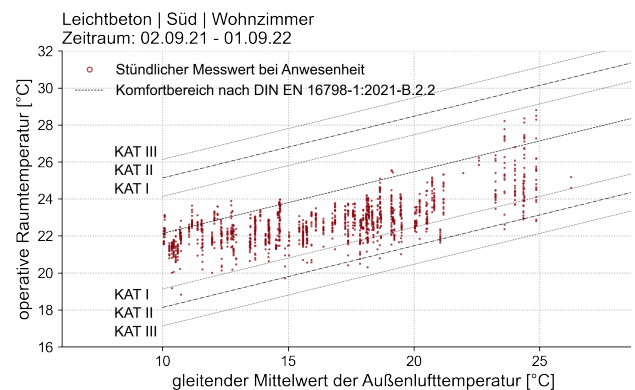
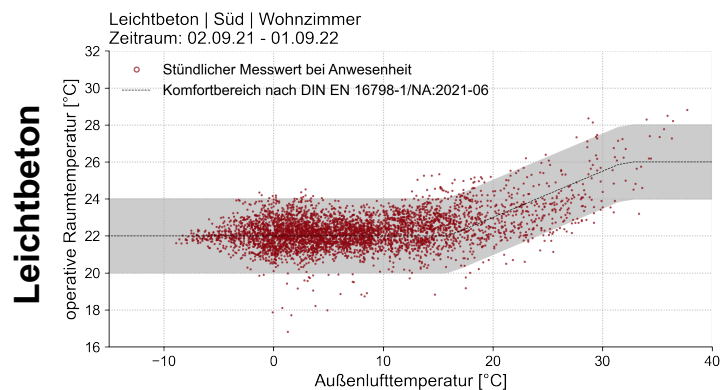
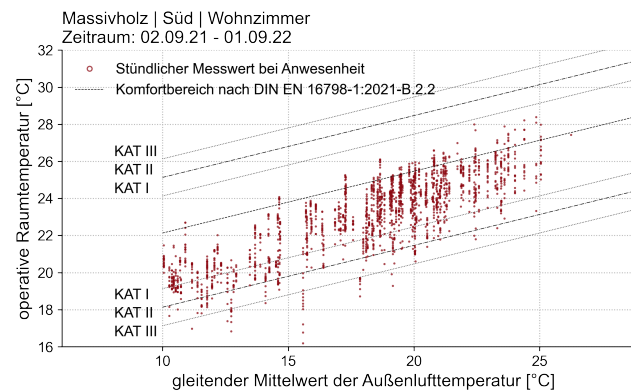
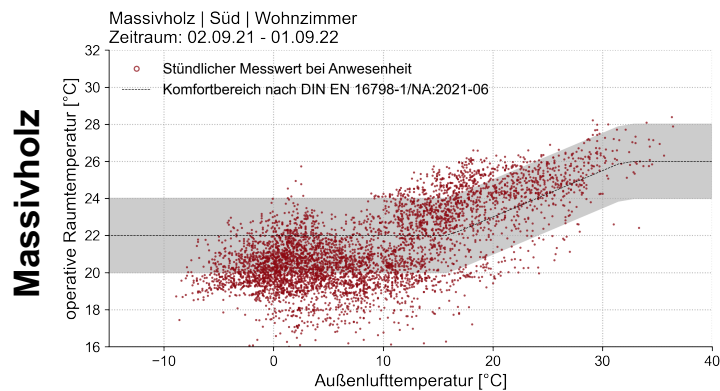
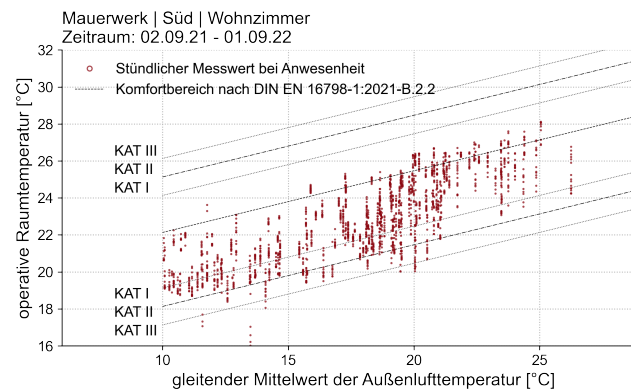
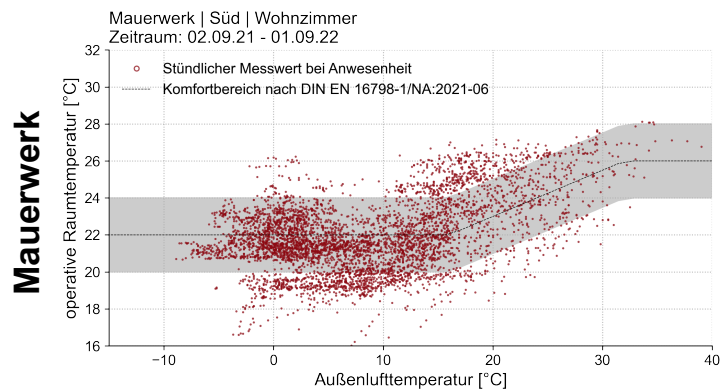


Abbildung 55: Thermischer Komfort – 2. OG | Wohnung Süd | Wohnzimmer

Die vergleichende Betrachtung der operativen Temperatur lässt folgende Erkenntnisse zum thermischen Komfort zu:

Im Vergleich reagiert die Massivholzkonstruktion zum Innenraum viel stärker auf interne Gewinne durch solare Einträge, Geräte und Personen als die anderen Konstruktionen.

Die Punktwolken (oberer Graf) der Massivholz-Wohnungen unterteilt sich in zwei Gruppen mit niedrigen und hohen Innenraumtemperaturen, die in der Übergangsjahreszeit beide vorkommen. Zudem erreichen die hohen Innenraumtemperaturen im Sommer Werte bis 28,4°C, wie z.B. im Wohnzimmer der Nord-Wohnung.

An heißen Tagen, $T_{amb} > 30^{\circ}\text{C}$, liegen alle Konstruktionen im Komfortband. Meist liegen sie schon bei $T_{amb} > 28^{\circ}\text{C}$ im Komfortband (oben), mit Ausnahme der eben erwähnten Massivholz-Wohnungen. Nach dieser Auswertung und auch nach dem Gesamtergebnis der Nutzerumfrage (s. Kapitel 5), kommen die Baukonstruktionen Leichtbeton und Mauerwerk ohne außenliegenden Sonnenschutz aus, bei der Massivholzkonstruktion liegen die Messungen in Teilen deutlich über dem Komfortband, vor allem in Räumen mit Westfenstern.

Allerdings treten bei allen Konstruktionen auch Übertemperaturgradstunden an moderaten bis kühlen Tagen, $T_{amb} < 20^{\circ}$ auf. Nach Norm sind dies zu warme Zustände, die die NutzerInnen „weglüften“ könnten, dies aber scheinbar nicht tun. Diese Zustände beschreiben das Phänomen der Nutzerpräferenz. In weiterer Analyse der Messdaten soll herausgearbeitet werden, ob nach einem Zustand der Übertemperatur ein nächster mit niedrigerer Temperatur folgt. Dies würde bedeuten, die NutzerInnen hätten sich Abhilfe geschaffen. Aus der Punktwolkenbetrachtung geht diese Information nicht hervor. Dafür zeigen die Punktwolken der Messwerte: Bei einer Auswertung mit dem thermischen Komfortmodell nach DIN EN 16798-1/NA:2021-06 treten sowohl Über- als auch Untertemperaturgradstunden (ÜTGS und UTGS) auf, die durch entsprechendes Nutzerverhalten (UTGS: Heizen, ÜTGS: Lüften) vermeidbar und demnach bewusst von den NutzerInnen gewollt sind. Für die gleichen thermischen Zustände zeigt die Auswertung mit adaptiven Komfortmodell nach DIN EN 16798-1:2021-B2.2 keine einzige Überschreitung der Kategorie II. Lediglich vereinzelte Untertemperaturgradstunden treten auf. Demnach liegen alle ausgewerteten Wohnräume nach Kategorie II im thermischen Komfortbereich. Damit zeigt die Messstudie, dass das adaptive Komfortmodell nach DIN EN 16798-1:2021-B2.2 die Nutzerpräferenz besser abbildet, als das Komfortmodell nach DIN EN 16798-1/NA:2021-06. Diese Erkenntnis ist relevant für die derzeitige europaweite Diskussion, ob die Länder ihre Komfortdefinitionen nach Nationalem Anhang verwenden sollten, oder aber länderübergreifend das adaptive Komfortmodell anwenden sollten. Was die deutsche Norm betrifft, wäre eine Kombination beider Komfortmodelle vermutlich am sinnvollsten.

Im zweiten Teil der thermischen Komfortbewertung werden die Messdaten der Luftfeuchte im Außen- und Innenraum mittels Hx-Diagramm dargestellt. DIN 1946-6 definiert hier den Komfortbereich, der als graues Polygon im Diagramm hinterlegt ist.

Wohnung Nord | Schlafzimmer

Wohnung Nord | Wohnzimmer

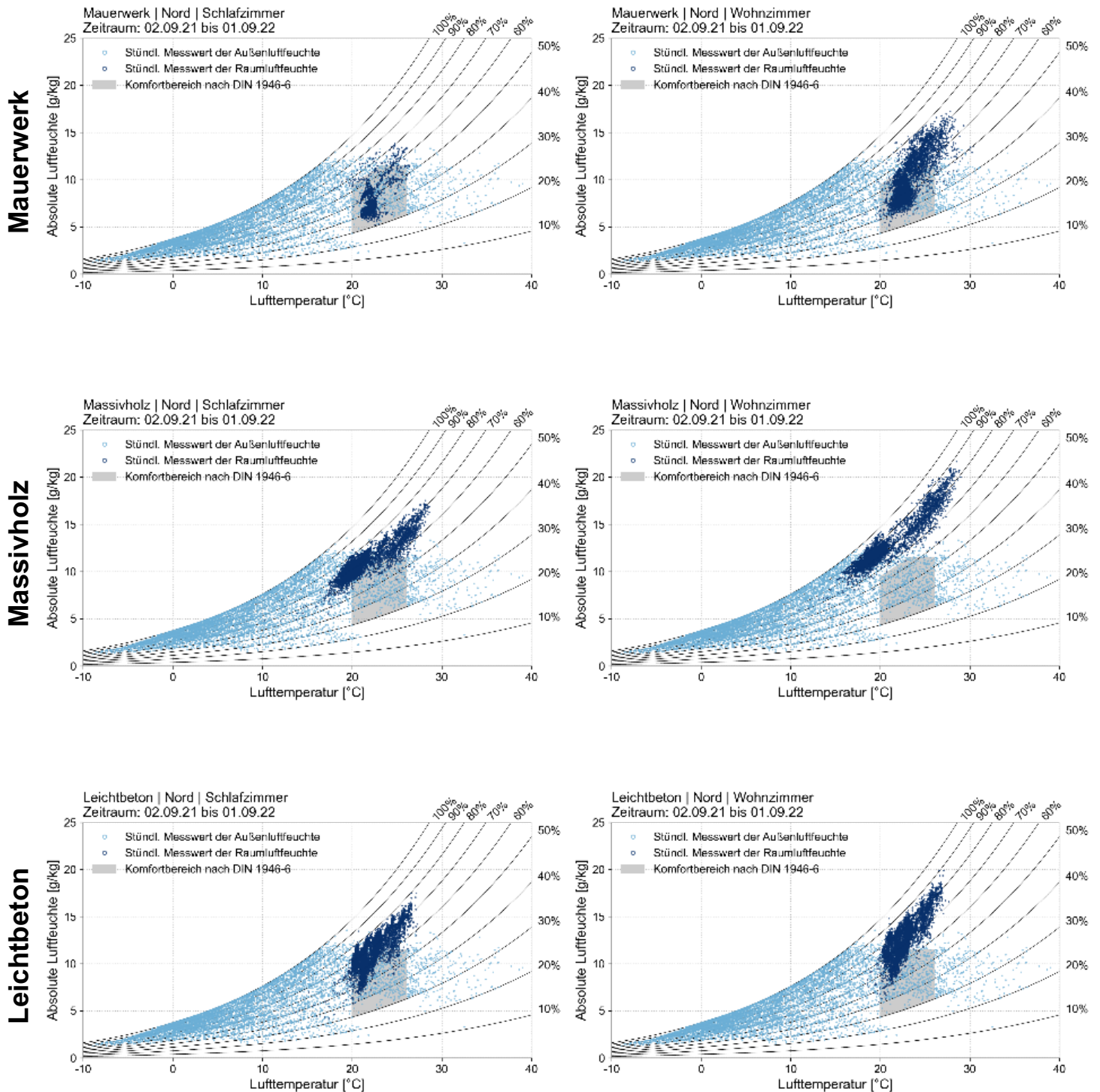
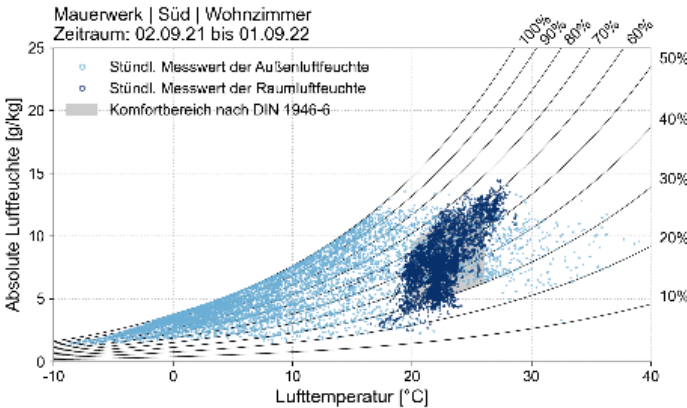
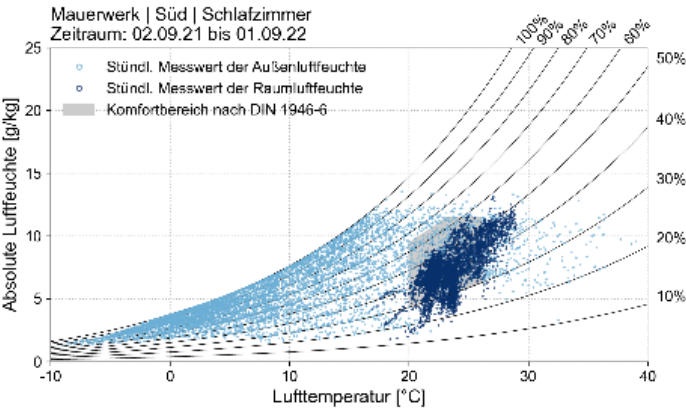


Abbildung 56: Wohnungen Nord – Feuchtebewertung mittels Hx-Diagramm

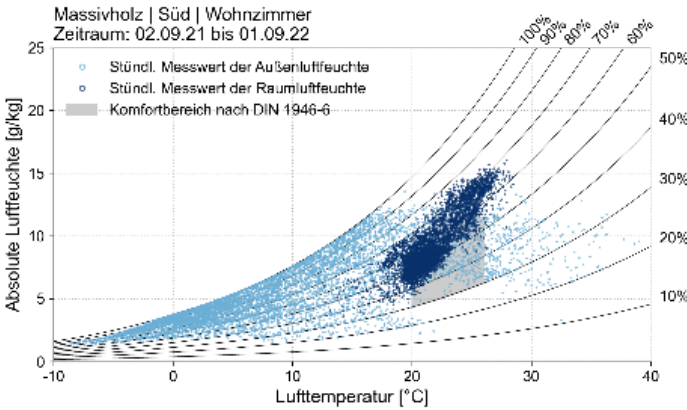
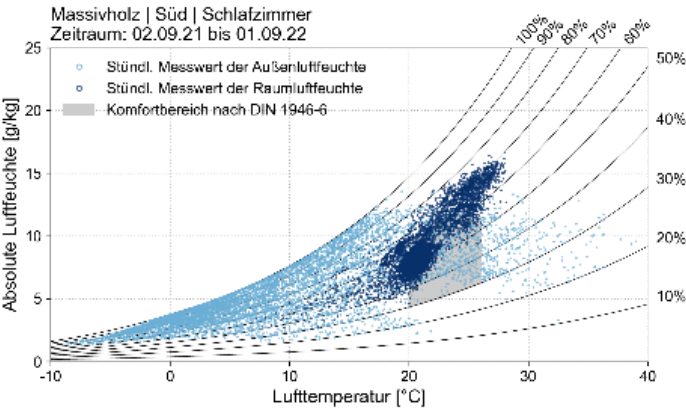
Wohnung Süd | Schlafzimmer

Wohnung Süd | Wohnzimmer

Mauerwerk



Massivholz



Leichtbeton

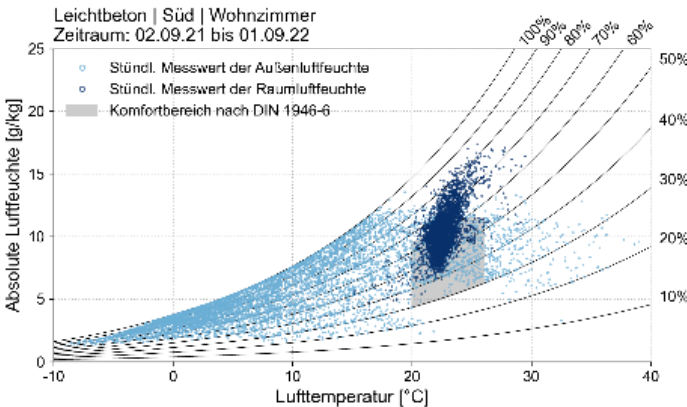
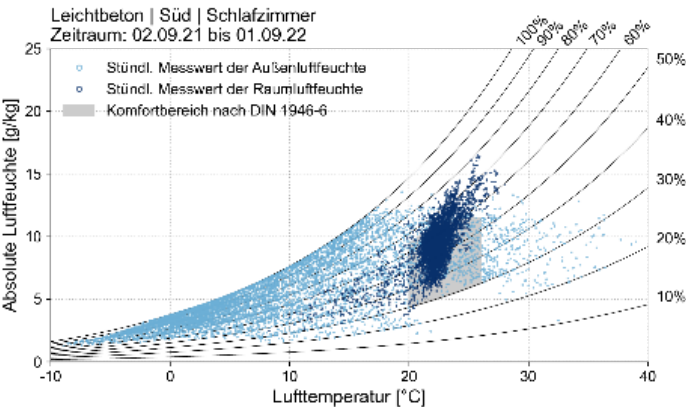


Abbildung 57: Wohnungen Süd – Feuchtebewertung mittels Hx-Diagramm

Insgesamt unterscheiden sich die drei Konstruktionen hinsichtlich der gemessenen relativen Raumlufffeuchten kaum. Es kann festgehalten werden, dass die Feuchteregulierung bei allen drei Konstruktionen grundsätzlich funktioniert.

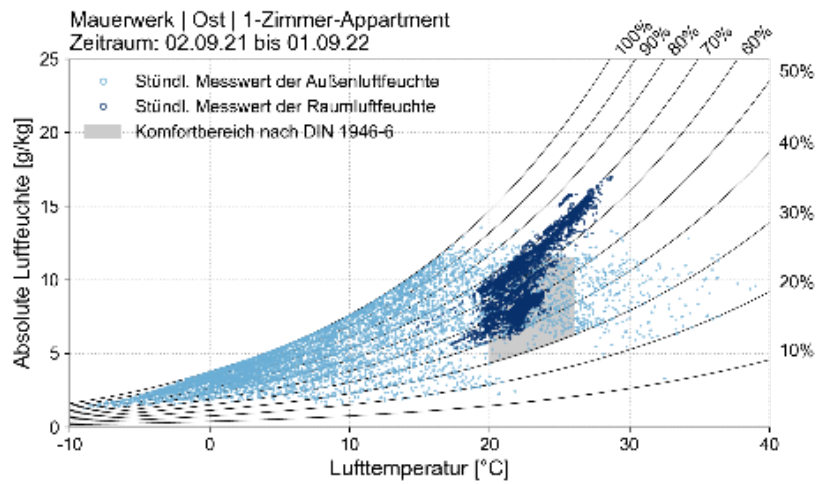
Im Sommer treten hohe relative Raumlufffeuchten auf, was durch ein eher träges Nutzerverhalten hinsichtlich „Ablüften“ von Raumlufffeuchte bedingt ist. Das Nutzerverhalten ist wiederum beeinflusst durch die hohen Räume und folglich durch einen höheren Anteil an thermischer Masse pro m³ Raumluff im Vergleich zu einer Standardraumhöhe. Anders formuliert: Das gutmütige robuste thermische Verhalten der drei Konstruktionen führt dazu, dass die Raumlufffeuchten zu einem höheren Grad als angenehm empfunden werden. Folglich lüften die NutzerInnen weniger, wodurch wiederum eine erhöhte Raumlufffeuchte im Sommer gemessen wurde.

An kalten Tagen treten in allen Konstruktionen deutliche Überschreitungen des normativen Behaglichkeitsbereichs auf. Die Gründe sind zu wenig Lüftung und/oder zu geringe Raumlufftemperaturen, besonders im Massivholzhaus (alle gemessenen WEs). In den Wintermonaten wurden in den Wohnungen MH_N, MH_S und LB_N (SZ+WZ) häufig hohe relative Feuchten von 80-90% gemessen. Bei konstanter Überschreitung von 80% relativer Raumlufffeuchte kann es bei zu geringer Ablüftung zu Schimmelbildung kommen. Die Steuerung der Abluft-Ventilatoren im Bad ist aktuell präsenzgeführt. Außerhalb der Badnutzungszeiten sind die Abluft-Ventilatoren ausgeschaltet. Hier ist für den zukünftigen Betrieb der Häuser zu diskutieren, welche Lösungswege einfach und schnell umzusetzen sind. Aus Sicht der Autoren kommen die Aufklärung der NutzerInnen zum Lüftungsverhalten sowie der Dauerbetrieb des Badablüfters in Kombination mit Fensterfalzlüftern, wie in der Planung vorgesehen, in Frage. Der dabei einzustellende Luftwechsel dient nur dem Feuchteschutz und liegt deshalb bei $< 0,2 \text{ h}^{-1}$.

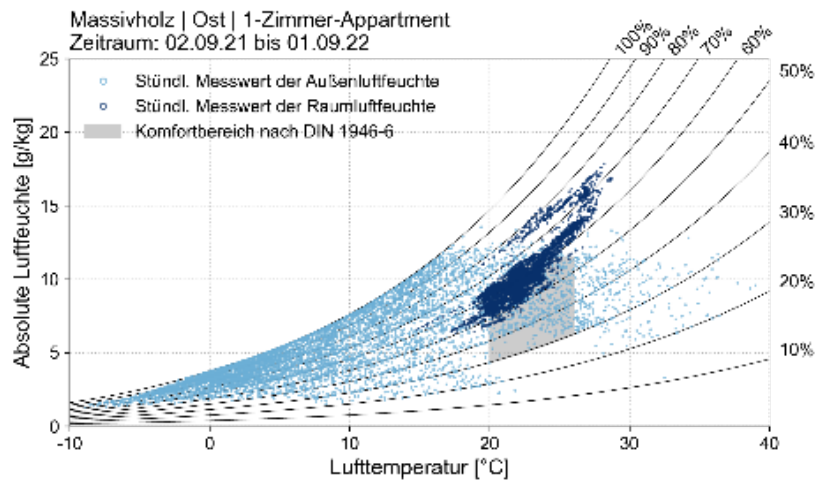
Auch die 1-Zimmer-Ost-Wohnungen wurden hinsichtlich ihres Feuchteverhaltens untersucht. Wichtig ist hierbei, dass diese Wohneinheiten unbewohnt sind, d.h. die Räume sind im Winter zwar beheizt ($T_{\text{soll}} = 20^\circ\text{C}$), aber ganzjährig nicht natürlich belüftet. Das Ost-Fenster je Wohnung ist ganzjährig geschlossen, mit Ausnahme von vereinzelten Lüftungen bei Überprüfung der Messtechnik oder Gebäudeführungen. Mit den dadurch gleichen Randbedingungen (Wetter, Nutzerverhalten, Orientierung, Größe) dient diese Messung ausschließlich der Vergleichbarkeit der drei Baukonstruktionen. Ein externer Einfluss konnte nicht entbeholden werden: der Baumschatten auf die Ost-Fassade des Hauses wirkt sich entscheidend auf Beleuchtungsstärke und Temperatur im Raum aus:

Wohnung Ost | unbewohnter Raum

Mauerwerk



Massivholz



Leichtbeton

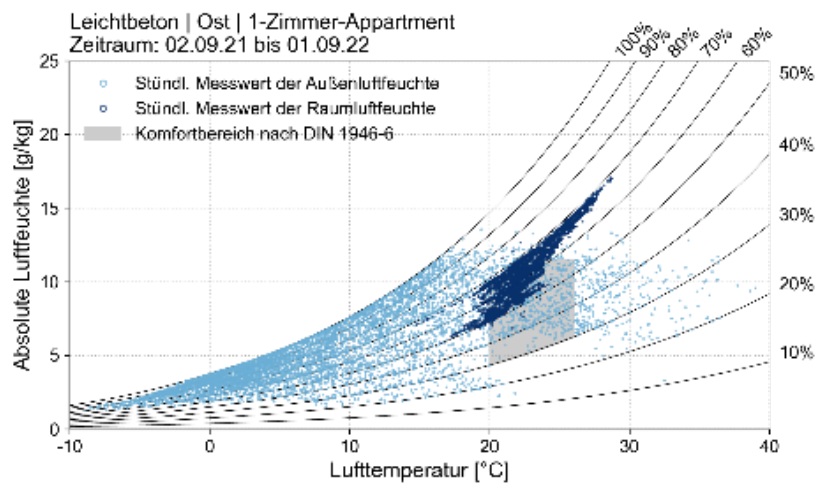


Abbildung 58: Thermischer Komfort – Hx-Diagramme der Ost-Wohnungen

Bei allen drei Baukonstruktionen regulieren die Materialschichten zum Innenraum passiv hygrisch den Raum. Unbeachtet der vereinzelt Extreme im Holzhaus, ergeben sich für alle drei Konstruktionen scharfe Grenzen der relativen Feuchtwerte zwischen 50-70% bzw. 40-70% im Mauerwerkshaus, innerhalb derer die Materialien reagieren. Die Auswertung zeigt den Trend ihrer Sorptionsisothermen. Bei allen drei Materialien hört die Adsorption bei 25°C auf und geht in die Desorption über. Der Hochlochziegel mit Kalkputz stellt sich auf 40% in der unteren Grenze ein. Alle gemessenen Ziegel-Wohnungen zeigen ein besseres hygrisches Verhalten, welches zu geringeren relativen Raumlufffeuchten im Winter und damit zu geringeren Wahrscheinlichkeiten einer Taupunktunterschreitung führt.

4.3.2. Energieverbrauch

Da die detaillierte Strommessung in den Wohneinheiten gescheitert ist, wurde für das Messjahr in regelmäßigen Abschnitten der Gesamtstromverbrauch je Wohnung an den Stromzählern abgelesen. Die Funkverbindung zu den Molliné-Wärmemengensensoren lieferte über den Messzeitraum konstant Daten. Somit stellt Abbildung 59 den gemessenen thermischen Energieverbrauch für Heiz- und Trinkwarmwasser (grün), sowie den elektrischen Energieverbrauch (grau) dar. Auf der x-Achse sind die Verbräuche sortiert nach Gebäude und Nord-, Ost- und Südwohnung (N, O, S). Die Ost-Wohnungen fallen auf durch ihren geringen thermischen Energieverbrauch. Die drei Werte zeigen den Verbrauch einer unbewohnten 1-Zi-Einheit bei einer Solltemperatur der Heizkörper von 20-21°C in der Winterzeit. Dass die Leichtbeton-Ost-Wohnung die Hälfte der Energie der Wohneinheiten im Massivholz- und Mauerwerkshaus benötigt, ist zum Beispiel aus Wärmezufuhr aus der darunterliegenden Wohnung oder dem Treppenhaus oder durch Infiltration über Fenster und Wohnungstür zu erklären.

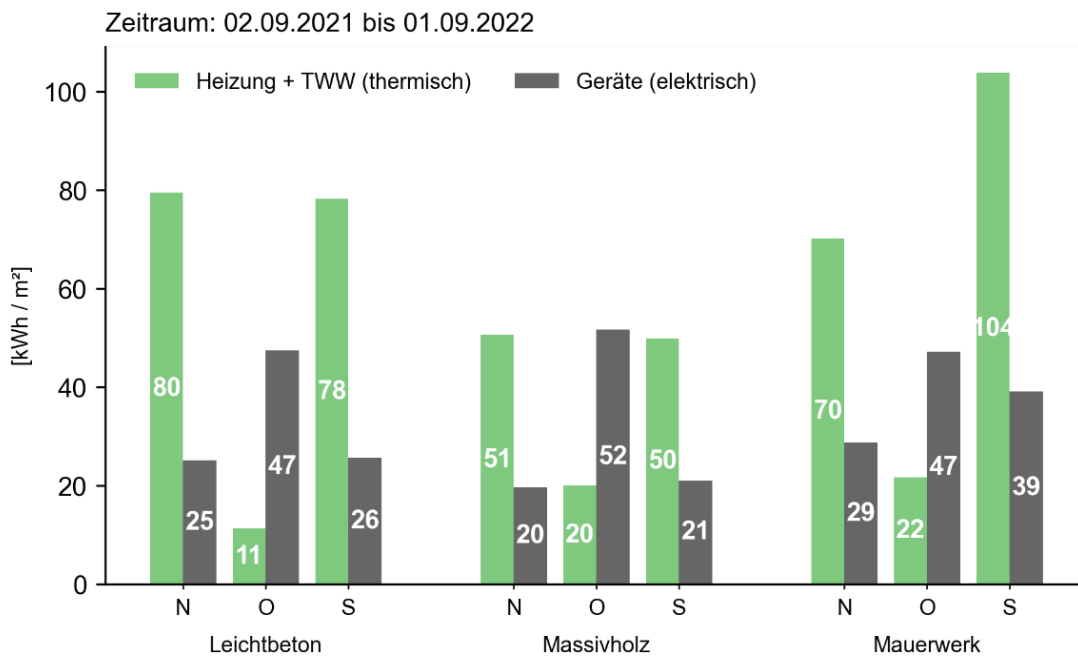


Abbildung 59: Gemessener Energieverbrauch der Forschungshäuser im Messjahr 2021/22

Die thermischen Energieverbräuche ähneln sich in Nord- und Südwohnungen innerhalb desselben Gebäudes – mit der nutzerbedingten Ausnahme im Mauerwerksgebäude – und unterscheiden sich im Gebäudevergleich. Hier schneiden die Massivholz-Wohnungen mit einem Verbrauch von gerundet 50 kWh/m²a am besten ab. Durch die Nutzerumfrage ist bekannt, dass es sich in beiden Wohnungen um sparsame NutzerInnen handelt, die bewusst nach Norm unkomfortabel niedrige operative Temperaturen unter 20°C konstant einstellten. Dass die sparsamen BewohnerInnen des Messprojekts beide in den Massivholzwohnungen leben, ist Zufall. Ebenso konnte durch die Nutzerumfrage der hohe thermische Verbrauch der Süd-Wohnung im Mauerwerkshaus geklärt werden: Hier lief die Heizung im Schlafzimmer konstant auf höchster Stufe. Wenn es der Person im Raum zu warm wurde, öffnete sie das Fenster, anstatt die Heizung herunterzudrehen. Grund dafür war das Bett, das die Person über beziehungsweise vor den Thermostatregler baute und somit diesen nicht mehr bedienen konnte, ohne Matratze und Lattenrost anzuheben. Die Miete der Person wird von ihrem Arbeitgeber bezahlt, weshalb die Vermutung nahe liegt, dass kein Anreiz für ein energiesparsames Nutzerverhalten vorliegt.

Die Trinkwarmwasserverbräuche (TWW) wurden per Umfrage auf einen ähnlichen Verbrauch geschätzt. Da, wie in Kapitel 4.2 erwähnt, die Messtechnik eine Unterscheidung der Verbräuche von TWW und Heizung nicht zulässt, wird der TWW-Verbrauch des Sommers 2022 als Schätzwert herangezogen. In seiner Masterarbeit „Entwicklung pro-

babilistischer Modelle zur Abbildung unsicherer Randbedingungen in der Gebäudesimulation“ entwickelte Roman Ficht unter Anwendung der Daten des Forschungsprojekts eine Klassifikation der Heizkörperaktivierung. Abbildung 60 zeigt die Ermittlung nach R. Ficht grafisch unter Berücksichtigung der gemessenen Heizkörpertemperatur ($T_{sur,HK}$), der Raumlufttemperatur (T_{air}), sowie der Fensteröffnung (FensterIO). Das daraus resultierende Heizkörpersignal (HKIO) ist als roter Bereich abgebildet. [Ficht 2022]

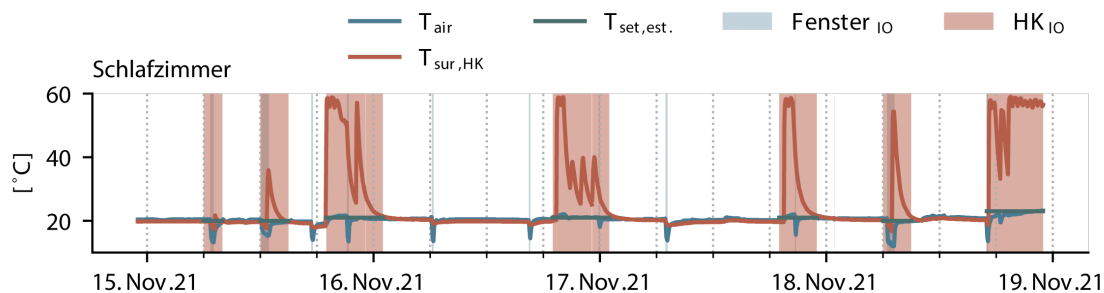


Abbildung 60: Beispielhafte Heizkörperklassifikation nach R. Ficht (Ficht, 2022)

HKIO wurde für diesen Bericht angewandt, um den Zeitraum im Sommer 2022 definieren zu können, in dem nicht geheizt wurde: der Zeitraum umfasst 15. Mai bis 14. September 2022. Für diese vier Monate wurde der Warmwasserverbrauch je Wohnung ermittelt. Die Werte liegen zwischen 3 und 6 kWh/m², die als Trinkwarmwasserverbräuche (TWW) angenommen wurden (Tabelle 4.3.1). In den Ost-Wohnungen hat kein TWW-Verbrauch stattgefunden.

Gebäude	Leichtbeton		Massivholz		Mauerwerk	
Wohnung	N	S	N	S	N	S
Einheit	kWh/m ²					
15.Mai-14.Sept. 2022	5	3	5	3	6	3
Skaliert auf Messjahr 2021/22	15	9	15	9	18	9

Tabelle 4: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Massivholzgebäude

Die auf das Messjahr hochgerechneten Werte für den spezifischen Energiebedarf für Warmwasserbereitung (TWW) von 9-18 kWh/m²a liegen im Normbereich nach SIA von 8-18 kWh/m²a mit einem Standardwert von 13 kWh/m²a [SIA 2024:2015].

Vor diesem Hintergrund kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die gemessenen thermischen Energieverbräuche im Vergleich zu den in der Planung veranschlagten Bedarfen der Energieausweisberechnung von 100 kWh/m²a nur durch die Südwohnung im Mauerwerkshaus in der Südwohnung tatsächlich gemessen werden konnten. Alle anderen gemessenen Wohnungen verbrauchten weniger Energie (Abbildung 59). Diese Feststellung sowie der extreme Verbrauchsfall im Mauerwerkshaus bestätigen auch in diesem Messprojekt das Nutzerverhalten als größten Einflussfaktor des Performance Gap.

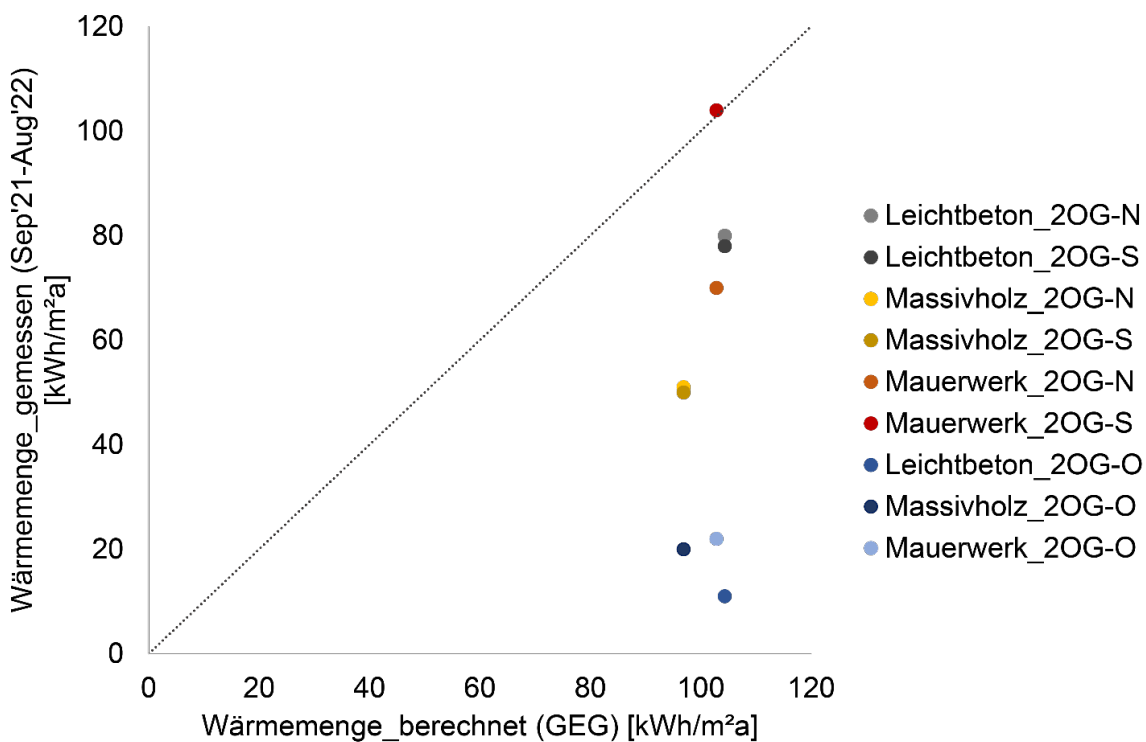


Abbildung 61: Grafische Gegenüberstellung von Energiebedarf (Berechnung nach GEG) und Energieverbrauch (Messung) nach Gebäuden und Wohneinheiten

4.4. Validieren und Rückkoppeln

Durch iteratives Vergleichen und Rückkoppeln konnte das in Einfach Bauen 2 (EB2) entwickelte Simulationsmodell der Forschungshäuser Bad Aibling verbessert und validiert werden. Kapitel 4.4.1 zeigt die Rückkopplungseffekte auf die Simulation: Für den Vergleich der Modelle EB2 und EB3 werden die Annahmen für die Simulation (interne

Lasten, Nutzerprofile) nach Norm verwendet. Im Anschluss zeigt Kapitel 4.4.2 den Prozess der Validierung.

4.4.1. Angepasste Simulation

Anpassungen und Veränderungen der Simulation werden im Folgenden im Vergleich zum alten Stand in Einfach Bauen 2 (EB2-Modell) vorgestellt und diskutiert.

Klimadaten

Im EB2-Modell wurde nach VDI der Testreferenzjahr-Datensatz (TRY) des Deutschen Wetterdienstes verwendet [VDI 6020 2017]. Der TRY-Datensatz 2017 zeigt den typischen Witterungsverlauf eines Jahres für ein bestimmtes Gebiet, wobei interpoliert die Messwerte der Wetterstationen und Satellitendaten auf km²-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 raumluftechnische Anlagen werden extrem warme und kalte Witterungsprofile aus realen Halbjahreszeiträumen der Vergleichsbasis herangezogen [Deutscher Wetterdienst 2018]. Unter der aktuellen klimatischen Veränderung mit tendenziell milderer Temperaturen im Winter ist der „extreme“ Datensatz als ein worst-case Szenario bezüglich der kalten Temperaturen zu sehen. Für das EB2-Modell wurde der TRY2017-Datensatz für den Bad Aiblinger Stadtteil Miettraching mit extremen Wetterdaten gewählt (TRY2017_Miettraching_extrem).

Im EB3-Modell werden die vor Ort gemessenen Klimadaten berücksichtigt. Nach erfolgreichem Monitoring von einem Messjahr wurde ein Wetterdatensatz aus den Messdaten in die Simulation integriert. Auf dieser Basis kann ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten zu Komfort und Verbrauch stattfinden. Abbildung 62 zeigt die Wetterdaten des DWD-Testreferenzjahres und der Messung im Vergleich. Die Zeitleiste (x-Achse) orientiert sich dabei an dem Messjahr September 2021 bis August 2022. Grund für die fehlenden Messdaten im Juli 2022 ist die Überhitzung der Messtechnik im Dachraum des Leichtbetonhauses ($T_{air} > 55^{\circ}\text{C}$). Dies ist bedauerlich, da es sich, wie Ende Juni und Anfang August 2022, um Extremwerte handelt.

Dennoch ist durch den Vergleich des gesamten Jahres eine Tendenz des Messdatensatzes erkennbar: Bei der Lufttemperatur liegen sowohl in den Winter- als auch in den Sommermonaten die Messwerte deutlich bzw. leicht über den durchschnittlichen TRY-Daten. In den Übergangsmonaten liegen die Datensätze mit kleinen Abweichungen nahe beieinander. Die Luftfeuchte liegt im Messjahr in den Wintermonaten Dezember

bis März deutlich unter dem Durchschnitt. In den Übergangs- und Sommermonaten hingegen ist die Außenluft ähnlich feucht wie im TRY-Datensatz. Die Windgeschwindigkeiten sind im Messjahr tendenziell geringer als der Durchschnitt, jedoch mit Starkwindergebnissen im Januar und Februar 2022, die deutlich über den TRY-Daten liegen. Die solare Einstrahlung der Messung liegt über das Jahr betrachtet leicht über dem Durchschnitt, was die Temperatur- und Feuchteverläufe beeinflusst.

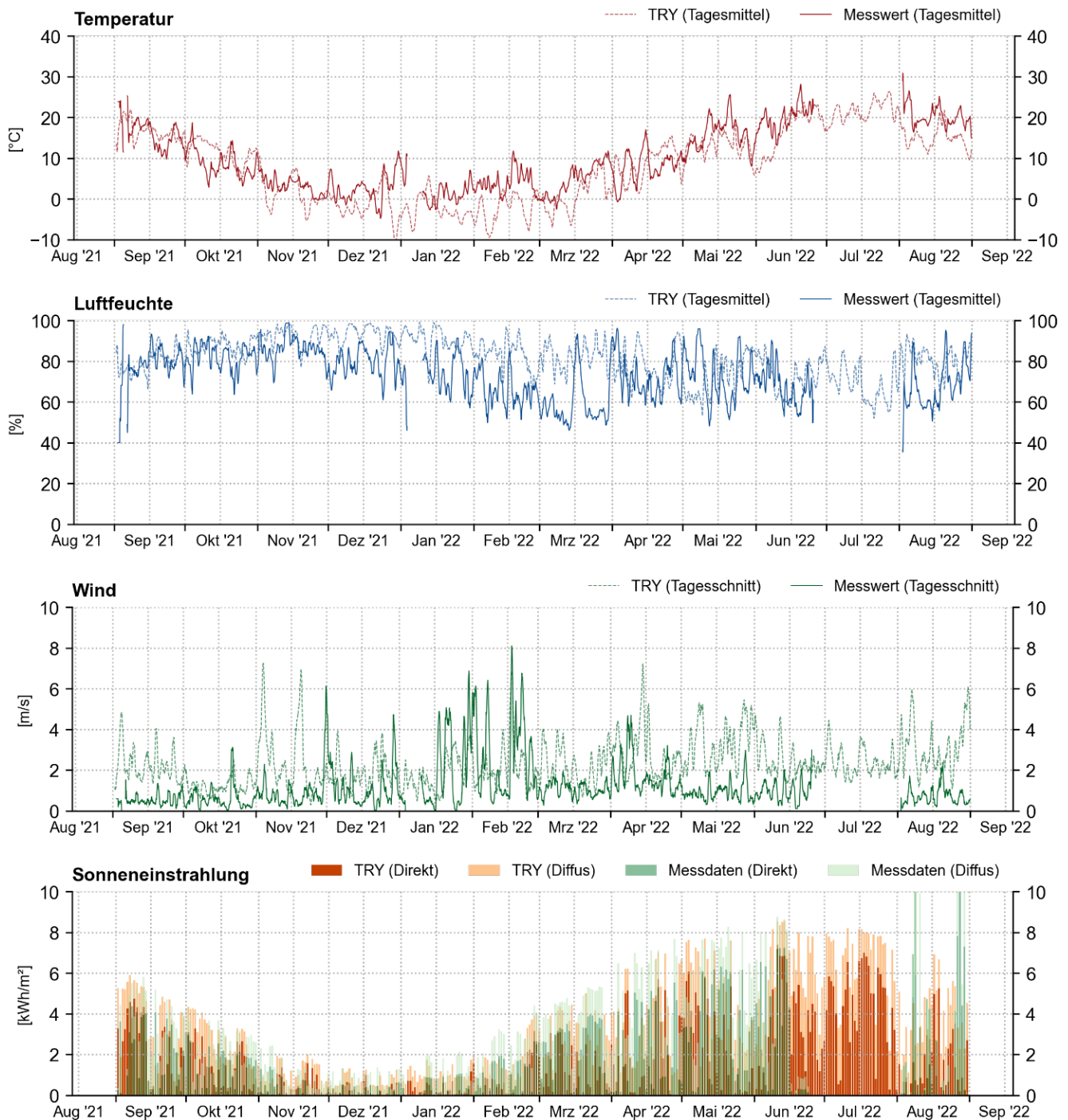


Abbildung 62: Vergleich der Wetterdatensätze TRY (DWD) und eigener Wetterstation

Geometrisches Modell

Das Simulationsmodell für das 2. OG der drei Forschungshäuser wurde als 12-Zonen Modell in der Softwareumgebung Rhinoceros®6 angelegt und über das Grasshopper Plug-In TRNLizard mit den Inputdaten zur thermisch-dynamischen Simulation in TRN-SYS 18 verknüpft.

Die Simulation liefert Ergebnisse zu jeder einzelnen Zone. Abbildung 63 zeigt das 12-Zonen-Modell des 2. OG mit den farblich markierten Wohneinheiten Nord (rot), Ost (gelb) und Süd (blau). Das Treppenhaus wurde nicht als Zone angelegt, jedoch als Randbedingung für anschließende Räume in diesen Raumzonen definiert.

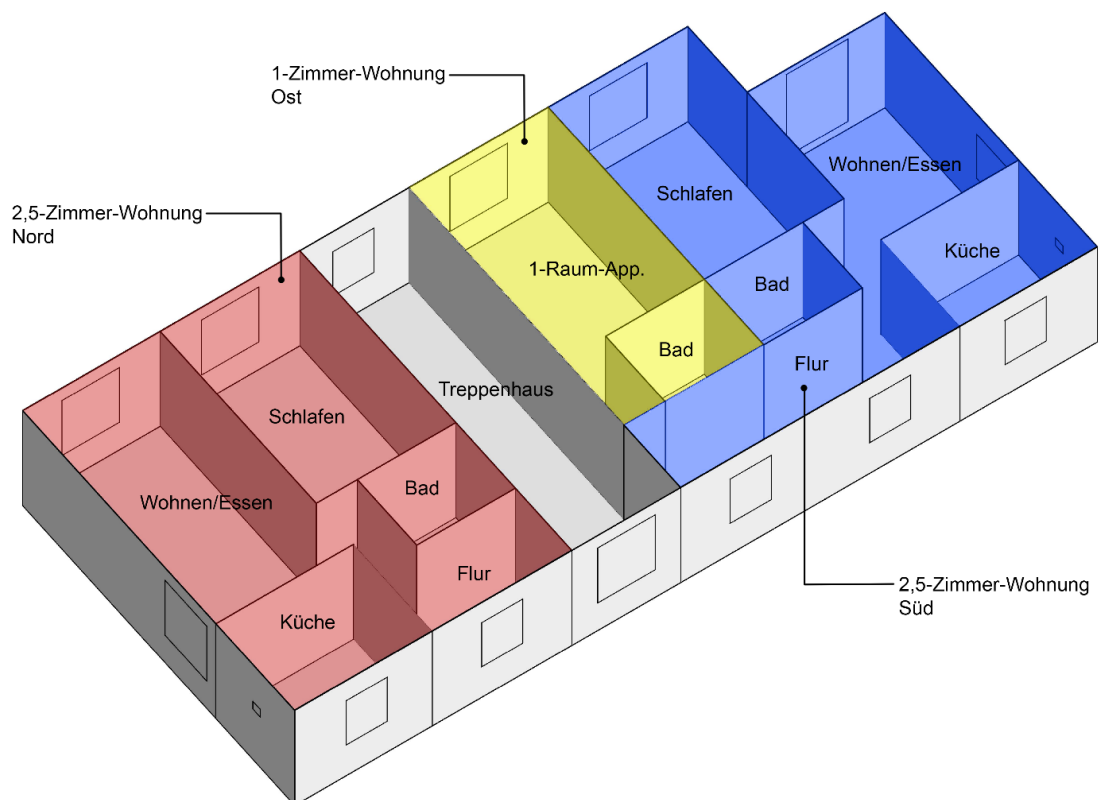


Abbildung 63: 12-Zonen-Modell des 2.OG der Forschungshäuser in Rhinoceros®6

Ein sogenanntes „Multi-Zone-Model“ mit 12 verknüpften Zonen zu modellieren entspricht nicht der gängigen Praxis der Gebäudesimulation. Grundsätzlich wird hierbei versucht, durch das definieren von Typräumen diese als Einzelzonen in einem parallelen Aufbau zu simulieren und entsprechend ihrer Anzahl zu skalieren. Auf diese Weise lassen sich in kurzer Zeit große Gebäudekomplexe berechnen. Da in diesem Projekt eine Komfort- und Verbrauchsmessung im 2. OG der Forschungshäuser in Bad Aibling erfolgt, wurde dieser Modellaufbau gewählt, um das 2. OG möglichst realitätsgetreu nachzubilden. Al-

lerdings ergibt sich kein Vorteil bei der Berechnung von Luftwechselraten der zusammenhängenden Zonen Flur-Küche-Wohnzimmer mittels „air-coupling“-Komponente in TRNLizard, da der Unterschied im Ergebnis im Vergleich zur Modellierung von Einzelzonen marginal ist.

Baukonstruktion

Die Aufbauten der Außenwand-, Innenwand-, Boden- und Deckenkonstruktionen für Infraleichtbeton, Massivholz und gelochter Ziegel werden im EB3-Modell nach Planung berücksichtigt. Die Außenwandbauteile des Holz- und Mauerwerkhauses erfüllen die U-Wert-Anforderung von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach EnEV2016. Die Außenwandbauteile des Leichtbetonhauses überschreiten die Anforderung: Hier wurden die vor Ort gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit λ von $0,239 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und der Wärmekapazität c von $0,758 \text{ MJ/kg}$ verwendet. Diese Werte wurden im EB2-Modell bereits verwendet. Damit ergeben sich folgende U-Werte der Außenwände je Gebäude:

	Wärmeleitfähigkeit λ	Wandstärke d	U-Wert
Mauerwerk	$0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$0,425 \text{ m}$	$0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Massivholz	$0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$0,300 \text{ m}$	$0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Leichtbeton	$0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$0,500 \text{ m}$	$0,44 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Im EB3-Modell wurde der Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} nachgebessert: der ΔU_{WB} -Standardwert in TRNSYS 18 von $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ wurde durch die im Energieausweis berechneten Zuschlagswerte auf alle Bauteile je Gebäude ersetzt:

Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB}

Mauerwerk	$0,023 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Massivholz	$0,024 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Leichtbeton	$0,018 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Dreifach-Verglasung

Die bauphysikalischen Parameter der in den Forschungshäusern eingesetzten Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen wurden bereits in der EB2-Simulation berücksichtigt:

Gesamtenergiedurchlassgrad	g-Wert:	$0,49$
Lichttransmissionsgrad	T-Vis:	$0,71$
Rahmenanteil	je Fenstertyp	$23 - 83 \%$
Wärmedurchgangskoeffizient	U-Wert Glas:	$0,63 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$

U-Wert Rahmen:	1.50 W/m ² *K		
Fenster mit 23% Rahmenanteil	U-Wert gesamt:	1,00 W/m ² *K	

Im EB3-Modell wurde der Fensterrahmenanteil nachgebessert: Er liegt nicht mehr konstant bei 20 %, sondern variiert je Fenstertyp von 23 % (Schwingflügel) bis 83 % („Guckerl“-Fenster Speisekammer).

Verschattung

Eine Verschattung durch die Fensterlaibungstiefen wurde berücksichtigt. Hingegen wurden die Baumverschattung an der Ost-Fassade des Leichtbetonhauses sowie die Verschattung durch Nachbarbauten nicht modelliert. Ein aktiver außenliegender Sonnenschutz wird nach wie vor nicht herangezogen. Hier liegt keine Veränderung im Vergleich zum EB2-Modell vor [Jarmer et al. 2021].

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° wurde berücksichtigt. Auch hier entspricht das EB3-Modell dem aus Einfach Bauen 2.

Interne Lasten

Die internen Lasten wurden im EB3-Modell überprüft und Fehler ausgebessert. Die 2,5-Wohneinheiten werden mit zwei Personen belegt. Je Person werden – gekoppelt an ihre Anwesenheit – konstant 70 W Wärme sowie 40 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 W/m² und zusätzlich 5 W/m² 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 W/m² und die Feuchteabgabe 8 g/m²*h, verknüpft mit dem Küchen-Profil nach SIA 2024 [SIA 2024:2015].

Im Bad wird das Trinkwarmwasser mit einer Vorlauftemperatur von 45 °C, 40 Litern pro Person und 2 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. Er ist in allen Gebäudevarianten gleich angesetzt und wird daher in den Ergebnissen nicht gesondert dargestellt.

Heizung

Der ideale Heizer zur Ermittlung der Heizenergie wendet die notwendige Energie auf, um den Raum auf eine operative Solltemperatur von $21 \text{ }^\circ\text{C}$, mit einer Nachtabsenkung von 2 K , zu heizen. Im Treppenhaus ist die Solltemperatur auf $18 \text{ }^\circ\text{C}$ gesetzt. Der ideale Heizer gleicht absolute Spitzenlasten aus, d.h. ein kurzfristiges Absinken der Raumtemperatur wird ausgeglichen. Die modellierten Zonen (Räume) werden beheizt, sobald sich Außentemperaturen unterhalb von $12 \text{ }^\circ\text{C}/24\text{h}$ einstellen. Dieses Heizkriterium führt zu einer realistischeren, da vom Wetterdatensatz abhängigen, Annahme der Wintermonate.

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, wurde in Einfach Bauen 2 mit einer konstanten Luftinfiltration von $0,16 \text{ h}^{-1}$ gerechnet. Diese wurde im EB3-Modell reduziert auf $0,10 \text{ h}^{-1}$. Damit wurde die Simulation an die Gegebenheiten vor Ort – eingebautes Fensterfalzlüfter-Modell und eingestellte Badabluft-Steuerung (präsenzführt) – angepasst.

Es wurde von einem intelligenten Nutzer ausgegangen, der unterhalb einer operativen Temperatur von $24 \text{ }^\circ\text{C}$ die Fenster so öffnet, dass ein notwendiger hygienischer Luftwechsel (mittlere Raumlufth*Person) von $0,20 \text{ h}^{-1}$ gewährleistet wird. Im EB3-Modell wurde der hygienische Luftwechsel ergänzt um eine Fensterstoßlüftung von 15 min je morgens und abends, also $30\text{min}/\text{Tag}$. Die Luftwechselraten wurden nach Fenstergröße, Fensteröffnung und Temperaturdifferenz in der Simulation dynamisch berechnet.

Ab Außenlufttemperaturen über $5 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer operativen Temperatur von $24 \text{ }^\circ\text{C}$ im Raum wurde von einer zusätzlichen Wärmeablüftung durch das Öffnen der Fenster ausgegangen. Die Luftwechselraten wurden nach Fensterfläche und -höhe, Öffnungsanteil, Höhenunterschied – bei mehreren Fenstern im Raum – und Temperaturdifferenz in der Simulation dynamisch berechnet. Dabei wurden die maximal auftretenden Luftwechselraten tagsüber auf einen 3-fachen, nachts auf einen 4-fachen Luftwechsel gedeckelt. Bei einer gefallenen Raumlufth*Person auf $22 \text{ }^\circ\text{C}$ endet die Wärmeabführung durch Fensterlüftung.

In der Küche wurde eine Stoßlüftung zweimal 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.

Vor Ort in den Gebäuden ist die Badabluft mit einem Luftwechsel von 60 m³/h bei Anwesenheit und 30 m³/h für 10min Nachlüften eingestellt. In Einfach Bauen 2 wurde im Simulationsmodell stattdessen ein konstanter Wert von 0,5 m³/(m²*h) angesetzt, der einen mittleren Luftwechsel von 0,57/h ergab [Jarmer et al. 2021], welcher mit dem Luftwechsel im Lüftungskonzept übereinstimmt [IB Scheerer 2019]. Im EB3-Modell wurde versucht, die Regelung der Badablüfter vor Ort nachzubilden: Während des Belegungsprofils von einer Stunde Badnutzung morgens und abends – wobei Feuchteeintrag und Trinkwasserbedarf durch die NutzerInnen erfolgt – wurde eine Badabluft mit einem Luftwechsel von 60 m³/h angesetzt.

Die über die Jahressimulation gemittelte Luftwechselrate liegt je nach Wohneinheit zwischen 0,55 und 0,65 h⁻¹. Damit bleibt sie leicht unterhalb des nach GEG angesetzten konstanten Luftwechsels von 0,7 h⁻¹ und dem im Lüftungskonzept berechneten Luftwechsel von 0,57 h⁻¹ nahekommt bis übereinstimmt [IB Scheerer 2019].

Simulationsergebnisse

Bezüglich des sommerlichen thermischen Komforts wurden die zulässigen Innentemperaturen für Gebäude ohne maschinelle Kühlanlagen nach DIN 16789-1:2021-B2.2 in allen drei Baukonstruktionen und Orientierungen der Räume eingehalten. Alle Auswertungen sind als Jahresübersichten dem Anhang zu entnehmen. Abbildung 64 zeigt den kritischsten Raum: die Küche der Süd-Wohnung im 2. OG des Massivholzhauses. Selbst hier wird Kategorie II nur um 28 Übertemperaturgradstunden im Jahr überschritten.

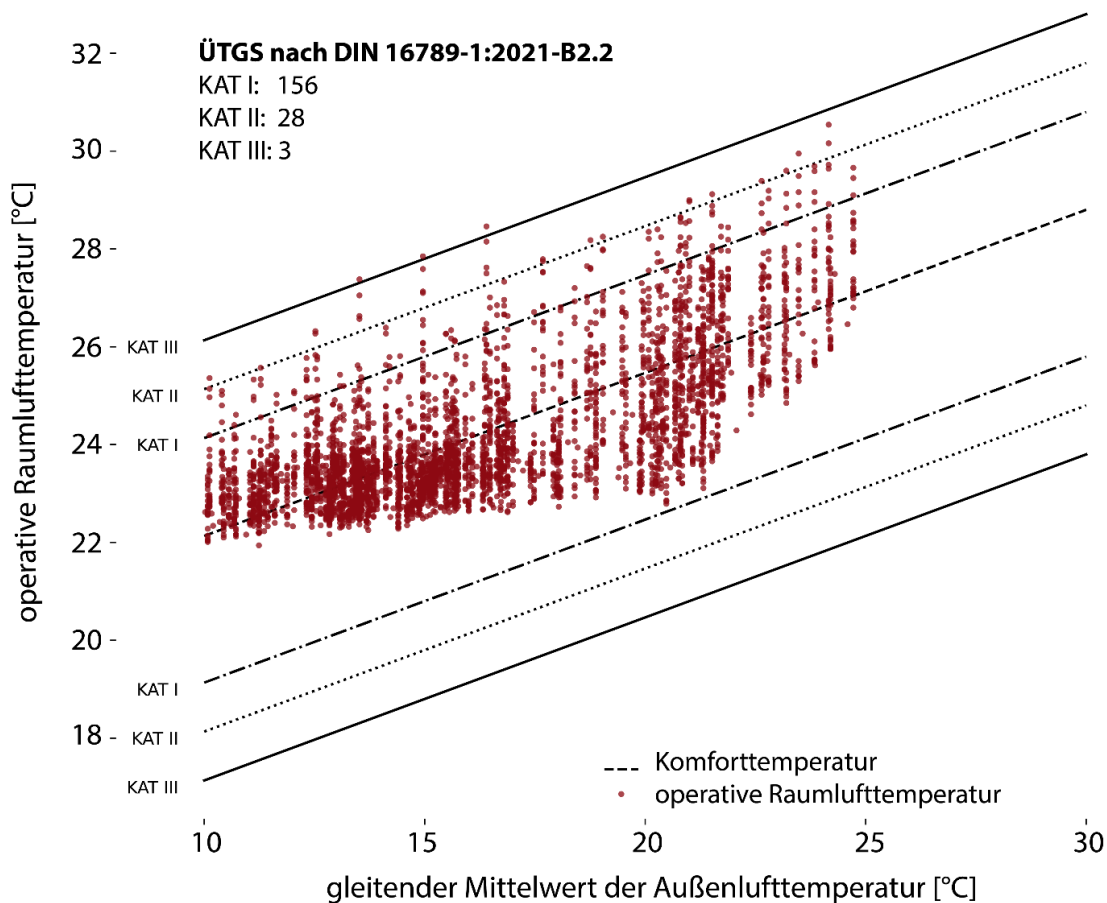


Abbildung 64: Sommerlicher Komfort, Massivholzhaus, 2.OG, Süd-Wohnung, Küche

Zum Vergleich der alten und neuen Simulationen ist in Abbildung 65a-f die Übersicht der Komfort-Auswertungen der Süd-Wohnungen gezeigt. Es handelt sich jeweils um das Wohnzimmer mit Süd-Ost-Ausrichtung. Die Punkte-Wolken zeigen das Komfort-Ergebnis je Stunde (ein Punkt) der operativen Raumtemperatur in °C (y-Achse) über den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur in °C (x-Achse). Links angeordnet sind die Komfortgrafiken der Einfach Bauen 2 Simulation, rechts die aktualisierten Ergebnisse des EB3-Modells. Die Komfort-Punkte in Einfach Bauen 3 liegen leicht höher als in Einfach Bauen 2 und vollständig im Bereich der Komforttemperaturzone. Dieser Effekt wurde hauptsächlich durch die geänderte Lüftungsstrategie erreicht.

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse, dass auf den Einsatz eines Sonnenschutzes verzichtet werden kann. Dies deckt sich größtenteils mit den Messergebnissen in Kapitel 4.3. Nur im Massivholzhaus überhitzten sich im Messjahr an heißen Tagen die Zimmer mit Fenstern in der West-Fassade. Parallel dazu beschreiben die NutzerInnen, dass sie diesen Teil der Wohnung als unkomfortabel wahrgenommen haben und es schwierig für sie war, mittels Behelfslösungen, wie beispielsweise das Abhängen der Fenster von innen, das Problem zu beheben.

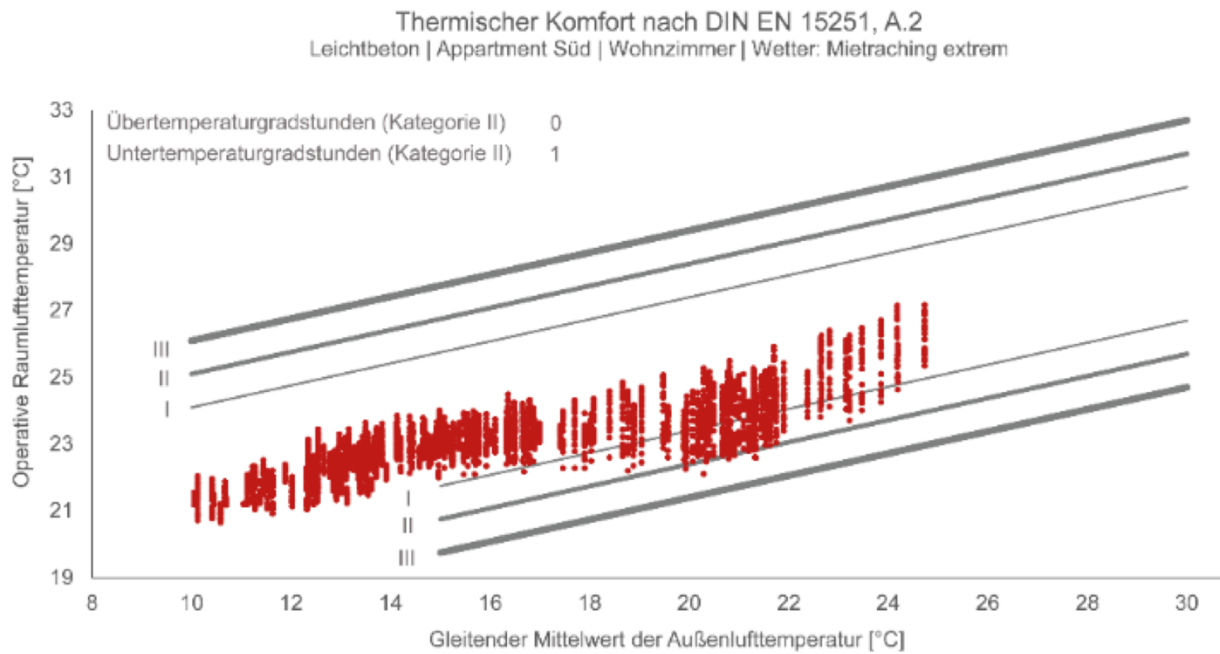


Abbildung 65a: Einfach Bauen 2, DIN EN 15251, Anhang A.2, Thermischer Komfort, Gebäude Leichtbeton, Apartment Süd, Wohnzimmer

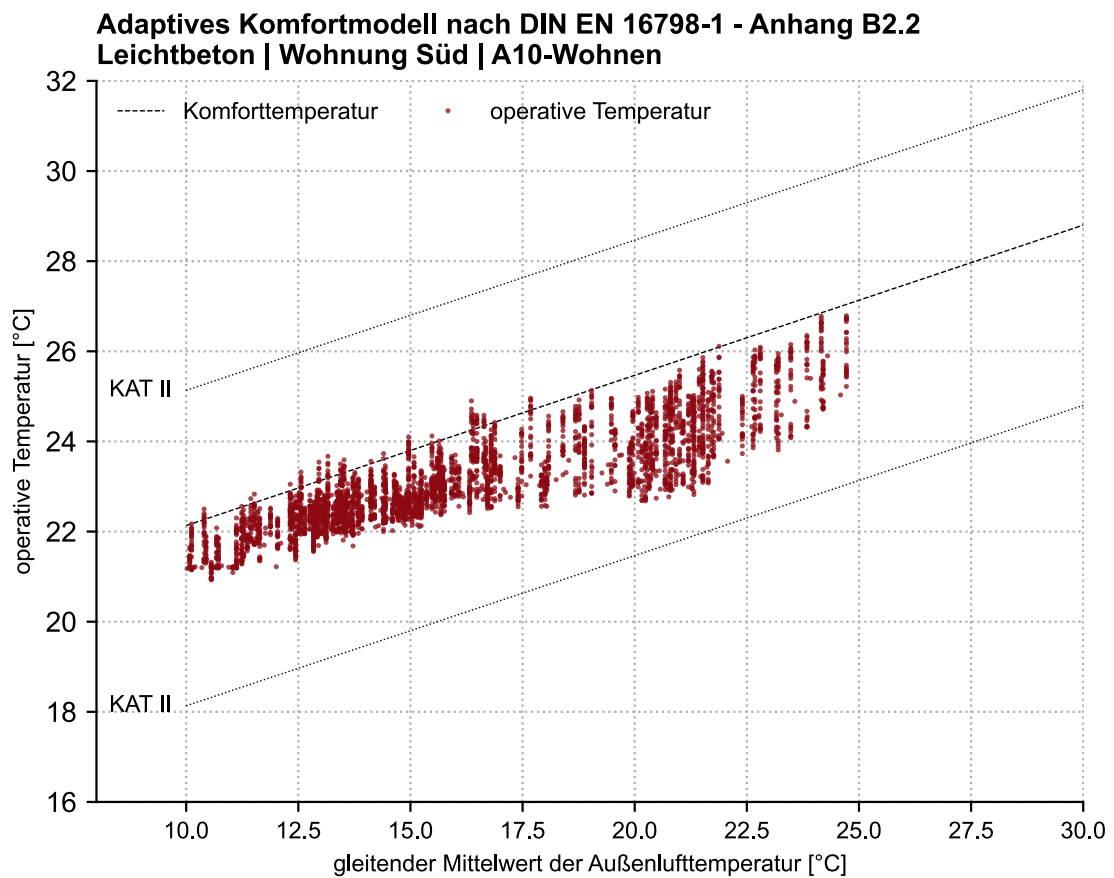


Abbildung 65b: Einfach Bauen 3, DIN EN 16798, Anhang B.2.2, Thermischer Komfort, Gebäude Leichtbeton, Apartment Süd, Wohnzimmer

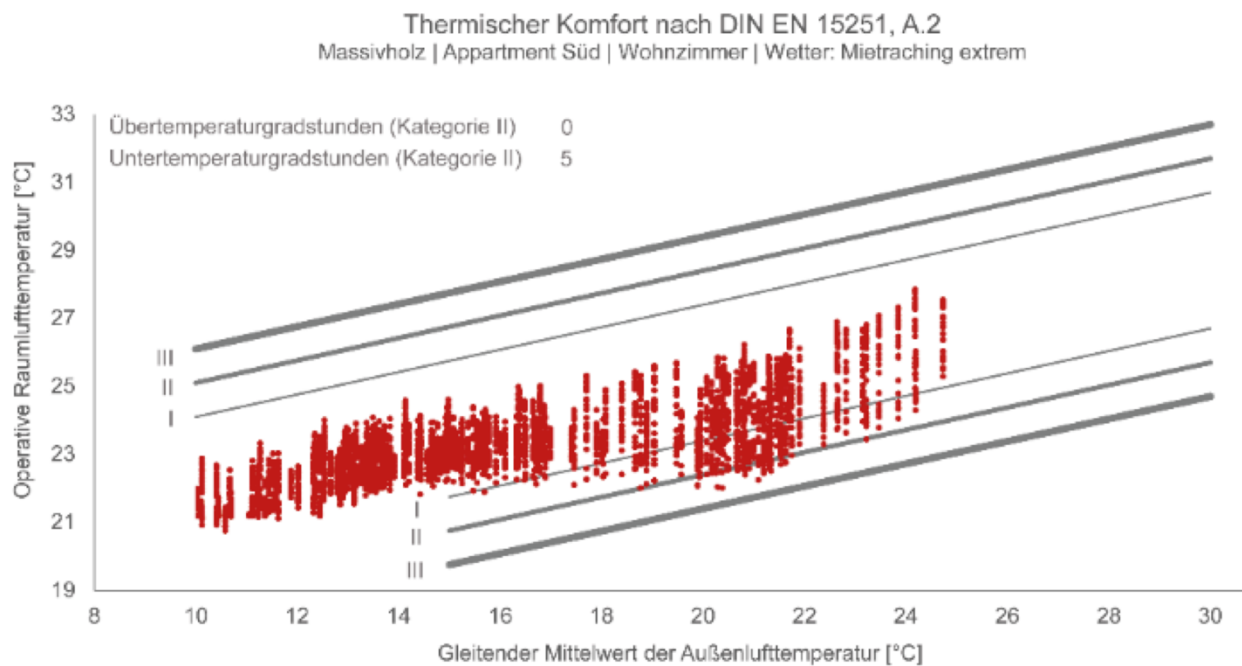


Abbildung 65c: Einfach Bauen 2, DIN EN 15251, Anhang A.2, Thermischer Komfort, Gebäude Holz massiv, Apartment Süd, Wohnzimmer

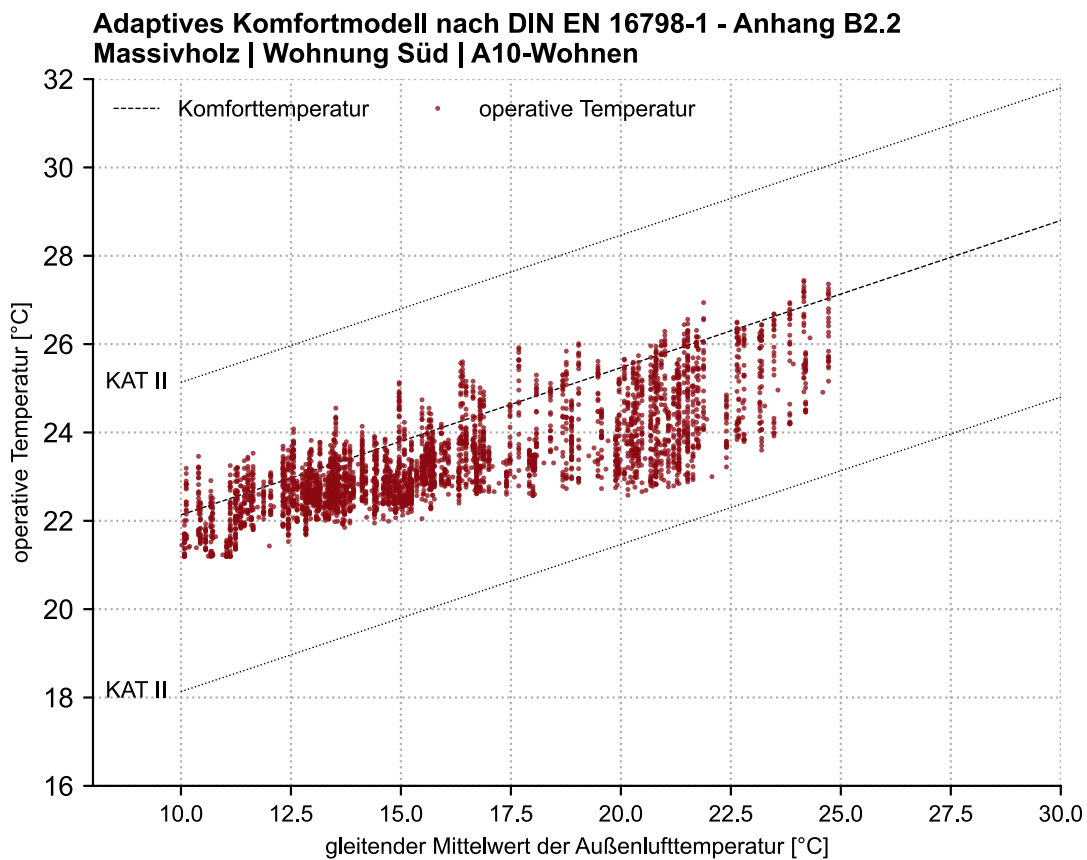


Abbildung 65d: Einfach Bauen 3, DIN EN 16798, Anhang B.2.2, Thermischer Komfort, Gebäude Holz massiv, Apartment Süd, Wohnzimmer

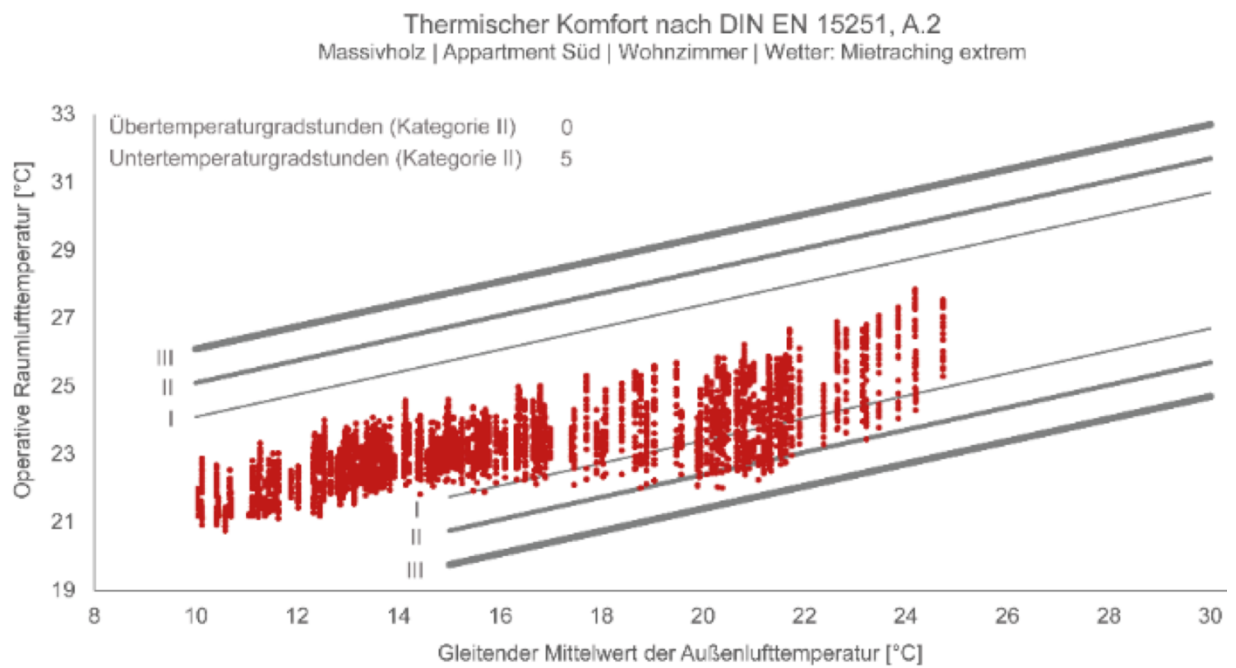


Abbildung 65e: Einfach Bauen 2, DIN EN 15251, Anhang A.2, Thermischer Komfort, Gebäude Mauerwerk, Apartment Süd, Wohnzimmer

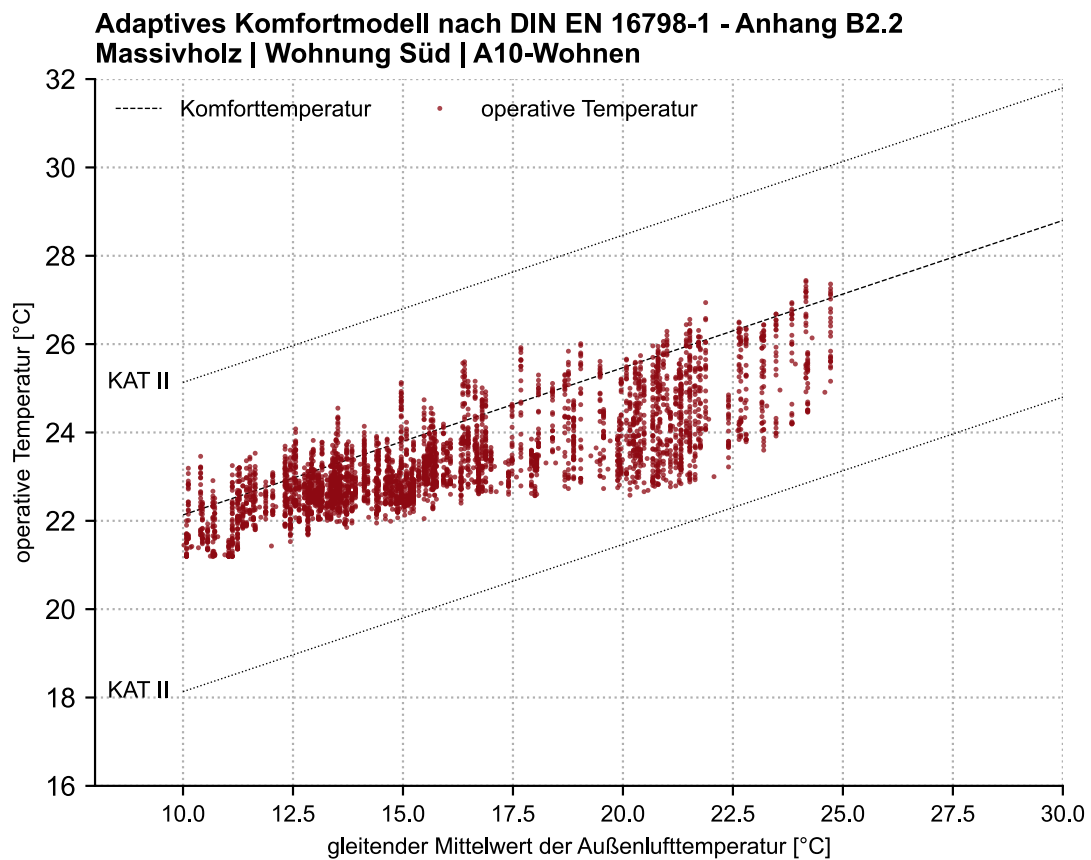


Abbildung 65f: Einfach Bauen 3, DIN EN 16798, Anhang B.2.2, Thermischer Komfort, Gebäude Mauerwerk, Apartment Süd, Wohnzimmer

Energiebedarf

Der berechnete Heizwärmebedarf hat sich im Vergleich zur Simulation in Einfach Bauen 2 (EB2) reduziert (s. Abbildung 66). Zum Großteil basiert das Ergebnis auf folgenden Anpassungen des natürlichen Lüftungskonzepts: die ergänzte „air-coupling“-Komponente im EB3-Modell sorgt für einen Austausch der Frischluft „durch“ die Wohnung, die Infiltrationsrate wurde auf 0,10 h⁻¹ reduziert und die konstante Grundlüftung wurde durch Stoßlüften (2x15min/Tag; alle Fenster) ersetzt. Der Heizenergiebedarf verhält sich mit dem EB3-Modell realistischer und liegt je nach Gebäude und Wohneinheit zwischen 24 und 60 kWh/(m²*a).



Abbildung 66: EB2 und EB3 Simulationen im Vergleich bezüglich ihrer spezifischen Nutzenergie auf Wohnungsebene

Im Leichtbetonhaus fallen im Vergleich die höchsten Heizwärmebedarfe an. Hier beeinflusst der gemessene Wert der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Infralichtbetons das Ergebnis. Die Ergebnisse der Nutzenergie für Brauchwasser, elektronische Geräte, Kunstlicht, Lüfter und Pumpen liegen nach wie vor im durchschnittlichen Bereich [SIA 2024:2015].

4.4.2. Validierte Simulation

Um ein Simulationsmodell im Rahmen einer Messstudie verwenden zu können, sollte die Realitätsnähe des Modells untersucht und getroffene Annahmen bestätigt werden.

Der Prozess der Validierung wird in diesem Kapitel anhand des angepassten EB3-Modells vorgestellt. Die Untersuchung fand im Rahmen einer parallel laufenden Masterthesis durch Johanna Kargruber statt. Im Folgenden wird an gegebenen Stellen auf ihre Arbeit verwiesen.

Vorgehensweise

Die in der Simulation getroffenen Annahmen (Nutzerverhalten, interne Lasten, etc.) wurden schrittweise durch Messdaten ersetzt. Nach jedem Schritt wurden die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen verglichen, um Rückkopplungseffekte in der Simulation sehen und verstehen zu können.

Zunächst wurde die unbewohnte 1-Zimmer-Wohnung im Leichtbetongebäude (2.OG) betrachtet. Es wurden in der Simulation beispielsweise Eingaben zum Luftaustausch (dauerhaften Zwangslüftung, „Air-Coupling“) und zum Feuchteeintrag verändert und die entsprechenden Simulationsergebnisse mit den Messdaten verglichen. Wurde eine gute Näherung erreicht, wurden die Parametereinstellungen auf Massivholz- und Mauerwerksgebäude angewendet. Das reale Nutzerverhalten spielte in diesem ersten Schritt noch keine Rolle, um den Effekt des Nutzerverhaltens in den Messergebnissen ausschließen zu können, da sonst eine Deutung der Validierungsergebnisse erschwert gewesen wäre. Deshalb wurden in diesem Schritt die unbewohnten Ost-Wohnungen herangezogen und eine erste Validierungsgrundlage geschaffen. Unter der Annahme, dass das validierte Basis-Modell auch auf die bewohnte 2,5-Zimmer-Wohnung übertragen werden kann, wurden im zweiten Schritt Nutzerprofile aus den Messdaten dieser Wohnungen erstellt und in die Simulation integriert.

Für die statistische Validierung wurden nach ASHRAE Standard zwei Indizes – der Normalized Mean Bias Error (NMBE) und der Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CVRMSE) – verwendet [ASHRAE, 2014]. Der NMBE stellt dabei die Normalisierung des Mean Bias Error (MBE), des durchschnittlichen Fehlers eines Stichprobenraums, dar. Durch die Normalisierung wird der Wert vergleichbar, wobei ein positiver Wert eine Unterschätzung und ein negativer eine Überschätzung der Messwerte darstellt. Nach ASHRAE Standard muss bei einer Untersuchung mit stündlichen Zeitschritten der NMBE kleiner $\pm 10 \%$ und der CV(RMSE) kleiner 30 % sein [ASHRAE, 2014]. Für kleinere Zeitintervalle konnten in der Literatur keine Grenzwerte gefunden werden. Da die gültigen Abweichungen größer werden je kleiner der Zeitschritt wird, wurden die Abweichungen für stündliche Zeitintervalle in dieser Untersuchung mit minütlichen Intervallen verwendet. Der ASHRAE Standard bemerkt hierzu, dass das Erreichen eines niedrigen NMBE einfacher ist, als das Erreichen eines niedrigen CVRMSE [ASHRAE,

2014]. Zudem wird berücksichtigt, dass der NMBE Annullierungsfehlern unterliegt. Der CVRMSE misst hingegen die Variation der Fehler der gemessenen und simulierten Werte. Im Vergleich zum NMBE unterliegt er keinem Annullierungsfehler.

Als weiteres Kriterium wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. Das Maß gibt Auskunft über die Güte der Kurvenform eines Parameters, die sogenannte Regressionskurve. Es wurde geprüft, ob sich die Simulationswerte der Regressionskurve der Messwerte annähern. Der R^2 -Wert liegt zwischen 0 und 1, wobei 1 eine vollständige Übereinstimmung der Wertepaare bedeutet. Einige wissenschaftlichen Studien empfehlen, dass als Kriterium für die Validierung der R^2 -Wert größer als 0,75 sein sollte [Ruiz und Bandera, 2017].

Ergebnisse

Das Simulationsmodell wurde durch den Prozess der Validierung um folgende Werte angepasst:

- Relative Startfeuchte von 60 % im Raum
- Dauerhafter Feuchteeintrag von 0,1 g/m²*h in den Raum
- Solltemperatur von 21 °C
- Luftaustausch zwischen den Raumzonen mit einer Luftwechselrate von 0.005 1/h

Beispielhaft sind in Tabelle 5 die Ergebnisse der statistischen Auswertung der 1-Zimmer-Wohnung des Leichtbetonhauses nach Abschluss des Validierungsprozesses dargestellt. Die Ergebnisse der relativen Luftfeuchtigkeit beziehen sich dabei auf die um 5,3 %-Punkte korrigierten Messwerte als realer Korrekturfaktor.

Parameter [Abweichung]	NMBE [± 10 %]	CV_{RMSE} [< 30 %]	RMSE [K/%-Punkte]	R² [-]
Raumlufttemperatur	3,15	3,32	0,75	0,85
Rel. Raumluftfeuchte	1,09	2,14	1,44	0,18
Mittlere Strahlungstemperatur (MRT)	- 0,64	1,19	0,26	0,88
Oberflächentemperatur Decke	- 4,62	4,72	0,99	0,90

Parameter [Abweichung]	NMBE [± 10 %]	CV_{RMSE} [< 30 %]	RMSE [K/%-Punkte]	R² [-]
Oberflächentemperatur Boden	- 5,41	5,48	1,14	0,89
Oberflächentemperatur Innenwand (Nord)	- 6,61	6,70	1,38	0,86
Oberflächentemperatur A-Wand-O	- 4,74	4,85	1,00	0,91
Oberflächentemperatur I-Wand-S	- 4,13	4,35	0,92	0,81
Oberflächentemperatur I-Wand-W	- 3,04	3,31	0,70	0,78
Raumlufttemperatur Bad	4,39	4,44	1,01	0,89
Rel. Raumluftfeuchte Bad	1,68	3,07	1,75	0,36

Tabelle 5: statistische Auswertung der 1-Zimmer-Wohnung im Leichtbetongebäude mit korrigierten Feuchtemesswerten um 5,3 %-Punkte nach abgeschlossener Validierung der 2,5-Zimmer-Wohnung [Kargruber, 2022]

Die Abweichungen für NMBE und C_{VR}RMSE nach ASHRAE Standard werden für die aufgeführten Parameter eingehalten und sind damit validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass anhand der Messdaten aus den Forschungsgebäuden eine Basis-Validierung des Simulationsmodells erfolgen konnte. Das Erstellen von Nutzerprofilen der bewohnten 2,5-Zimmer-Wohnungen erwies sich zum Teil als schwierig. Für die bewohnten 2,5-Zimmer-Wohnungen des Leichtbetongebäudes war es, im Unterschied zu den 1-Zimmer-Wohnungen, nicht möglich alle Parameter zu validieren.

Als ausschlaggebende Parameter für die Ergebnisqualität der Validierung konnten für die unbewohnten 1-Zimmer-Wohnungen die angepasste Startfeuchte und Starttemperatur, das Modellieren eines dauerhaften Feuchteintrages sowie der Luftaustausch mit der Außenluft durch Infiltration festgestellt werden. Bei den bewohnten 2,5-Zimmer-Wohnungen konnten als größte Einflussfaktoren die Anpassung der Stoßlüftung, des Heizverhaltens und der Badnutzung, sowie die Infiltration durch Anwesenheitslüftung festgestellt werden.

4.5. Fazit Raumklima und Energie

4.5.1. Forschung und Praxis: integriertes Messsystem

Die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis war geprägt von gegenseitigem Interesse und Unterstützung. Die B&O Service AG Bad Aibling als Bauherrin und Gebäudebetreiberin hat in allen Belangen der Messtechnik unterstützend beigetragen und großzügig die Nutzung der 1-Zi-Wohnungen der TUM mietfrei für den Zeitraum der Messung überlassen.

Mit der durch das Messprojekt erlangten Erfahrung ist für künftige Projekte dieser Art zu empfehlen, auch bei temporärer Messung die Dateninfrastruktur kabelbasiert (analog) und in die Gebäudetechnik integriert zu planen. Dadurch kann eine sichere und zuverlässige Datenerhebung gewährleistet werden. In der Planungsphase sollten Forschung, Elektro- und TGA-Planung zusammenarbeiten. Nachteilhaft sind erhöhte Installationskosten, die durch frühe Integration der Messtechnik in der Entwurfsplanung reduziert werden können (Leerrohre, Zugänge zu Verteilungskästen/-schächten, etc.). Sollten diese im Budgetrahmen nicht realisierbar sein, ist von einem detaillierten Messsystem abzuraten. In diesem Fall sind kostengünstigere und dezentrale plug-and-play-Systeme zu empfehlen.

4.5.2. Messkonzept und Messtechnik

Die Messtechnik, bestehend aus Bauteilen der Tinkerforge GmbH, erwies sich als nicht robust und fehleranfällig. Die Bauteile für die Strommessung waren eine Fehlberatung. Diese lassen sich nur für die Messung des Stromverbrauchs einzelner Endgeräte verwenden, jedoch nicht für die Messung anhand von Stromkreis-Phasen. Aus diesen Gründen ist zum aktuellen Zeitpunkt die Verwendung des Tinkerforge GmbH Baukastensystems für eine Langzeitmessungen vorliegenden Umfangs damit eher kritisch und mit hohem Aufwand verbunden. Andererseits ist aktuell kein System mit gleicher open-source-Anwendung, Flexibilität und Preis-Leistungs-Verhältnis bekannt, das alternativ empfohlen werden kann.

Bezüglich des Messzeitraums ist festzuhalten, dass eine Projektlaufzeit von 2 Jahren ab Baufertigstellung nicht ausreicht, um eine 2-Jahres-Messung vorzunehmen. Der Bezug der Wohnungen, die Installation der Messtechnik und nicht zuletzt die Einspielphase der Gebäude im Betrieb (Baufeuchte, Technikregulierung, etc.) sind zu berücksichtigen.

4.5.3. Messergebnisse: Nicht nur Messen, sondern auch Hinterfragen

Die Messergebnisse alleine bieten einen Interpretationsspielraum, den es einzugrenzen gilt. Befragungen der NutzerInnen, der HausmeisterInnen und der Gebäudeverwaltung

bzw. EigentümerInnen sind deshalb ein wichtiges Instrument, das parallel die Messung begleiten sollte. Die hier vorgenommene NutzerInnenbefragung (Kapitel 5) gibt wichtige Erklärungen für Auffälligkeiten in den Messergebnissen.

4.5.4. Forschungsfragen

Durch Messen, Validieren und Rückkoppeln soll als übergeordnete Forschungsfrage überprüft werden, ob das entwickelte Gebäudekonzept „Einfach Bauen“ in der Realität funktioniert. Dabei sollen folgende detaillierte Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Können vergleichende Aussagen zu den drei Forschungshäusern bezüglich Konstruktion, thermischer Komfort und Energieverbrauch getroffen werden? Wenn ja, welche Gebäudekonstruktion schneidet am besten ab und warum?

Bezugnehmend auf die in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse, lassen sich folgende Merksätze als Fazit ziehen:

- Der positive Effekt der thermischen Masse auf Raumkomfort ist im Leichtbetonhaus am größten.
- Die Baumverschattung an der Ost-Fassade des Leichtbetonhauses hat einen großen Einfluss auf das Raumklima und die Beleuchtungsstärke im Sommer und den Übergangsjahreszeiten.
- Das Massivholzhaus benötigt als einzige Konstruktion außenliegenden Sonnenschutz an den Fenstern der West-Fassade, wenn man Überhitzungsstunden im Sommer ausschließen möchte.
- Das Mauerwerkshaus schneidet bei den leerstehenden Wohnungen bezüglich der Raumlufftfeuchte am besten ab.

2. War die Annahme eines idealen Nutzers sinnvoll, um vergleichende Aussagen zu thermischem Komfort und Energieverbrauch zu erhalten?

Die Annahme eines idealen Nutzers war sinnvoll, wie die Ergebnisse in Kapitel 4 zu Raumkomfort und Energie zeigen. Die Kombination dreier natürlicher Lüftungsprofile - bestehend aus dem hygienischen Luftwechsel unterhalb einer operativen Temperatur von 24 °C, einer Fensterstoßlüftung von 15 min je morgens und abends, sowie einer Wärmeablüftung ab Außenlufttemperaturen über 5 °C und einer operativen Temperatur

von 24 °C im Raum – führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Mit der Anpassung der Küchenlüftung konnte die Feuchteregulierung realistisch abgebildet werden.

3. Spiegeln sich die Simulationsergebnisse bezüglich Raumlufthtemperatur, Lüftungsverhalten, Heizwärmebedarf und Überhitzungsstunden in der tatsächlichen Nutzung wieder? Besteht ein Performance Gap?

Für den Großteil der gemessenen und simulierten Räume trifft die Aussage zu. Nutzerbedingte Abweichungen, wie z.B. der hohe Heizenergiebedarf in der Mauerwerks-Süd-Wohnung, können klar als extremen Nutzereinfluss definiert werden.

4. Treten die Annahmen aus der Simulation auch in der tatsächlichen Nutzung ein? Wenn nicht – wie müsste das Konzept angepasst werden?

Die Annahmen ergeben grundsätzlich eine gute Näherung der Realität. Ein wichtiger Einflussfaktor, der zukünftig in der Modellierung berücksichtigt werden sollte, ist die Umgebungsverschattung durch Bäume und Nachbarbauten. Im Validierungsprozess hat sich gezeigt, dass dieser Faktor in der Messung eine große Wirkung auf den thermischen und visuellen Komfort hat, der in der Simulation zukünftig berücksichtigt werden sollte.

5. Nutzerbefragung

5.1. Ziel

Um das bauklimatische Verhalten der drei Bauweisen bewerten und vergleichen zu können, wurde der thermische Komfort in den Innenräumen gemessen. Mit der Erfassung und Auswertung der Daten ließ sich überprüfen, ob der zuvor berechnete Energiebedarf in der Praxis erreicht wird. Die gemessenen Werte wurden durch gezielte Nutzerbefragungen eingeordnet. Dabei interessierten uns folgende Forschungsfragen: Fühlen sich die Bewohner der Häuser wohl, und entspricht ihr subjektives Komfortempfinden den gemessenen Werten? Mit welchen Maßnahmen versuchen Sie, Einfluss auf die Innenraumtemperatur zu nehmen? Welche Rückschlüsse lassen sich vom Nutzerverhalten auf die gemessenen Daten ziehen?

5.2. Methodik

5.2.1. Semistandardisierter Fragebogen

Zur Befragung kamen semistandardisierte Fragebögen zum Einsatz. Diese wurden allen bewohnten Haushalten in den Forschungshäusern persönlich zugestellt. Dabei konnte das Prozedere erklärt und Fragen beantwortet werden. Zudem ist die Rücklaufquote bei persönlichem Kontakt in der Regel höher [Mayer 2013]. Zusammen mit dem Fragebogen wurde ein frankierter Rückumschlag übergeben, um den Rücklauf möglichst einfach zu gestalten. Die Übergabe fand an drei Terminen zu unterschiedlichen Tageszeiten statt, um möglichst viele Mieter persönlich zu erreichen. Den Verbliebenen wurden die Unterlagen in den Briefkasten geworfen und eine Woche später mit einem Einwurf Zettel an die Abgabe – soweit noch nicht erfolgt - erinnert.

5.2.2. Inhalt der Fragebögen

Anfangs wurde darauf hingewiesen, dass das Ziel der Forschung ein geringer Energieverbrauch der Häuser ist. Inhalt der Befragungen ist, ob es in den Wohnungen behaglich ist (bezogen auf Temperatur und Luftqualität) und durch welche Maßnahmen das erreicht wird (Heizen, Lüften). Zudem interessierte uns, ob sich die Mieter in den Häusern wohlfühlen. Dabei wurde betont, dass es um die persönliche Meinung geht und es kein „richtig“ oder „falsch“ gibt. Die Anonymisierung der Daten wurde zugesichert.

Die Fragen konnten anhand einer fünfstufigen verbalen Skalenbezeichnung [Raab-Steiner, Benesch 2015] (z.B. sehr zufrieden – zufrieden – teils/teils – weniger zufrieden –

unzufrieden) beantwortet werden. Bei einigen Fragen waren Mehrfachantworten möglich. Zusätzlich gab es Kommentarfelder, um vertiefter auf einzelne Themen eingehen zu können oder die Antwort zu begründen. Hiervon wurde größtenteils Gebrauch gemacht.

Die Benchmarks, an denen in Einfach Bauen 1 die Raumvarianten und nun die Forschungshäuser gemessen wurden, sind der Heizwärmebedarf und die Übertemperaturgradstunden [Nagler et al. 2019]. Entsprechend wurden die Bewohner zu ihrem Temperaturempfinden in der Winter- und der Sommerzeit befragt.

Folgende Themenbereiche waren Inhalt der Abfrage:

- Temperaturempfinden
- Maßnahmen zur Regulierung des Raumklimas
- Fazit und Erwartungen

5.2.3. Auswertung

Die ermittelten Antworten wurden als Säulendiagramme sowohl nach Bauart des Hauses (LB = Leichtbeton, HM = Holzmassiv, MW = Mauerwerk) dargestellt, als auch nach Himmelsrichtung (Nord, Ost, Süd). Die Aussagen der mit Sensoren ausgestatteten Wohnungen wurden den tatsächlich gemessenen Werten gegenübergestellt.

5.3. Durchführung

5.3.1. Häuser und Mieterstruktur

Alle Forschungshäuser sind zum Beginn der Befragung im Februar 2022 vollständig fertiggestellt und bezogen. Die Vermietung erfolgte durch den Bauherrn, die Gesellschaft B&O. Dies geschah teilweise durch direkte Kontakte zu den Mietern, teilweise bot sie Wohnungen der drei Objekte auf der Internetplattform „Immoscout“ zu Vermietung an. Der Mietpreis der mit Sensoren ausgestatteten Wohnungen betrug zum Zeitpunkt der Vermietung 8,60 Euro Kaltmiete, das ist ein Euro weniger als die Wohnungen ohne Sensoren. Laut Vermieter bewegt sich dieser Mietpreis im mittleren Mietpreisniveau und verhält sich ähnlich zu vergleichbaren Angeboten in der Gegend. Vor Mietbeginn wies die zuständige Person bei B&O die möglichen Mieter auf die Forschungstätigkeit hin [Meisl 2022]. Kurz nach ihrem Einzug informierte das Forschungsteam die Mieter über die Forschungstätigkeit [Technische Universität München 2021].

5.3.2. Erste Befragung

Die erste Befragung fand nach der Winterzeit, am Ende der Heizperiode im Zeitraum Februar bis April 2022 statt. In jedem der Häuser stehen zu dem Zeitpunkt je zwei Wohnungen leer. Jeweils in der zweiten Etage wird durch die TU München eine Leerstandsmessung im nach Osten ausgerichteten 1-Zimmer-Appartement durchgeführt. Im Leichtbeton- und im Massivholzhaus befinden sich Showrooms, in denen der Vermieter Besucher empfangen und ihnen das Konzept der Häuser erläutern kann. Im Mauerwerkshaus ist im Erdgeschoss der Technikraum für alle Häuser untergebracht. Insgesamt sind während der ersten Befragung 18 der 23 Wohnungen vermietet (Abbildung 67).

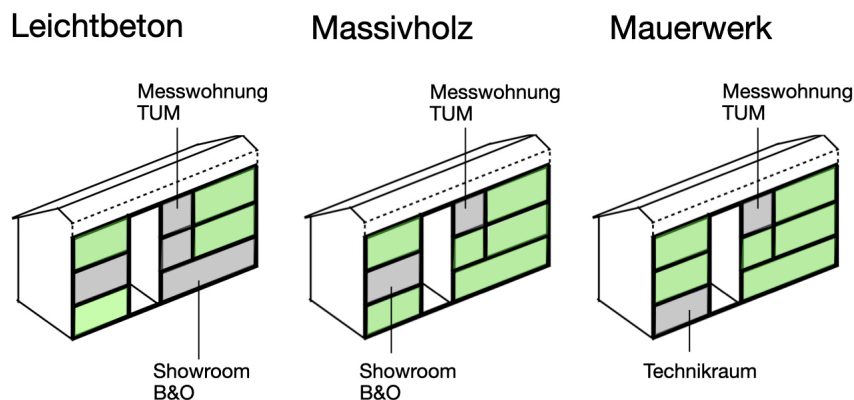
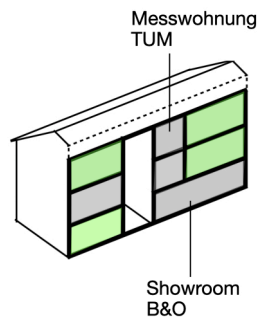


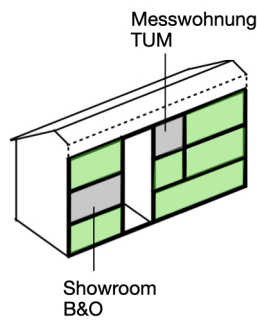
Abbildung 67: Übersicht über die bewohnten Einheiten während der ersten Befragung (TUM)

Allerdings stellte sich heraus, dass vier der Wohnungen trotz Vermietung leer standen. Ein Mieter gab trotz persönlichen Kontakts seinen Fragebogen nicht ab. Die Befragung wurde also bei 13 Haushalten durchgeführt, wovon sieben mit einer Person belegt waren, fünf mit zwei Personen und ein Haushalt mit fünf Personen (Abbildung 68). Sieben Personen waren weiblich, 15 männlich. Unter den Befragten waren drei Personen unter 18 Jahre, sieben zwischen 18 und 30 Jahren, elf zwischen 30 und 65 Jahren und ein Befragter über 65 Jahren.

Leichtbeton



Massivholz



Mauerwerk

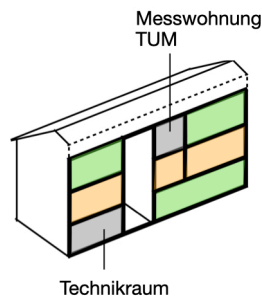
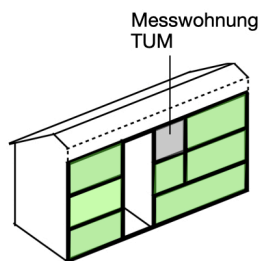


Abbildung 68: Rücklauf der Fragebögen im Winter (TUM)

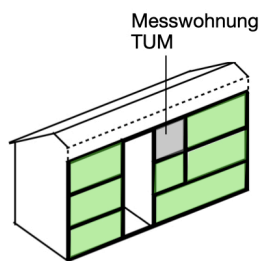
5.3.3. Zweite Befragung

Die Befragungen nach der Sommerzeit fanden im September und Oktober 2022 statt. Die beiden Showrooms sind nun ebenfalls vermietet. Zudem gab es Mieterwechsel in drei Wohnungen. Insgesamt sind während der zweiten Befragung 20 der 23 Wohnungen vermietet (Abbildung 69).

Leichtbeton



Massivholz



Mauerwerk

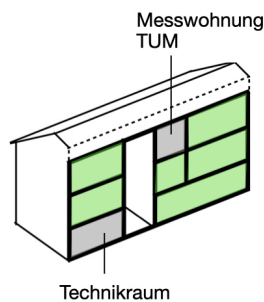


Abbildung 69: Übersicht über die bewohnten Einheiten während der zweiten Befragung (TUM)

Eine Wohnung war erst ab Anfang September bewohnt, so dass keine Erfahrung über die Sommerzeit vorlagen und eine Befragung dementsprechend keinen Sinn machte. Eine weitere Wohnung wurde nur zeitweise mit Arbeitern der benachbarten Baustelle belegt, so dass auch hier auf eine Befragung verzichtet wurde. Eine dritte Wohnung war wie schon im Frühjahr vermietet, stand aber leer. In zwei weiteren waren die Mieter kurz vor der Befragung ausgezogen. Drei Mieter gab trotz persönlichen Kontakts ihren Fragebogen nicht ab.

Die Befragung wurde demnach bei 12 Haushalten erfolgreich durchgeführt, wovon fünf mit einer Person belegt waren, fünf mit zwei Personen und zwei Haushalte mit fünf Personen (Abbildung 70). Zehn Personen waren weiblich, 17 männlich. Unter den Befragten waren acht Personen unter 18 Jahre, sieben zwischen 18 und 30 Jahren, und zwölf zwischen 30 und 65 Jahren.

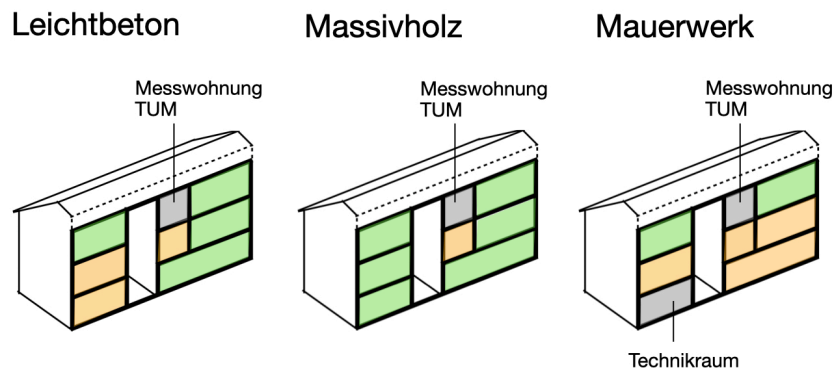


Abbildung 70: Rücklauf der Fragebögen im Sommer (TUM)

5.4. Ergebnisse der Winter-Umfrage

Die Befragung fand nach der kältesten Zeit (Dezember 2021/Januar 2022) statt, um die noch frischen Empfindungen zu dokumentieren. Krankheitsbedingt verschoben sich einige Abfragen bis in den April hinein. Es wurde klargestellt, dass sich die Fragebögen auf die gesamte Winterzeit bezogen.

Es zeigt sich, dass in der Winterzeit die Raumtemperatur tendenziell als eher kalt eingestuft wurde (Abbildung 71). In fünf der Wohnungen wurde sie als angenehm empfunden. Die Mehrzahl, sieben der befragten Einheiten, ordnete die Raumtemperatur als etwas zu kalt und eine als zu kalt ein. Die Ausrichtung der Wohnungen scheint dabei weniger eine Rolle zu spielen als die Bauweise: die als kalt bezeichnete Wohnung befindet sich nach Süden ausgerichtet im Leichtbetonhaus.

- Wie empfinden Sie im Augenblick (Winterzeit) die Temperatur in ihrer Wohnung?

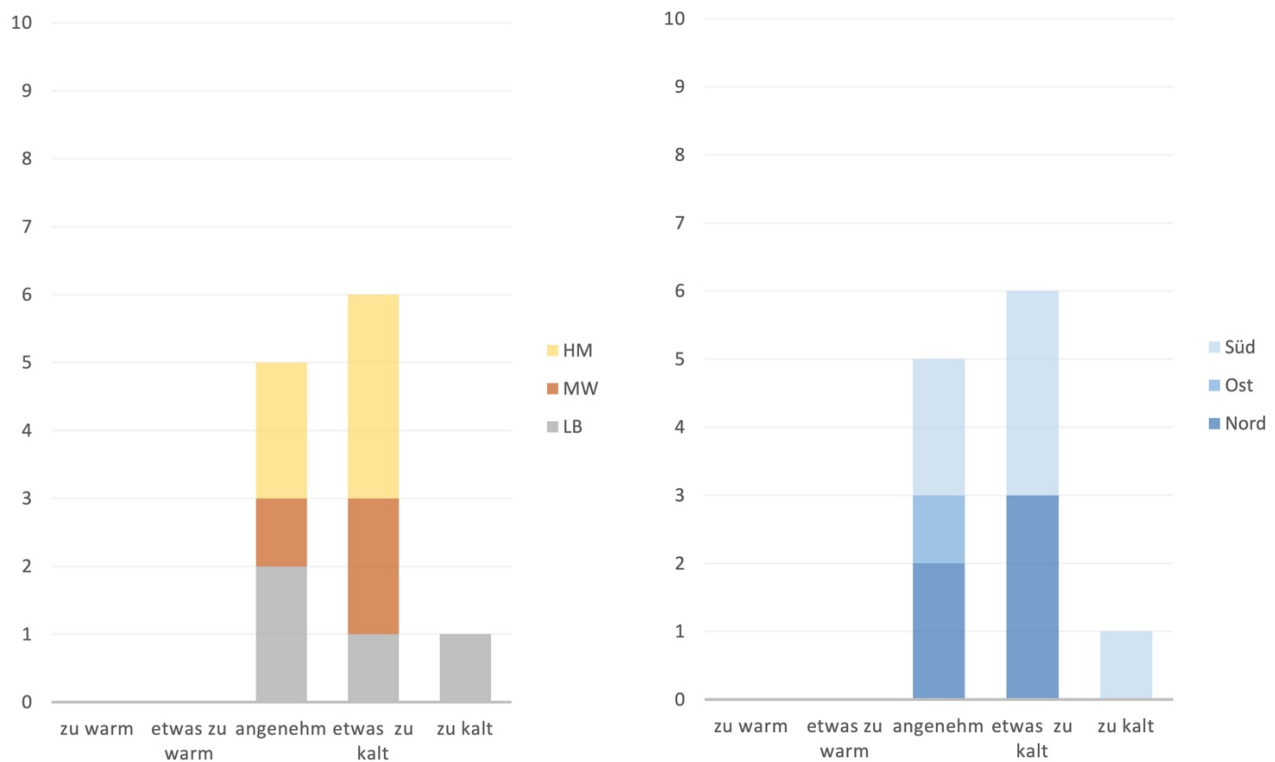


Abbildung 71: Raumtemperatur im Winter; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Der Abgleich der tatsächlich gemessenen Temperaturen in den Messwohnungen mit den Aussagen der Bewohnenden zeichnet dagegen ein differenziertes Bild: In einer Wohnung im Holzhaus, die als „etwas zu kalt“ empfunden wurde, lag die operative Temperatur – die gemittelte Temperatur aus Strahlungs- und Raumlufthtemperatur und damit der „gefühlten“ Temperatur am nächsten - im Wohnzimmer im Dezember 2021 zwischen 17 und 26 Grad Celsius (Abbildung 72). Nur 79% der Messpunkte lagen im Komfortbereich. Allerdings wurden die Heizkörper nur auf niedrigem Niveau eingestellt. Eine Steigerung der Raumtemperatur wäre möglich gewesen. Laut Aussage unterblieb dies aus Sorge um hohe Nebenkosten, war also vom Nutzer selbst gesteuert und gewollt

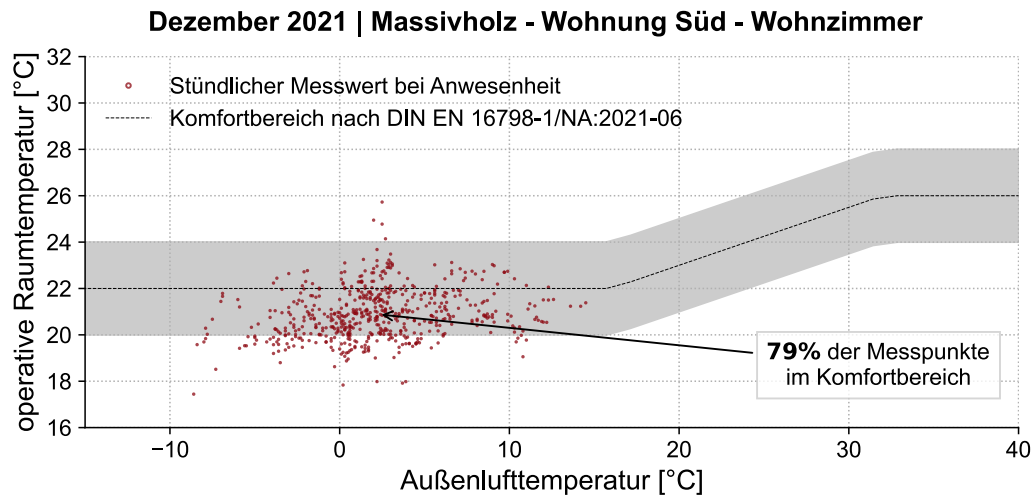


Abbildung 72: Thermischer Komfort (operative Temperatur), Dezember 2021, Massivholz Süd, Wohnzimmer

Anders verhielt es sich in einer Wohnung im Leichtbetonhaus, die ebenfalls als „etwas zu kalt“ eingeordnet wurde. Laut Messprotokoll lagen im Dezember 2021 99% aller Messpunkte im Komfortbereich. Es gab nur wenige Stunden unter der Marke von 20 Grad Celsius (Abbildung 73). Die befragte Person gab an, dass die negative Bewertung durch eine leichte Zuglufterscheinung in der Nähe der Terrassentür zustande kam. Genau dort hielt sie sich gerne auf.

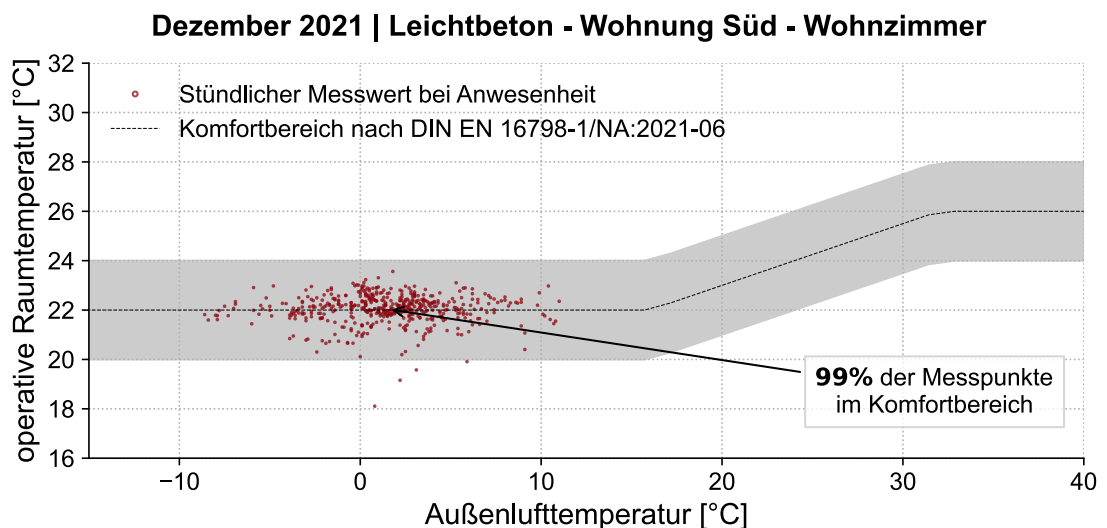


Abbildung 73: Thermischer Komfort (operative Temperatur), Dezember 2021, Leichtbeton Süd, Wohnzimmer

Die Außenwände bestehen aus monolithischen Konstruktionen und unterscheiden sich je nach Material in der Dicke, dem Wärmedurchgangskoeffizienten und der Oberflächentextur. Das Mauerwerk ist innen verputzt, während Holz und Beton innen sichtbar ausgeführt wurden [Nagler et al. 2022]. Das Temperaturempfinden zeichnet den U-Wert nach: Die Wände des Holzhauses wurden als „neutral“, „leicht warm“ oder sogar als „warm“ bezeichnet (Abbildung 74). Das Mauerwerk fiel in die Kategorien „warm“ und „neutral“, während der Leichtbeton als „neutral“ und von einer Person als „kühl“ eingestuft wurde. Die Verteilung nach Himmelsrichtung folgte diesem Trend: nach Norden eher kühl, nach Süden eher warm.

- Wie empfinden Sie die Oberflächentemperatur der Außenwand?

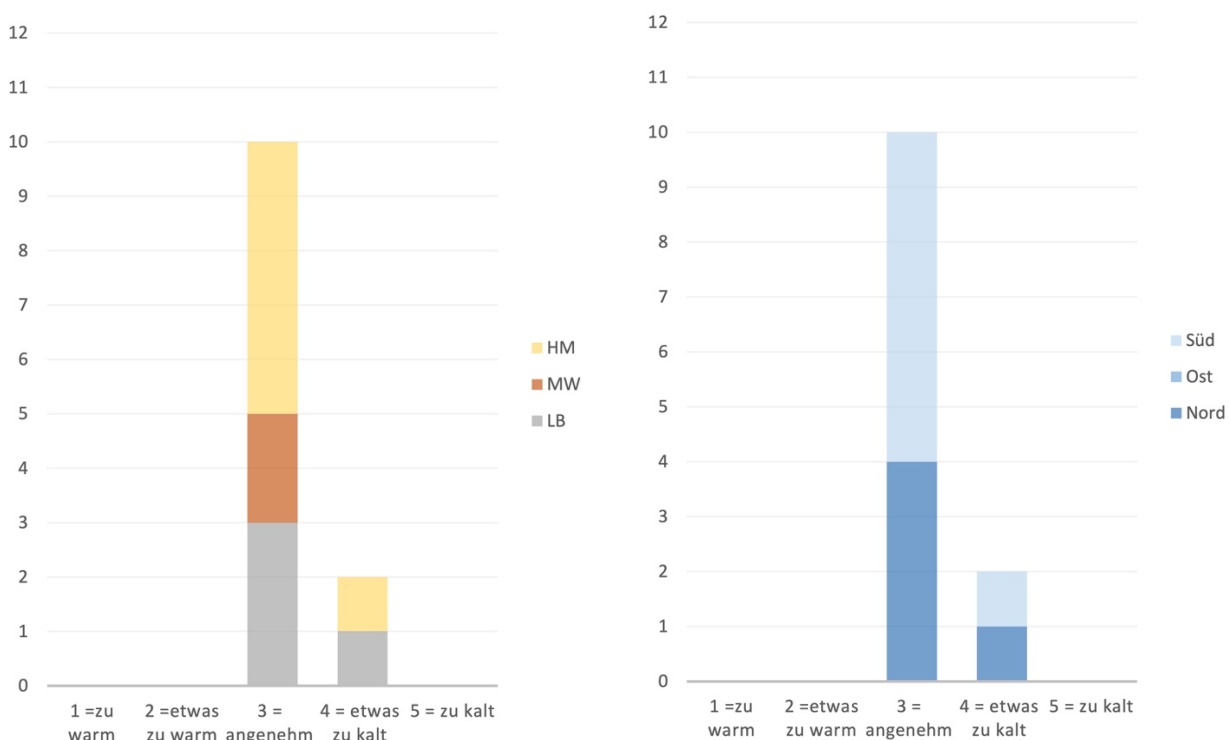


Abbildung 74:: Oberflächentemperatur der Außenwand im Winter; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Ein anderes Bild zeigt sich beim Fußboden, wo die Mehrheit die Temperatur als „etwas zu kalt“ oder „zu kalt“ bemängelte (Abbildung 75). Die Bewohnenden des Leichtbetonhauses froren einstimmig, was sich materialtechnisch nicht begründen lässt. Alle Häuser verfügen über 30 cm dicke Geschossdecken aus Beton (im Leichtbetonhaus mit Stahlfasern, in den anderen Häusern mit konventioneller Bewehrung). Nur im Erdgeschoss liegt darauf Dämmung und Estrich, in den Obergeschossen ist der Bodenaufbau ohne weitere Schichten ausgeführt und auf der Betondecke liegt direkt ein Sisal- oder Linoleumbelag. Es wurde kritisiert, dass die leerstehenden Wohnungen (die Showrooms und

die nur zeitweise belegten Einheiten) nicht ausreichend beheizt würden und daher die darüberliegenden Wohnungen fußkalt seien. Das hat sich zwischenzeitlich (Herbst 2022) geändert. Es wäre interessant zu erfahren, ob sich die Wahrnehmungen in der nächsten Heizperiode ändert. Diese Frage kann im Zeitrahmen des Forschungsprojekts nicht beantwortet werden.

- Wie empfinden Sie die Temperatur des Fußbodens?

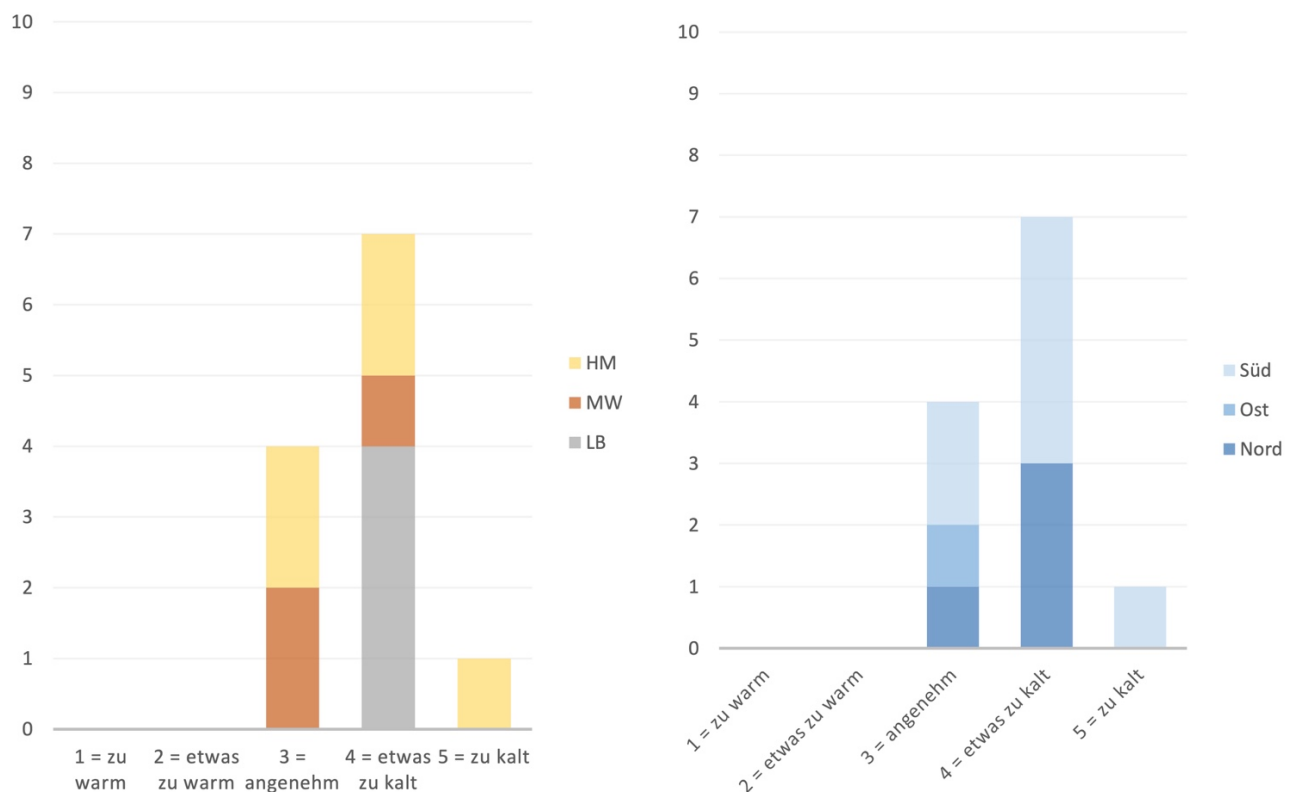


Abbildung 75: Temperatur des Fußbodens im Winter; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Einen großen Einfluss auf das Temperaturempfinden hat das Heizsystem. Die Wohnungen verfügen über Heizkörper, die dicht am Vertikalstrang der Technik platziert sind und damit weit entfernt von den Fenstern [Jarmer et al. 2021]. Die Wärmeversorgung erfolgt vor Ort aus Gas und Holzhackschnitzel. Die Heizung wird über die Thermostatventile der Heizkörper gesteuert. Sie sind hochformatig, um viel Wandfläche für Möbel zu belassen. Die Möglichkeit der Regulierung wird unabhängig von Bauart und Himmelsrichtung sehr unterschiedlich eingeschätzt. (Abbildung 76). Alle fünf Bewertungseinheiten (von 1 = sehr zufrieden bis 5 = unzufrieden) wurden fast gleich bewertet. Diese teilweise negative Bewertung wurde in einigen Fällen mit der geringen Anzahl an Heizkörpern begründet. Vor allem in der Küche vermissten einige BewohnerInnen einen Heizkörper.

- Sind Sie zufrieden mit der Regulierung der Heizung?

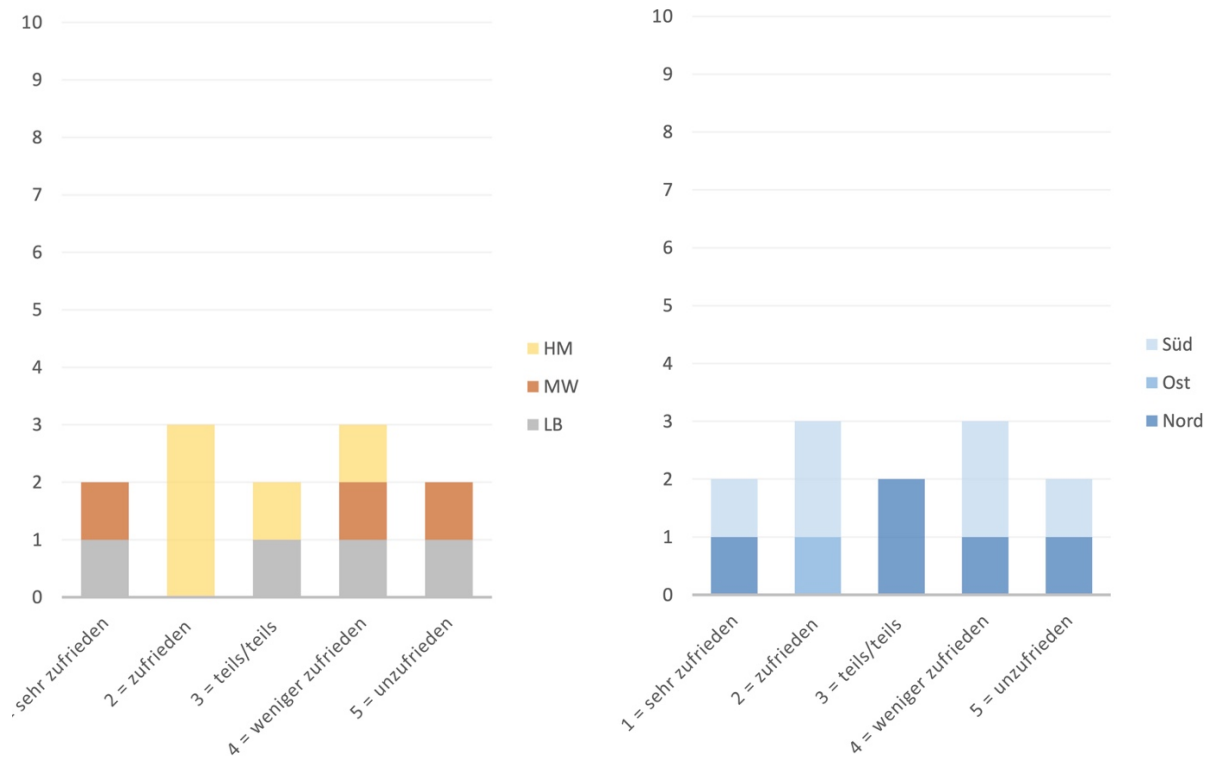
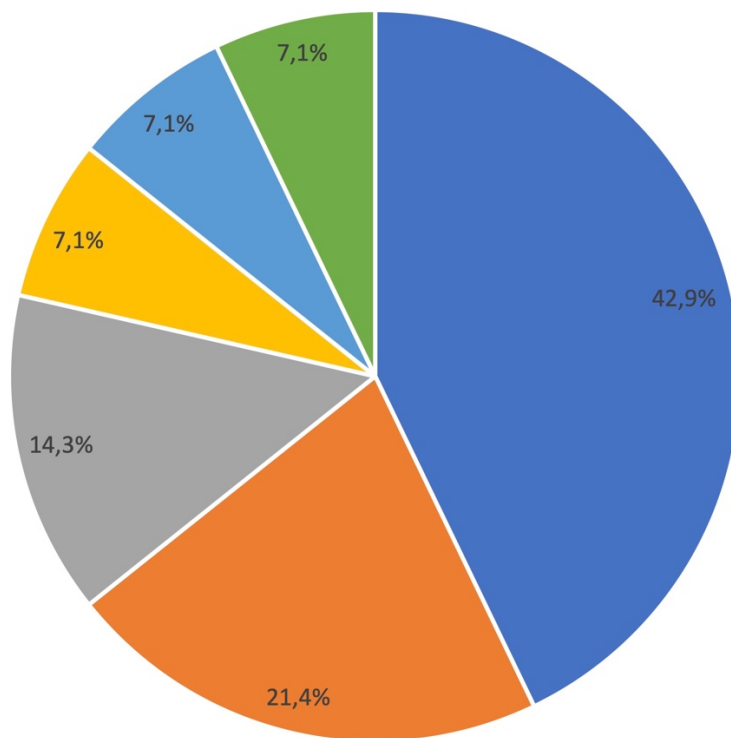


Abbildung 76: Regulierung der Heizung; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

- Was tun Sie üblicherweise an kalten Tagen, um sich in Ihrer Wohnung wohlfühlen?



- Ich heize einfach mehr mit der Zentralheizung
- Ich ziehe etwas Warmes an (Pullover, lange Unterhose, Mütze)
- Ich nehme Heißgetränke und warme Mahlzeiten zu mir
- Ich verwende eine Wärmflasche
- Ich verwende Heizdecken
- Ich verwende zusätzlich Heizstrahler/Heizlüfter

Abbildung 77: Maßnahmen in der Winterzeit (Mehrfachnennung möglich)

Die Mehrzahl der Mieter, knapp 43%, reagierten auf die kalten Außentemperaturen damit, die Ventile der Heizkörper weiter aufzudrehen (Abbildung 77). Es wurde angemerkt, dass es in manchen Wohnungen dennoch nicht ausreichend warm wurde. Teilweise kamen daher weitere Heizgeräte wie zum Beispiel eine tragbare Infrarotheizung zum Einsatz. Weiterhin passten sich die Bewohnenden durch geänderte Kleidung der Winterzeit an oder verhielten sich saisonal entsprechend, indem sie etwas Warmes zu sich nahmen oder sich eine Wärmflasche machten.

Insgesamt zeigt sich ein uneinheitliches Stimmungsbild, wobei die Bewohnenden der Nordwohnungen tendenziell unzufriedener waren (Abbildung 78).

- Alles in allem, wie zufrieden bzw. unzufrieden sind Sie in der kalten Jahreszeit mit der Temperatur in Ihrer Wohnung?

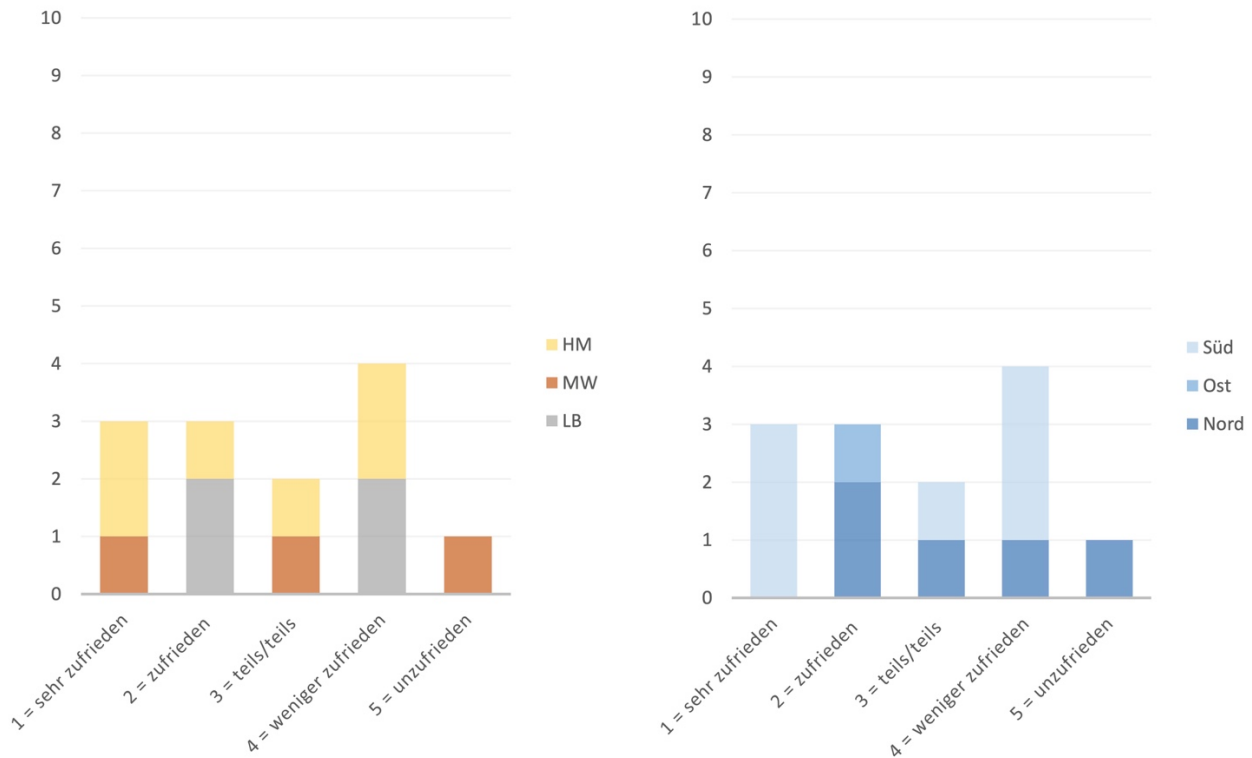


Abbildung 78: Zufriedenheit mit der Temperatur in der Winterzeit; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Obwohl es vielen Mietern in der Winterzeit etwas zu kalt in den Wohnungen war, haben sich ihre Erwartungen an die Wohnungen in der Mehrzahl bestätigt (Abbildung 79). Das Außenwandmaterial schien dabei keine Rolle zu spielen. Auch würden die meisten wieder die Entscheidung treffen, in diese Wohnung zu ziehen (Abbildung 80). Negativ sahen dies zwei Bewohner der Nordwohnungen, wovon eine Person tatsächlich ausgezogen ist. Begründet wurde dies mit anderen Faktoren wie dem fehlenden Balkon und den mangelnden Abstellbereichen.

- Haben sich ihre Erwartungen an die Wohnung bestätigt?

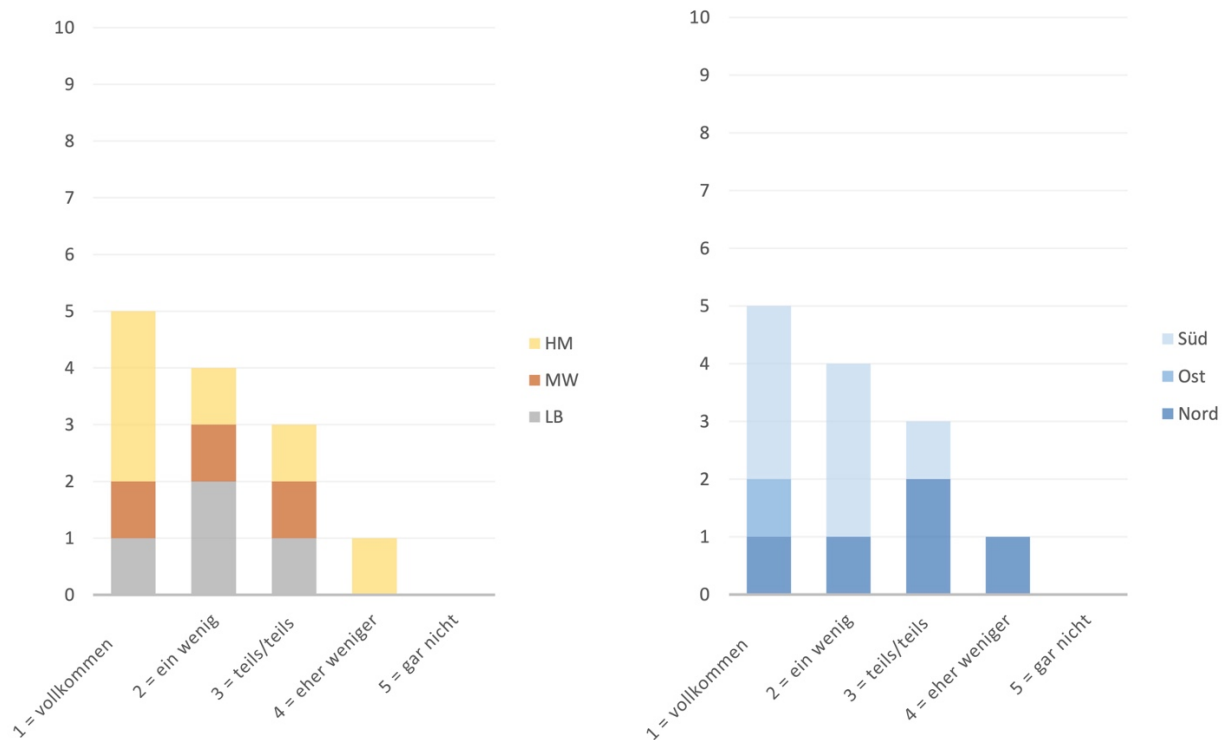


Abbildung 79: Erwartungen an die Wohnung; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

- Würden Sie wieder die Entscheidung treffen, in diese Wohnung zu ziehen?

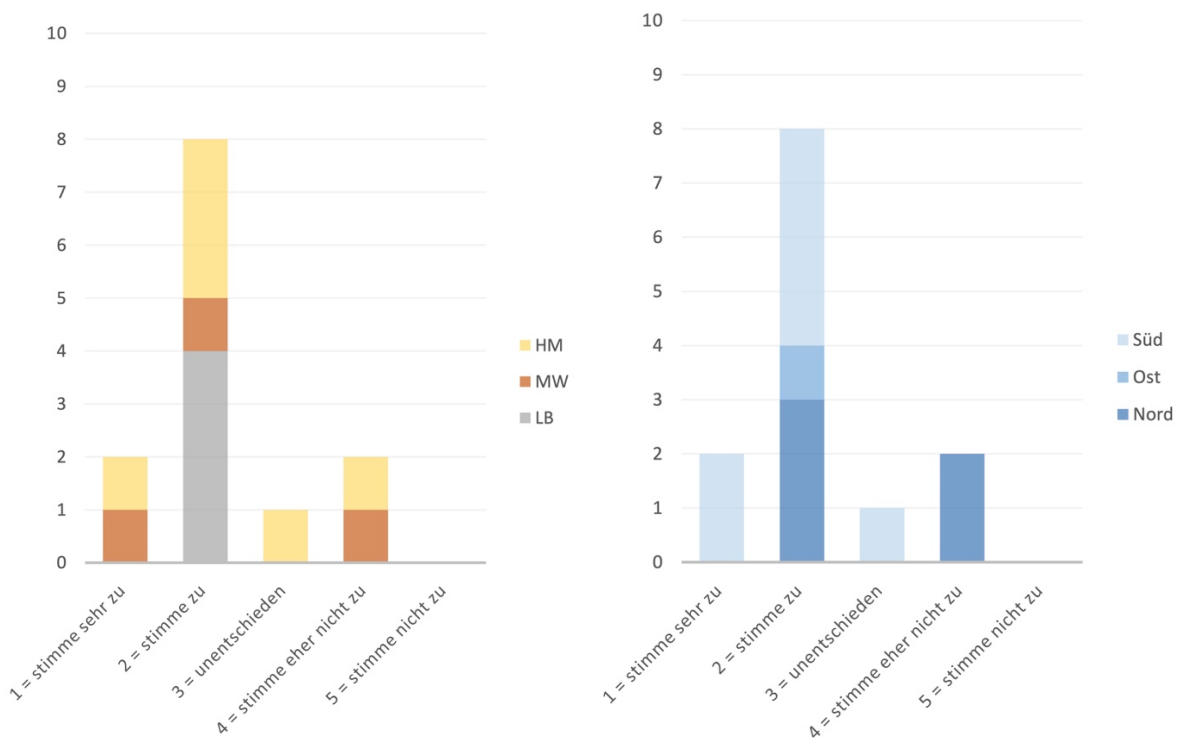


Abbildung 80: Entscheidung, wieder in diese Wohnung zu ziehen; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Fazit

Die drei verschiedenen Wandmaterialien erfüllen alle den notwendigen Dämmstandard. Die Leichtbetonkonstruktion hat im Vergleich den höchsten U-Wert und damit die geringste Dämmwirkung, was sich auch im Temperaturempfinden der Bewohner widerspiegelt. Entscheidend dafür ist aber eher das Heizungssystem. Die Heizkörper sind zwar ausreichend dimensioniert, um theoretisch bei voller Heizlast den Raum ausreichend zu erwärmen. Das wurde allerdings in manchen Fällen nicht so empfunden, da die Heizkörper trotz Klagen über zu niedrige Temperaturen oft nicht voll aufgedreht wurden. Nur in einem Fall wurden wirtschaftliche Gründe angegeben, ansonsten gab es keine Begründung für das Verhalten. Eine Untersuchung der wirtschaftlichen Verhältnisse der Haushalte ist nicht erfolgt. In welchem Ausmaß die inzwischen stark gestiegenen Energiekosten Einfluss auf das Heizverhalten haben werden, kann in diesem Forschungsprojekt nicht mehr untersucht werden.

Viele Mieter hielten sich gerne in der Küche auf und vermissten dort einen Heizkörper. Der partielle Leerstand von Wohnungen ist nachteilig für andere Mieter. Die angrenzenden Bauteile wurden als kühl empfunden und senken damit den Raumkomfort.

5.5. Ergebnisse der Sommer-Umfrage

Die Fenster der Forschungshäuser sind im Verhältnis zum dahinterliegenden Raum so proportioniert, dass das Verhältnis von Wärmeeintrag durch solare Gewinne (vor allem im Sommer) und Wärmeverluste in der kalten Jahreszeit möglichst ausgeglichen ist [Nagler et al. 2022]. Um den Nutzereinfluss und damit auch eine eventuelle Fehlbedienung so gering wie möglich zu halten, ist kein außenliegender Sonnenschutz vorgesehen. Ein gewisser Effekt tritt durch die Laibungsverschattung aufgrund der innenseitig angeschlagenen Fenster ein. Allerdings sind die Außenwanddicken je nach Material unterschiedlich, im Leichtbetonhaus 45 cm, im Mauerwerkshaus 40 cm und im Massivholzhaus 39 cm. Durch die Geschossdecken aus Stahlbeton verfügen alle Häuser über Speichermassen, die Temperaturschwankungen puffern können. Die Häuser aus Leichtbeton und Mauerwerk haben jedoch in dieser Hinsicht durch die schwere Bauweise der Außen- und Innenwände einen Vorteil gegenüber dem Massivholzhaus. Ob diese Unterschiede wahrgenommen wurden, war Inhalt der Untersuchung. In den Fragebögen wurden Aussagen zum Temperaturempfinden in der Sommerzeit aufgenommen und zu den Maßnahmen, die ggf. ergriffen wurden, um die Raumtemperatur anzupassen. Auch

hier fanden die Befragungen direkt nach der heißesten Zeit statt (Juli/August 2022), um die noch frischen Eindrücke zu dokumentieren.

Die allgemeine Frage nach dem Temperaturempfinden in der Sommerzeit (Juli-September) wurde von den meisten positiv beantwortet: 10 BewohnerInnen, darunter alle Befragten im Leichtbetonhaus, erlebten die Sommerzeit als angenehm. Nur zwei Wohnungen wurden als etwas zu warm bemängelt. (Abbildung 81)

- Wie empfinden Sie im Augenblick (Sommerzeit) die Temperatur in ihrer Wohnung?

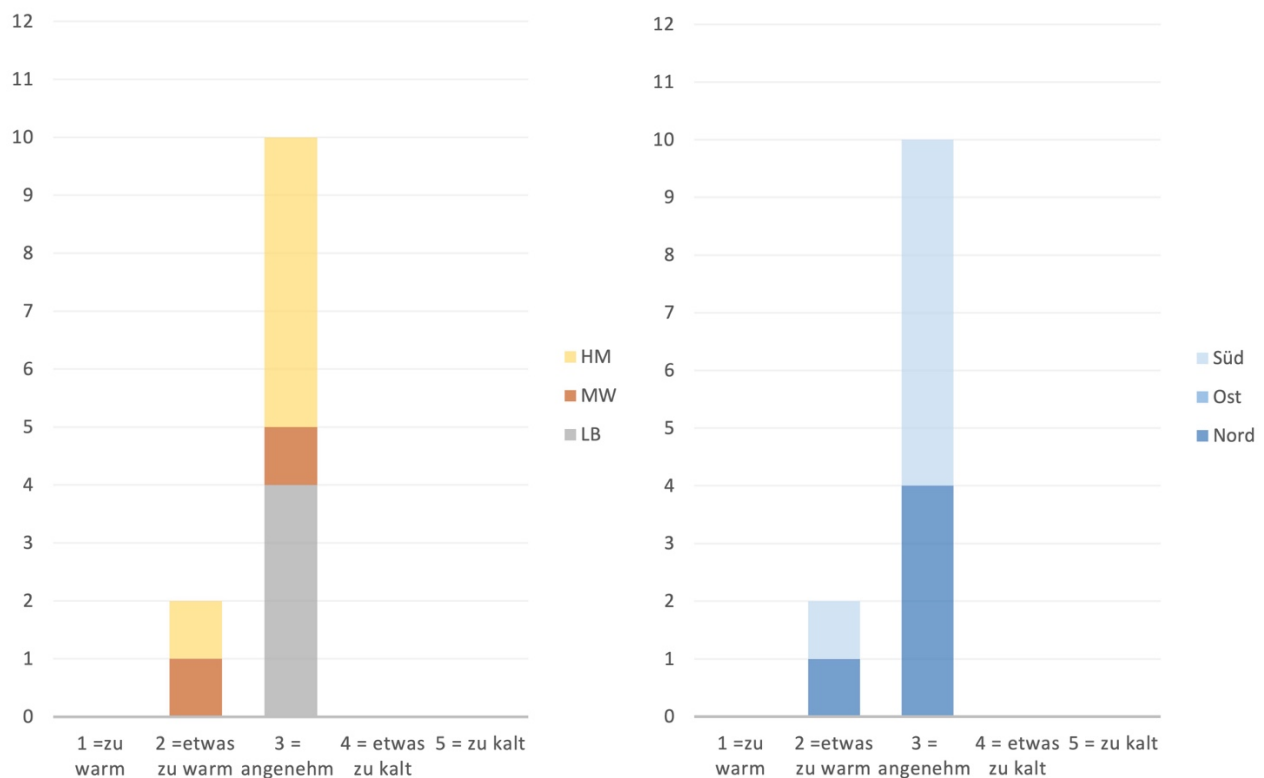


Abbildung 81: Raumtemperatur im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Erwartungsgemäß befand sich eine Südwohnung im Holzhaus darunter. Tatsächlich lagen die gemessenen Temperaturen im Wohnzimmer im Monat August zwischen 20 und 28,5 Grad Celsius, nur 68% der Messpunkte befanden sich im Komfortbereich (Abbildung 82). Die befragte Person versuchte, durch nächtliches Lüften die Temperatur abzusenken. Zudem verschloss sie die Fenster innenseitig mit Vorhängen.

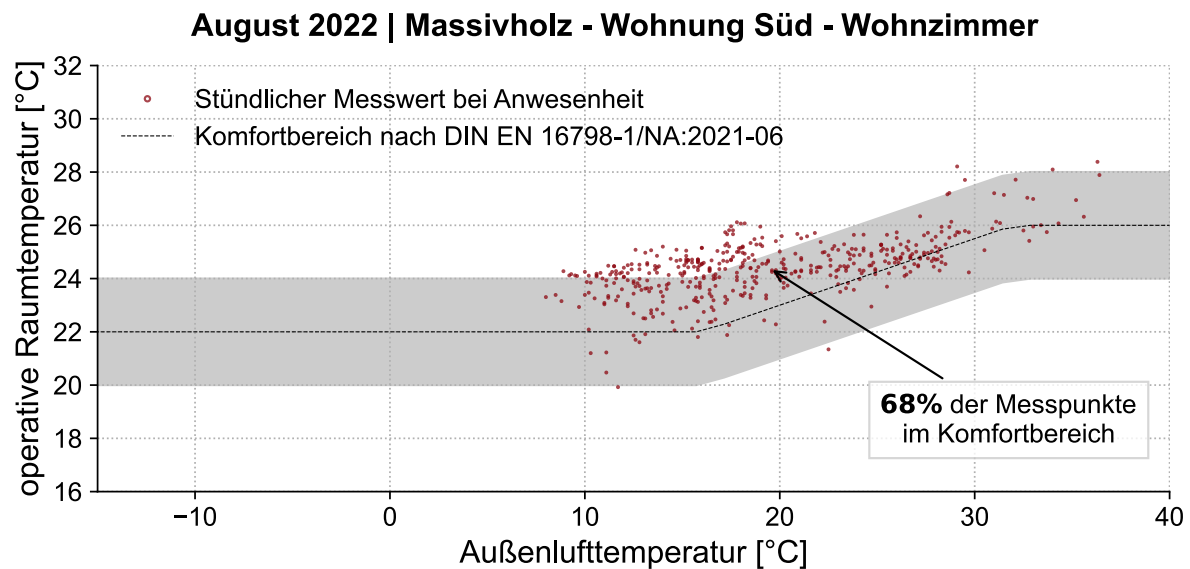


Abbildung 82: Thermischer Komfort (operative Temperatur), August 2022, Massivholz Süd, Wohnzimmer

Auch in der nach Norden ausgerichteten Wohnung im Mauerwerkshaus wurden die Temperaturen als etwas zu warm bemängelt. Im August 2022 kamen die Werte auf einen Bereich zwischen 21 und 28,3 Grad Celsius (Abbildung 83). 59% der Messpunkte lagen im Komfortbereich. Laut Mieter wurde es vor allem in den Nachmittags- und Abendstunden zu warm. Grund für die zeitweise Überhitzung war daher vermutlich die Lage im 2. Obergeschoss, die keine Verschattung durch Bäume (wie das Betonhaus) oder Nachbargebäude (wie das mittig liegende Holzhaus) erfuhr und daher voll von der tief stehenden Westsonne erfasst wurde.

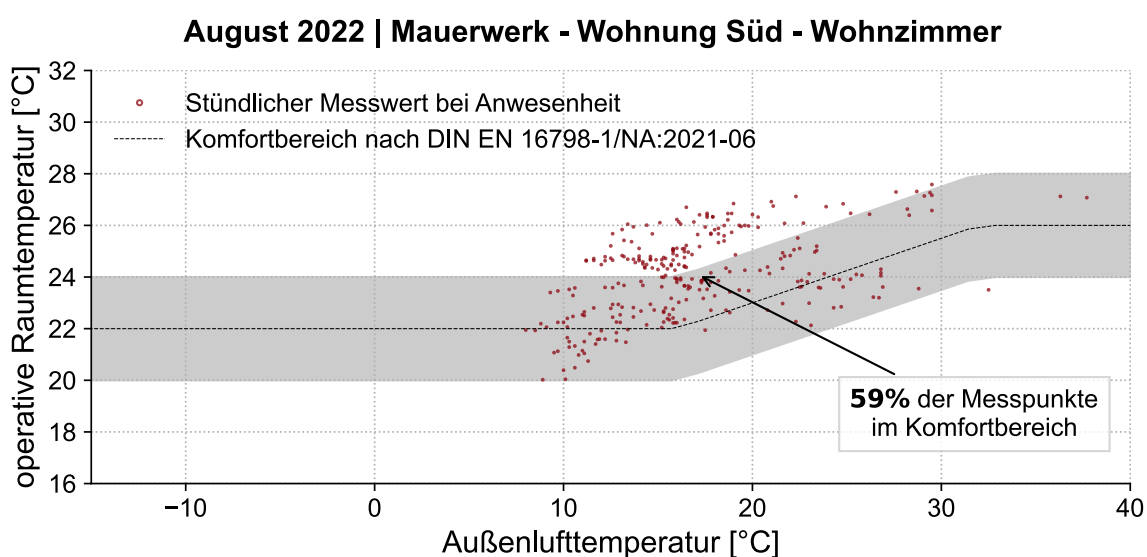


Abbildung 83: Thermischer Komfort (operative Temperatur), August 2022, Mauerwerk Süd, Wohnzimmer

Die innere Oberfläche der Außenwände wurde größtenteils als angenehm eingestuft. Nur in einer Wohnung im Betonhaus und erstaunlicherweise einer im Holzhaus erschienen die Wände trotz der sommerlichen Außentemperaturen als etwas zu kalt (Abbildung 84). Möglicherweise war dabei die Himmelsrichtung von Bedeutung, da es sich dabei um eine Nordwohnung handelt.

- Wie empfinden Sie die Oberflächentemperatur der Außenwand?

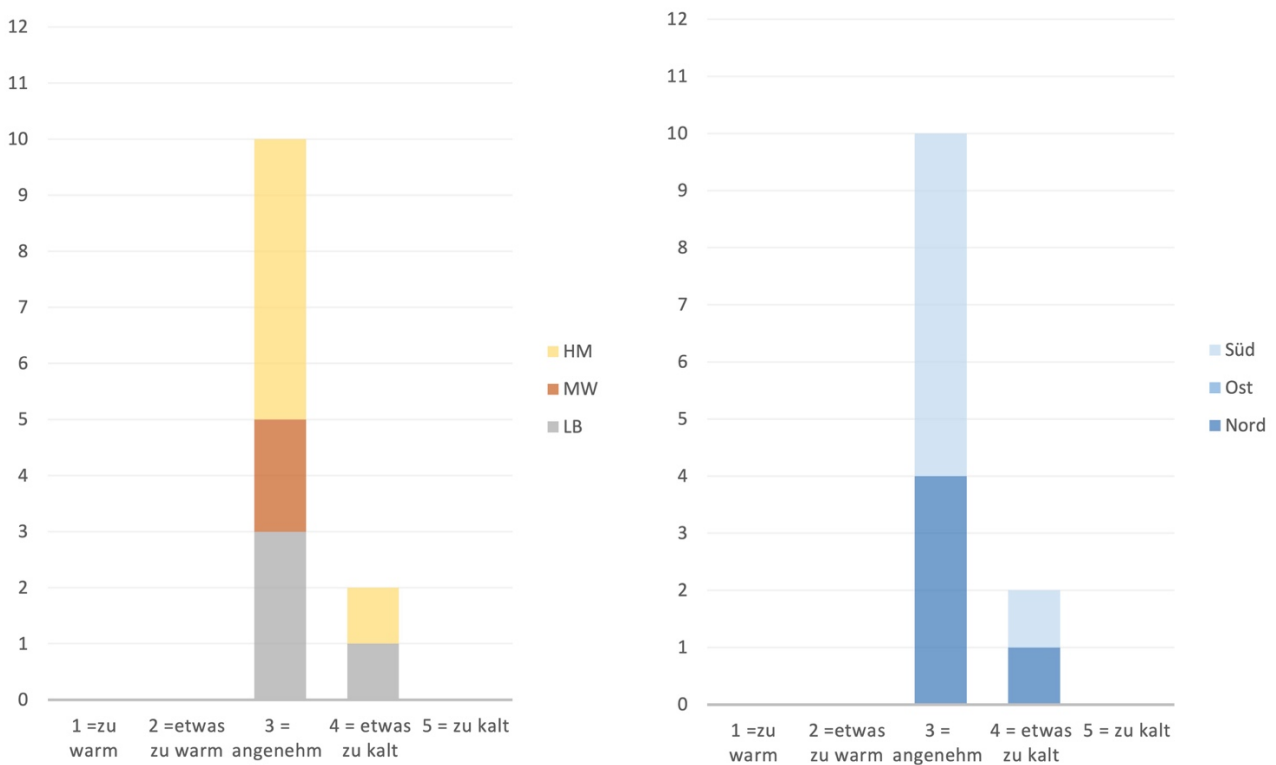


Abbildung 84: Oberflächentemperatur der Außenwand im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Die Geschossdecke besteht in allen drei Häusern aus 30 cm dickem Stahlbeton und ist teilweise mit Sisalteppich, teilweise mit Linoleumboden bekleidet. Zusätzlich wurden manche Wohnungen individuell mit Teppichen oder Vorlegern bestückt. Einheitlich ist die durchweg als angenehm benannte Temperatur des Bodens (Abbildung 85).

- Wie empfinden Sie die Temperatur des Fußbodens?

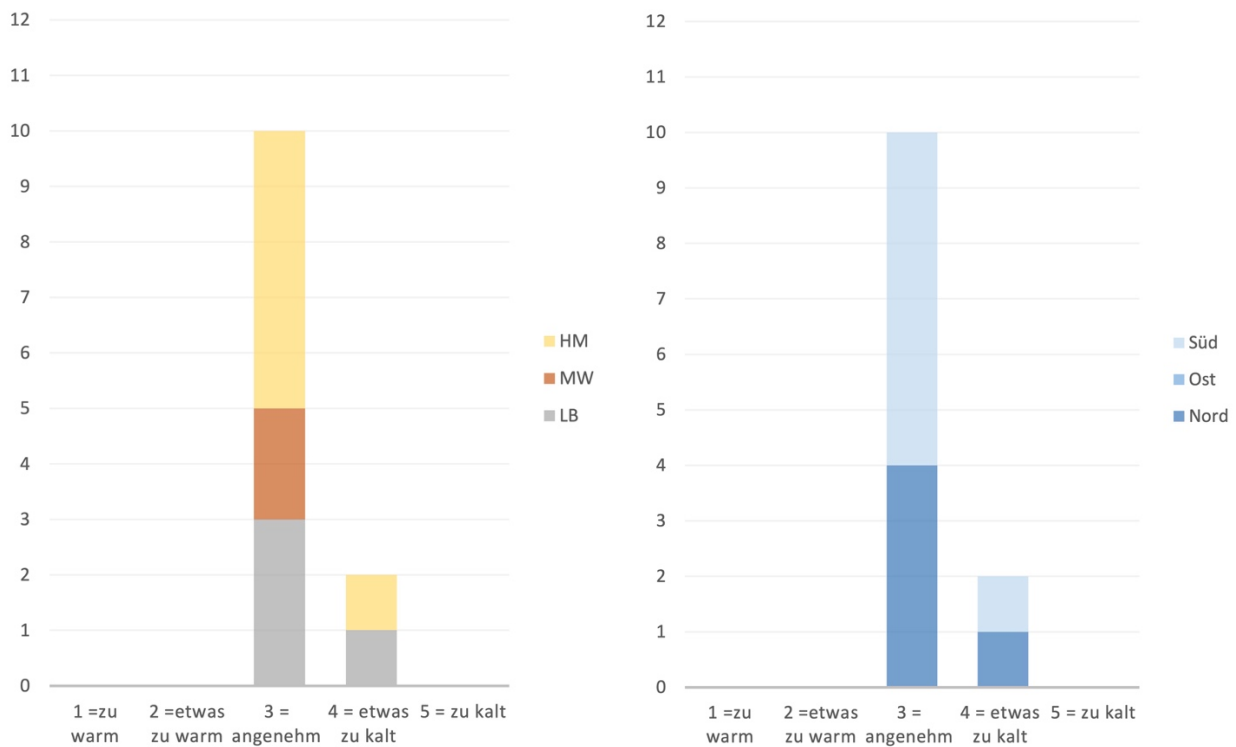


Abbildung 85: Temperatur des Fußbodens im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Fast in allen Wohnungen wurden Maßnahmen ergriffen, um den Lichteinfall zu steuern (Abbildung 86). Die meisten Mieter wählten Vorhänge, die innenseitig an Vorhangstangen angebracht wurden. Das hat zudem gestalterische Zwecke und schützt die Privatsphäre. In drei Wohnungen wurden Jalousien in den Fensterrahmen eingepasst. Dies war laut Aussage vor allem bei den nicht-orthogonalen Fenstern (Mauerwerks- und Betonhaus) nicht zufriedenstellend, da das Textil die Glasfläche im Segment- oder Rundbogen nicht gänzlich abdecken konnte. In zwei Haushalten schützten Folien vor den Fenstern vor ungewollten Einblicken. Eine Person hing ganz pragmatisch ein Laken vor das Fenster. Es fällt auf, dass die gewählten Verschattungselemente innenliegend sind und damit der Effekt, den Wärmeeintrag zu verhindern, dadurch stark reduziert ist. Allerdings wäre die Selbst-Montage von außenliegender Verschattung auch schwierig herstellbar. In einigen Fällen wurden schwere Verdunkelungsvorhänge verwendet, die die Sonneneinstrahlung zumindest direkt hinter dem Glas abfangen.

- Was haben Sie getan, um den Lichteinfall in Ihrer Wohnung zu regulieren?

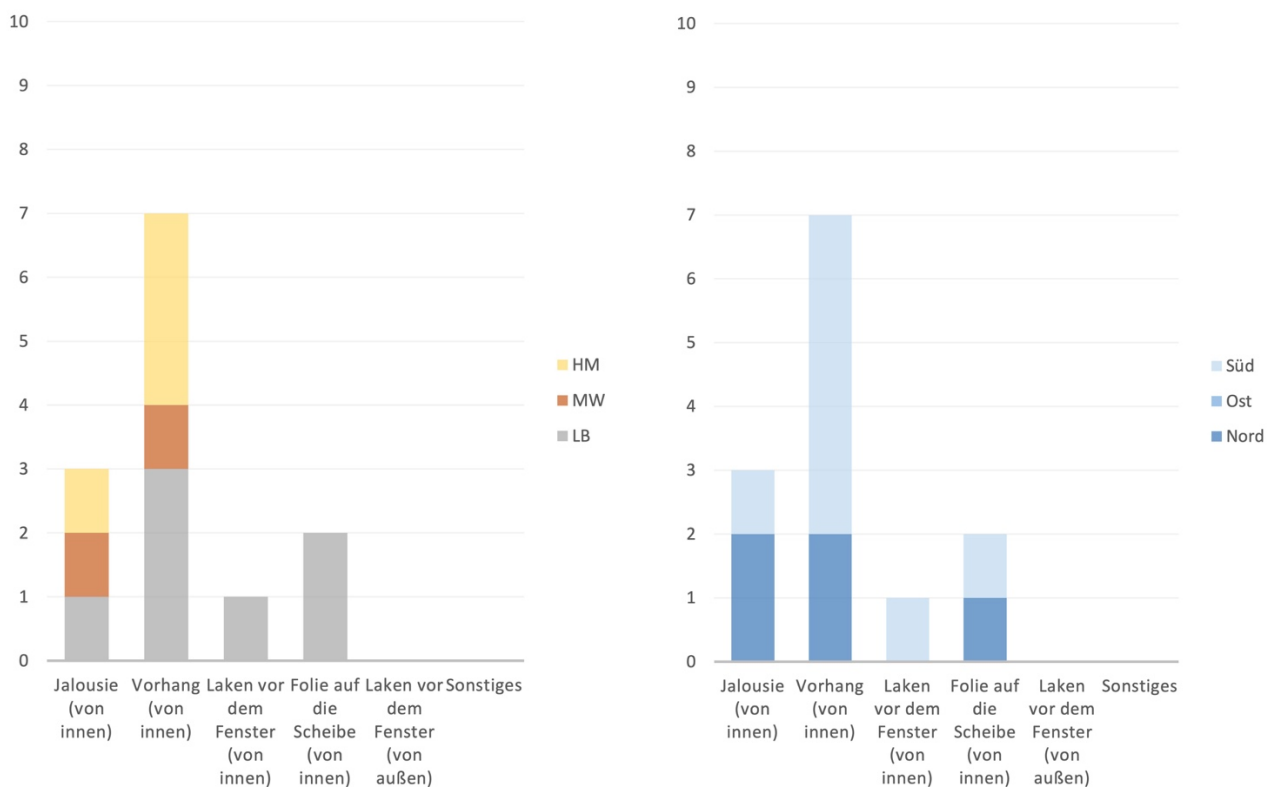


Abbildung 86: Regulierung des Lichteinfalls; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Die befragten Personen passten sich durch ihr Verhalten der warmen Jahreszeit an, beispielsweise durch leichte Kleidung, barfuß laufen und den Genuss von kalten Getränken (Abbildung 87). Auch kalte Duschen schienen beliebt zu sein. Für die Regulierung der Innenraumtemperatur war das Lüftungsverhalten relevant: Die Mehrzahl gab an, abends oder nachts zu lüften und damit den Effekt der Abkühlung durch kältere Außenluft zu nutzen. Ein kleiner Teil der Befragten unterstützte die Fensterlüftung mit Ventilatoren.

- Was tun Sie üblicherweise an heißen Tagen, um sich in Ihrer Wohnung wohlfühlen?

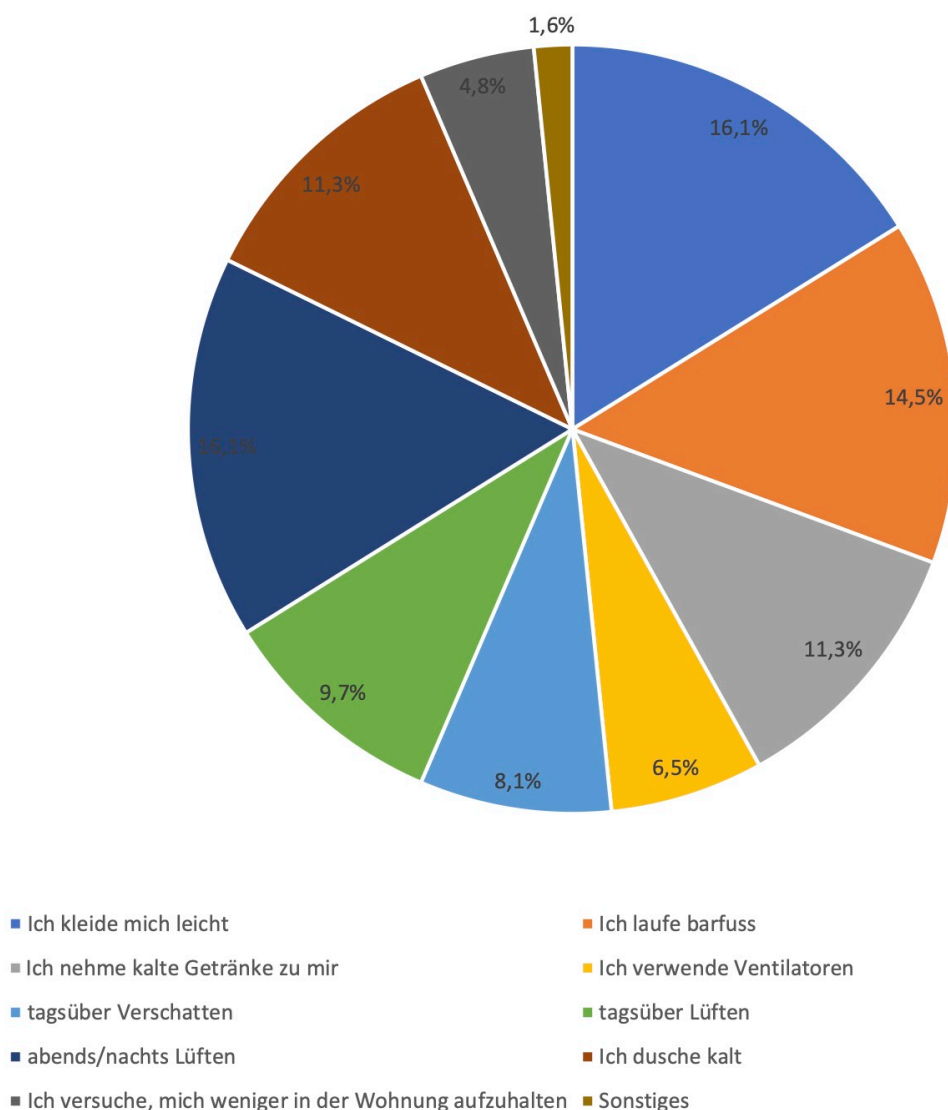


Abbildung 87: Maßnahmen in der Sommerzeit

Ob das Verhalten der Bewohner tatsächlich zu moderaten Temperaturen in den Wohnungen beigetragen hat und deshalb die Einschätzung der Sommerzeit positiv ausfiel (Abbildung 88), kann nicht abschließend geklärt werden. Zumindest gaben nur wenige an, sich aufgrund der heißen Temperaturen weniger in der Wohnung aufzuhalten. Und manche verzichteten fast völlig auf regulierende Maßnahmen wie Vorhänge oder Ventilatoren, was auf eine gewisse Robustheit der Konstruktion schließen lässt.

- Alles in allem, wie zufrieden bzw. unzufrieden sind Sie in der warmen Jahreszeit mit der Temperatur in Ihrer Wohnung?

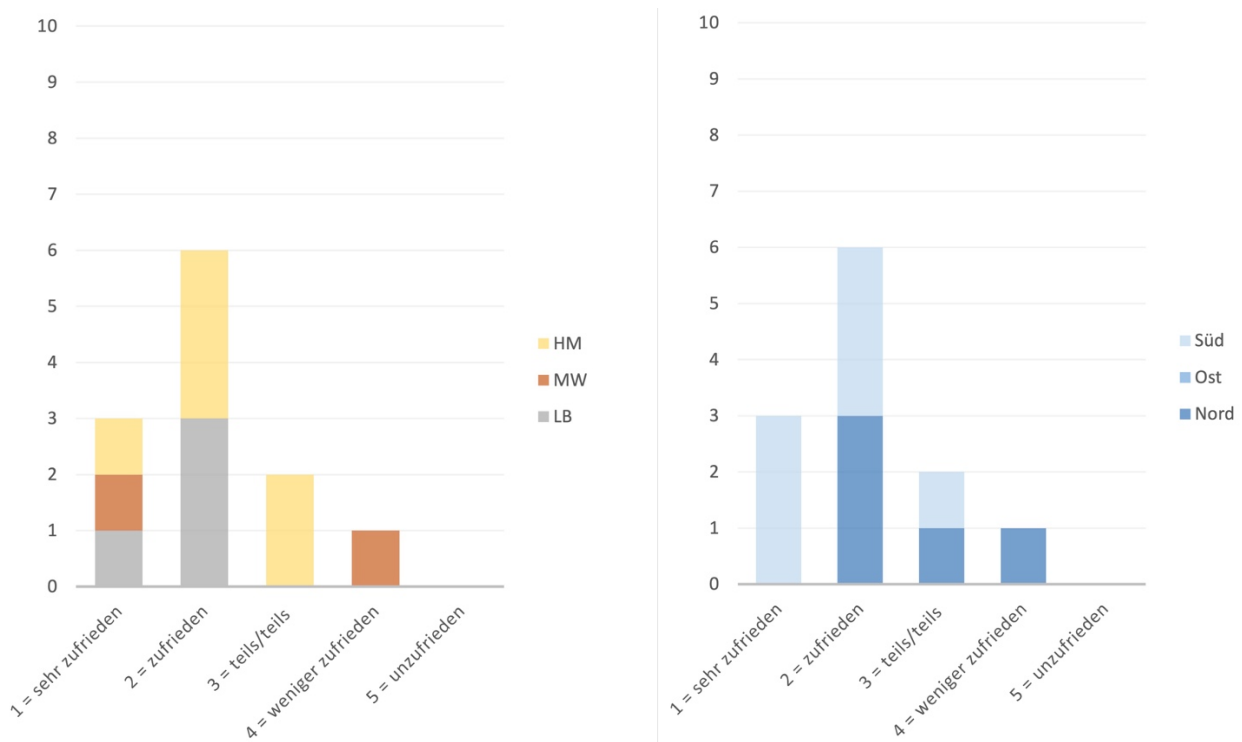


Abbildung 88: Zufriedenheit in der Sommerzeit; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

- Haben sich ihre Erwartungen an die Wohnung bestätigt?

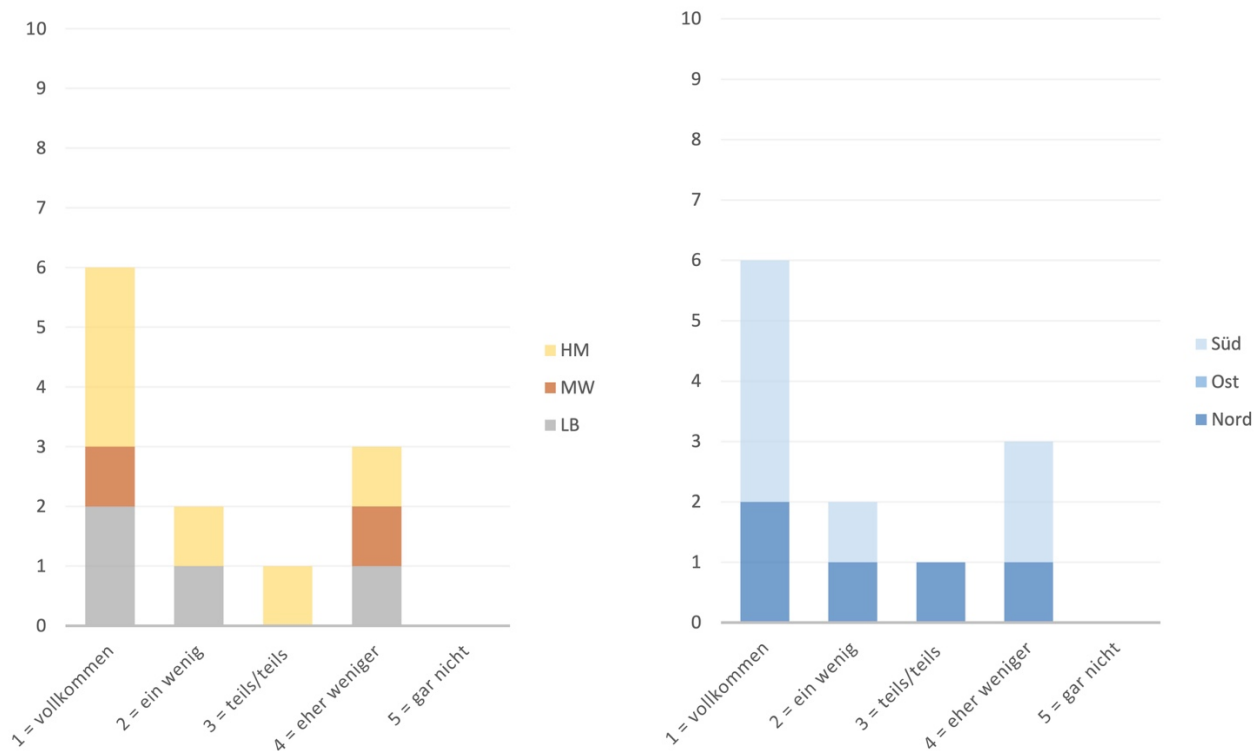


Abbildung 89: Erwartungen an die Wohnung im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Insgesamt war die Mehrheit der Befragten in der warmen Jahreszeit „zufrieden“ oder „sehr zufrieden“ mit der Temperatur in ihrer Wohnung (Abbildung 89). Das Betonhaus schnitt im Sommerfall gut ab, während es im Holzhaus und Mauerwerkshaus zu Kritik kam. Auffallend ist, dass eher die Nordwohnungen schlechter bewertet wurden. Hier ist anzumerken, dass diese Wohnungen vor allem Fenster in Richtung Osten und Westen besitzen. Zudem verfügen die nördlichen Wohnungen im Gegensatz zu den südlichen Wohnungen nicht über eine Loggia, die zum einen die Fassade verschattet und zum anderen einen angenehmen Aufenthaltsort bietet.

- Würden Sie wieder die Entscheidung treffen, in diese Wohnung zu ziehen?

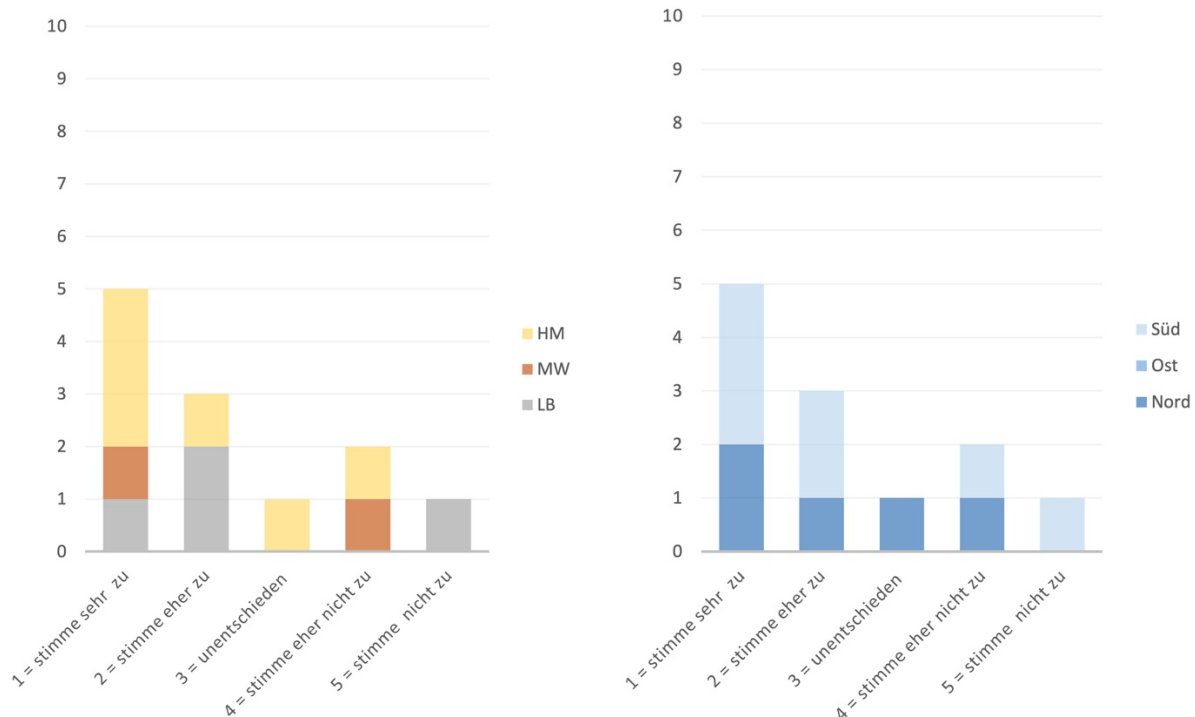


Abbildung 90: Entscheidung, wieder in diese Wohnung zu ziehen; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Im Vergleich zur Abfrage nach dem Winter hat sich die Stimmung in zwei Lager geteilt (Abbildung 90). Bei der Frage nach den Erwartungen an die Wohnung wurden bewusst keine Kriterien genannt, da diese sehr vielfältig sind und sehr von persönlichen Neigungen abhängen (z.B. der Möblierbarkeit, ob ein Fernsehanschluss vorhanden ist, Lärm durch die Nachbarn, aber auch das Innenraumklima). Die Frage zielt also bewusst auf das Bauchgefühl, ob ganz allgemein die Wohnung die persönlichen Wünsche erfüllt. Die Hälfte der Mieter sah ihre Erwartungen vollkommen bestätigt. Das ist ein Haushalt mehr als in der ersten Abfrage. Die anderen beantworteten die Frage allerdings negativer, drei der befragten Personen sahen ihre Erwartungen eher weniger bestätigt. Im Winter war das nur eine Person. Anscheinend fühlte sich die eine Gruppe, nach längerer Wohnzeit oder Neueinzug, sichtlich wohl mit dem Konzept Einfach Bauen und würde daher auch wieder die Entscheidung treffen, dort einzuziehen. Die andere Gruppe stand den Forschungshäusern eher neutral oder negativ gegenüber und würde ein anderes Wohnkonzept vorziehen, was möglicherweise ein Grund für die große Fluktuation der Mieter ist.

Fazit

Holzkonstruktionen neigen durch die im Vergleich zum Massivbau leichtere Bauweise eher zur Überhitzung im Sommerfall. Durch baukonstruktive Maßnahmen wie das Einbringen von Speichermasse durch Betondecken und angemessen große Fenster konnte dieser Effekt auf ein gutes Maß reduziert werden (siehe Kapitel 4). Entsprechend wurde die Temperatur im Holzhaus als etwas wärmer empfunden als in den Massivhäusern, lag aber dennoch im Komfortbereich. Das im Winter tendenziell als zu kühl bewertete Leichtbetonhaus schnitt dafür in der Sommerbewertung gut ab.

Die Umgebung hat durch die Verschattung durch Bäume oder benachbarte Gebäude einen merklichen Einfluss auf das Wohlbefinden. Dies ergibt der Abgleich der Umfrageergebnisse mit den Planunterlagen und den örtlichen Bedingungen. Dies sollte bei der Planung bedacht werden. Das Konzept ohne außenliegenden Sonnenschutz funktioniert im Prinzip gut, wenn man den Temperaturdurchschnitt und die allgemeine Nutzerzufriedenheit betrachtet. Ein manuell bedienbarer, außenliegender Sonnenschutz würde den Nutzerkomfort erhöhen, wäre aber für das Funktionieren der Häuser nicht notwendig.

6. Anpassung des Leitfadens

Im Rahmen von Einfach Bauen 2 wurde ein Leitfaden zusammengestellt, der Interessierten einen leichten Zugang zur Strategie Einfach Bauen vermittelt. Die Aussagen des Leitfadens wurde mit den Erfahrungen des Monitorings und der Befragung abgeglichen und noch entsprechend Passagen editiert oder ergänzt. Im Anhang 2 findet sich die entsprechende Überarbeitung, die Änderungen durch eine Markierung in Grün leicht nachvollziehbar.

7. Fazit

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Kapiteln 3, 4 und 5 zusammengefasst dargestellt.

7.1. Bauteilmonitoring (Fazit aus Kapitel 3)

Forschungsfrage

Wie entwickelt sich der Feuchteverlauf in den Außenwänden der drei Gebäude auf der West- und Nordseite. Trocknet die anfängliche Baufeuchte in den Wänden über den Beobachtungszeitraum aus? Besteht eine Gefahr der Schimmelpilzbildung für die Massivholzwand? Außerdem sollte überprüft werden, welche Wärmestromwerte vor Ort (in situ) gemessen wurden. Inwieweit unterscheiden sich diese von den Vorgaben der Hersteller?

Ergebnis

Es konnte bei allen drei Gebäudevarianten ein abnehmendes Feuchteverhalten und somit eine Austrocknung der Wände festgestellt werden. Die Holzfeuchte lag im Untersuchungszeitraum über den Bauteilquerschnitt zwischen 5 M.-% und 13 M.-%. Somit wurde die Anforderung der DIN 68800-1 erfüllt. Nach DIN 68800-1 [Norm DIN 68800-1:2019-06] besteht die Gefahr der Schimmelpilzbildung, wenn die Holzfeuchte 20 M.-% übersteigt.

Die vor Ort gemessenen Wärmestromwerte unterschieden sich von den Herstellerangaben. Dies ist einerseits, darauf zurückzuführen, dass die Herstellerangaben auf Laborwerten mit festen Umgebungsbedingungen beruhen. Dennoch besteht hier noch genauer Forschungsbedarf.

7.2. Raumkomfort und Energie (Fazit aus Kapitel 4)

Forschungsfrage 1

Können vergleichende Aussagen zu den drei Forschungshäusern bezüglich Konstruktion, thermischer Komfort und Energieverbrauch getroffen werden? Wenn ja, welche Gebäudekonstruktion schneidet am besten ab und warum?

Ergebnis

Bezugnehmend auf die in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse, lassen sich folgende Merksätze als Fazit ziehen:

- Der positive Effekt der thermischen Masse auf Raumkomfort ist im Leichtbetonhaus am größten.
- Die Baumverschattung an der Ost-Fassade des Leichtbetonhauses hat einen großen Einfluss auf das Raumklima und die Beleuchtungsstärke im Sommer und den Übergangsjahreszeiten.
- Das Massivholzhaus benötigt als einzige Konstruktion außenliegenden Sonnenschutz an den Fenstern der West-Fassade, wenn man Überhitzungsstunden im Sommer ausschließen möchte.
- Das Mauerwerkshaus schneidet bei den leerstehenden Wohnungen bezüglich der Raumlufftfeuchte am besten ab.

Forschungsfrage 2

War die Annahme eines idealen Nutzers sinnvoll, um vergleichende Aussagen zu thermischem Komfort und Energieverbrauch zu erhalten?

Ergebnis

Die Annahme eines idealen Nutzers war sinnvoll, wie die Ergebnisse in Kapitel 4 zu Raumkomfort und Energie zeigen. Die Kombination dreier natürlicher Lüftungsprofile - bestehend aus dem hygienischen Luftwechsel unterhalb einer operativen Temperatur von 24 °C, einer Fensterstoßlüftung von 15 min je morgens und abends, sowie einer Wärmeablüftung ab Außenlufttemperaturen über 5 °C und einer operativen Temperatur von 24 °C im Raum – führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Mit der Anpassung der Küchenlüftung konnte die Feuchtere regulierung realistisch abgebildet werden.

Forschungsfrage 3

Spiegeln sich die Simulationsergebnisse bezüglich Raumluffttemperatur, Lüftungsverhalten, Heizwärmebedarf und Überhitzungsstunden in der tatsächlichen Nutzung wieder? Besteht ein Performance Gap?

Ergebnis

Für den Großteil der gemessenen und simulierten Räume trifft die Aussage zu.

Die gemessenen Energieverbräuche liegen unter den berechneten Werte nach ENEV (Abbildung 91).

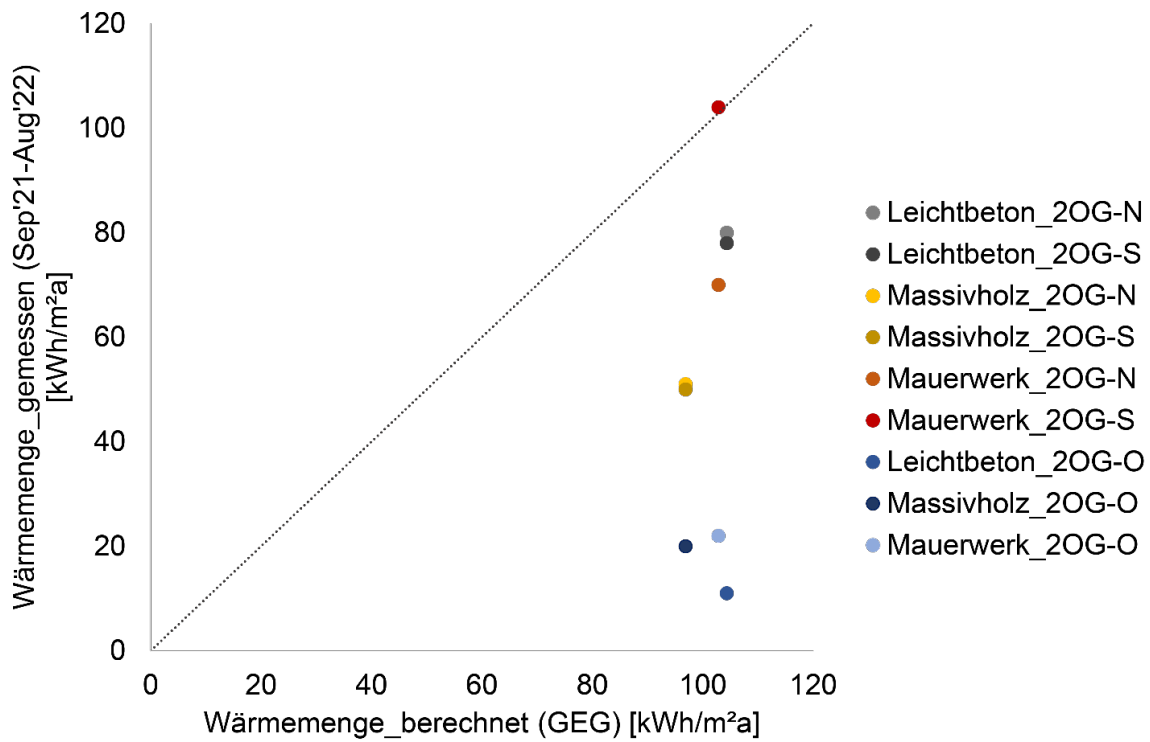


Abbildung 91: Grafische Gegenüberstellung von Energiebedarf (Berechnung nach GEG) und Energieverbrauch (Messung) nach Gebäuden und Wohneinheiten

Nutzerbedingte Abweichungen, wie z.B. der hohe Heizenergiebedarf in der Mauerwerks-Süd-Wohnung, können klar als extremen Nutzereinfluss definiert werden (Abbildung 92).

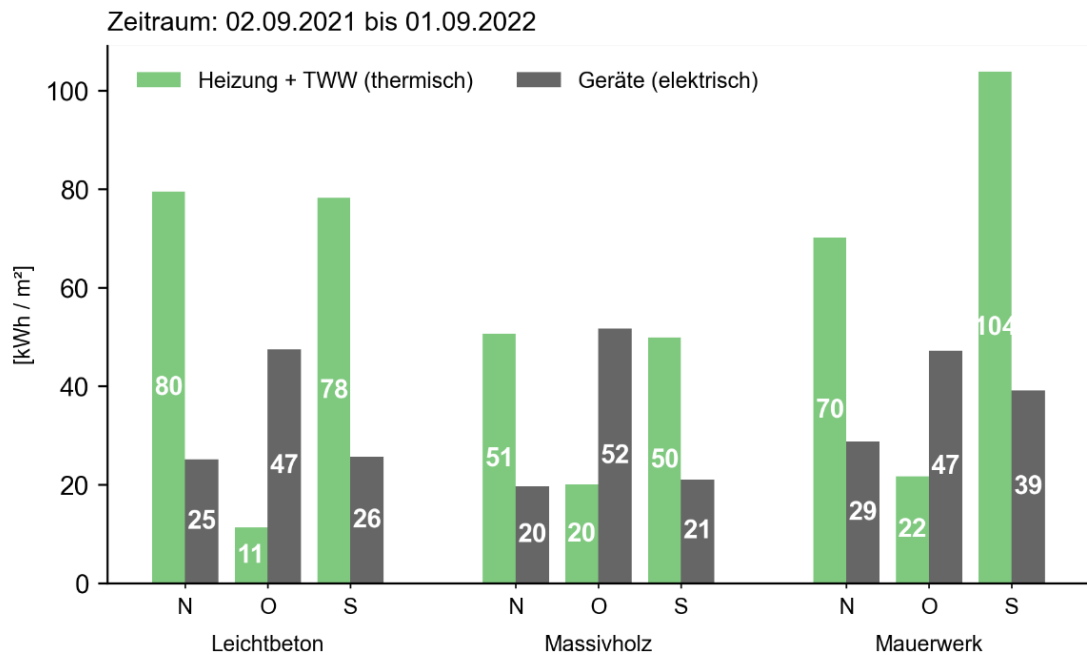


Abbildung 92: Gemessener Energieverbrauch der Forschungshäuser im Messjahr 2021/22

Forschungsfrage 4

Treten die Annahmen aus der Simulation auch in der tatsächlichen Nutzung ein? Wenn nicht – wie müsste das Konzept angepasst werden?

Ergebnis

Die Annahmen ergeben grundsätzlich eine gute Näherung der Realität. Ein wichtiger Einflussfaktor, der zukünftig in der Modellierung berücksichtigt werden sollte, ist die Umgebungsverschattung durch Bäume und Nachbarbauten. Im Validierungsprozess hat sich gezeigt, dass dieser Faktor in der Messung eine große Wirkung auf den thermischen und visuellen Komfort hat.

7.3. Nutzerbefragung (Fazit aus Kapitel 5)

Forschungsfrage

Fühlen sich die Bewohner der Häuser wohl, und entspricht ihr subjektives Komfortempfinden den gemessenen Werten? Mit welchen Maßnahmen versuchen Sie, Einfluss auf die Innenraumtemperatur zu nehmen? Welche Rückschlüsse lassen sich vom Nutzerverhalten auf die gemessenen Daten ziehen? Wie wirkt sich die Bauweise auf die Nutzerzufriedenheit aus?

Ergebnis

- Würden Sie wieder die Entscheidung treffen, in diese Wohnung zu ziehen?

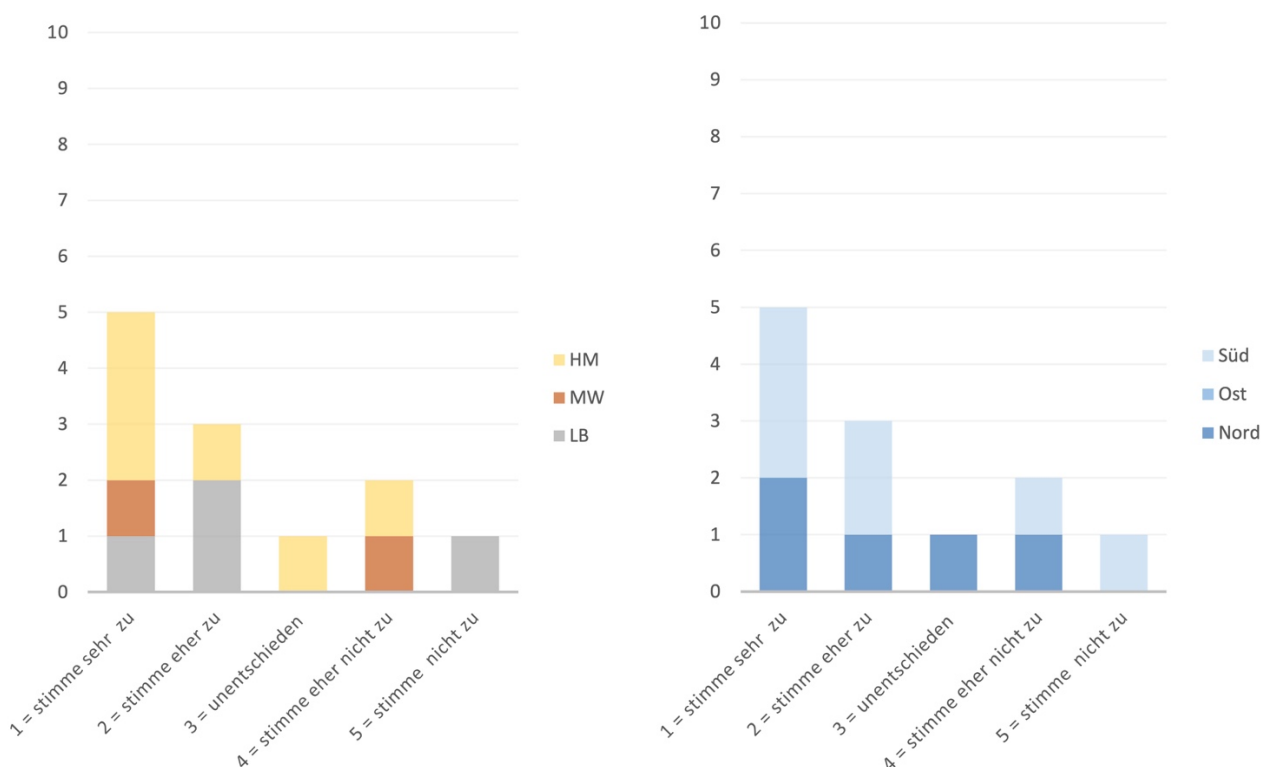


Abbildung 93: Entscheidung, wieder in diese Wohnung zu ziehen; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung

Holzkonstruktionen neigen durch die im Vergleich zum Massivbau leichtere Bauweise eher zur Überhitzung im Sommerfall. Durch baukonstruktive Maßnahmen wie das Einbringen von Speichermasse durch Betondecken und angemessen große Fenster konnte dieser Effekt auf ein gutes Maß reduziert werden (siehe Kapitel 4). Entsprechend wurde die Temperatur im Holzhaus als etwas wärmer empfunden als in den Massivhäusern,

lag aber dennoch im Komfortbereich. Das im Winter tendenziell als zu kühl bewertete Leichtbetonhaus schnitt dafür in der Sommerbewertung gut ab.

Die Umgebung hat durch die Verschattung durch Bäume oder benachbarte Gebäude einen merklichen Einfluss auf das Wohlbefinden. Dies ergibt der Abgleich der Umfrageergebnisse mit den Planunterlagen und den örtlichen Bedingungen. Dies sollte bei der Planung bedacht werden. Das Konzept ohne außenliegenden Sonnenschutz funktioniert im Prinzip gut, wenn man den Temperaturdurchschnitt und die allgemeine Nutzerzufriedenheit betrachtet. Ein manuell bedienbarer, außenliegender Sonnenschutz würde den Nutzerkomfort erhöhen, wäre aber für das Funktionieren der Häuser nicht notwendig.

7.4. Folgeprojekte (Weiterentwicklung Einfach Bauen)

Das Forschungsvorhaben hatte das übergeordnete Ziel, die Frage zu beantworten, ob unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte eine einfache Bauweise realisiert werden kann.

Als Kosten für die Forschungshäuser wurden durch die Bauherrin, die B&O Gruppe folgende Werte übermittelt [Nagler 2022]:

Gebäude	Kosten Gebäude + Technik	BGF	Kennwert €/BGF
Mauerwerk	968.000 € ohne MwSt.	648 m ²	1.493 €
Holz	1.121.000 € ohne MwSt.	648 m ²	1.730 €
Leichtbeton	1.321.000 € ohne MwSt.	648 m ²	2.039 €

Für die Wertung der Kostenwerte verweisen wir auf das Kapitel 5.4 von Einfach Bauen 2 [Jarmer et al. 2021] und möchten an dieser Stelle Nachfolgeprojekte zeigen und anhand dieser weiteren Anwendungsbeispiele die Strategie Einfach Bauen darstellen.

7.4.1. Wohnen in Bad Aibling



Abbildung 94: Außenansicht. Wohnen in Bad Aibling, Foto: Sebastian Schels

Die Wohnungsgenossenschaft Wogeno aus München hat in Bad Aibling ein Grundstück erworben und durch die B&O ein Wohngebäude mit 20 Wohnungen erstellen lassen. Das Projekt wurde durch Florian Nagler Architekten geplant. Ausschreibung und Bauleitung wurden durch die B&O geleistet. Dabei wurde die gleiche Vollholz Wandkonstruktion wie bei dem Holzgebäude der Forschungshäuser eingesetzt. Die Wandstärke wurde hier 22 cm stark gewählt. Die Gesamtdicke der Wand konnte dadurch auf nur 26 cm (statt 39 cm bei den Forschungshäusern) reduziert werden. Dadurch konnten auf das Gebäude bezogen ca. 55 m² zusätzliche Wohnfläche gewonnen werden, was ca. einer 2,5-Raum-Wohnung entspricht. Auch auf diesem Weg kann man die Umweltwirkung eines Gebäudes reduzieren.

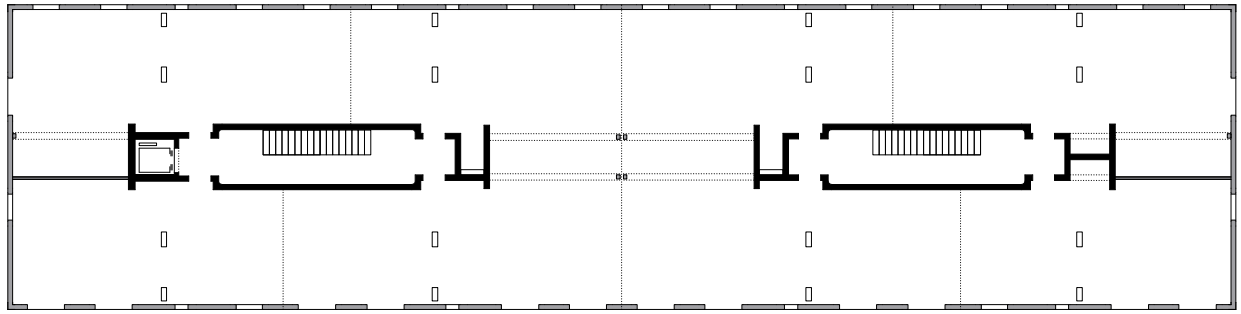


Abbildung 95: Gebäudestruktur Außenwand und Kerne, (Florian Nagler Architekten)

Die Decken wurden in Holz realisiert. Die thermische Speichermasse wurde durch ein Treppenhaus aus Stahlbeton geschaffen. Durch diese Maßnahmen konnte der Einsatz von Beton weiter reduziert und die Umweltwirkung durch den Bau gegenüber den Forschungshäusern weiter gesenkt werden.

Alle Wohnungen verfügen über einen Balkon, welcher auch gleichzeitig einen Sonnenschutz bildet. Die übrigen Fenster können durch von Hand bedienbare Klappläden verschattet werden.

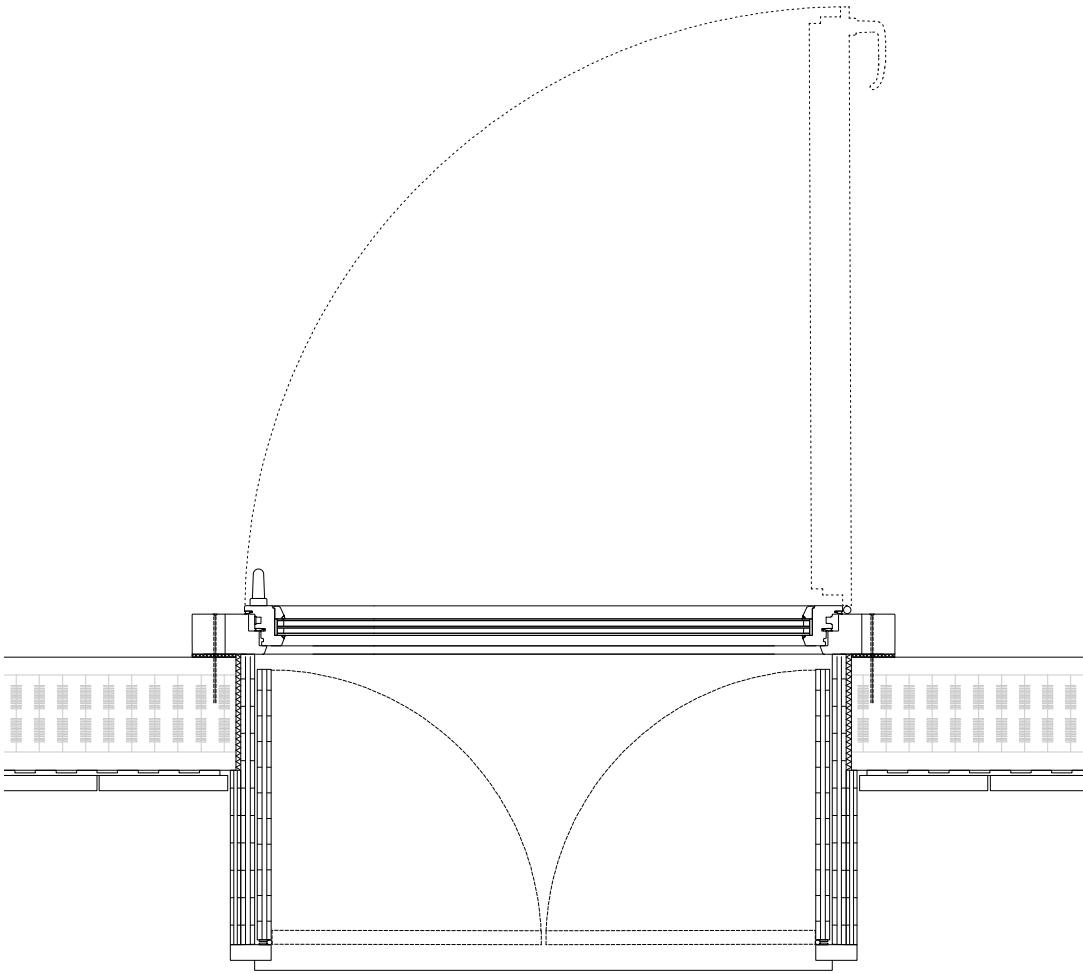


Abbildung 96: Fensterladen Detail, (Florian Nagler Architekten)

Die Bäder liegen diesmal an der Fassade und werden über ein Fenster belichtet und belüftet. Der Einbau einer Abluftanlage wurde diskutiert. Die Baugenossenschaft hat sich aber bewusst dagegen entschieden. Das Abführen der in der Nutzung entstehenden Feuchte über regelmäßiges Fensterlüften wird durch die Bewohner verantwortet.

7.4.2. Forschungshäuser Garching



Abbildung 97: Modellfoto der Forschungshäuser Garching, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH

In Garching plant das Studentenwerk München drei Studierendenwohnheime mit insgesamt 200 Wohnplätzen. Die 4-geschossigen Gebäude in der Gebäudeklasse 4 stellen eine zusätzliche Herausforderung bezüglich Statik und Brandschutz dar. Die Entwurfsplanung ist abgeschlossen. Im Moment läuft ein B-Plan-Verfahren. Als Teil eines baubegleitenden Forschungsprojekts des Studentenwerks München, das durch die Deutsche Bundesumweltstiftung (DBU) gefördert wird, wurden weitere Untersuchungen zur Optimierung von Konstruktion und Vorfertigung durchgeführt.

Einfaches Bauen soll bei diesem Projekt mit dem Ziel eines Nullenergiegebäudes verbunden werden. Durch Photovoltaik auf dem Dach und eine möglichst klimafreundliche Wärmeenergie soll der Verbrauch des Gebäudes über die Jahresbilanz kompensiert werden.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung soll es den Bewohnern ermöglicht werden, die eigenen Energieverbräuche zum Beispiel über eine App einzusehen und mit dem Verbrauchsdurchschnitt aller 200 Studierenden zu vergleichen. Dabei soll untersucht werden, ob sich dadurch der Strom- oder Heizenergieverbrauch verändert.

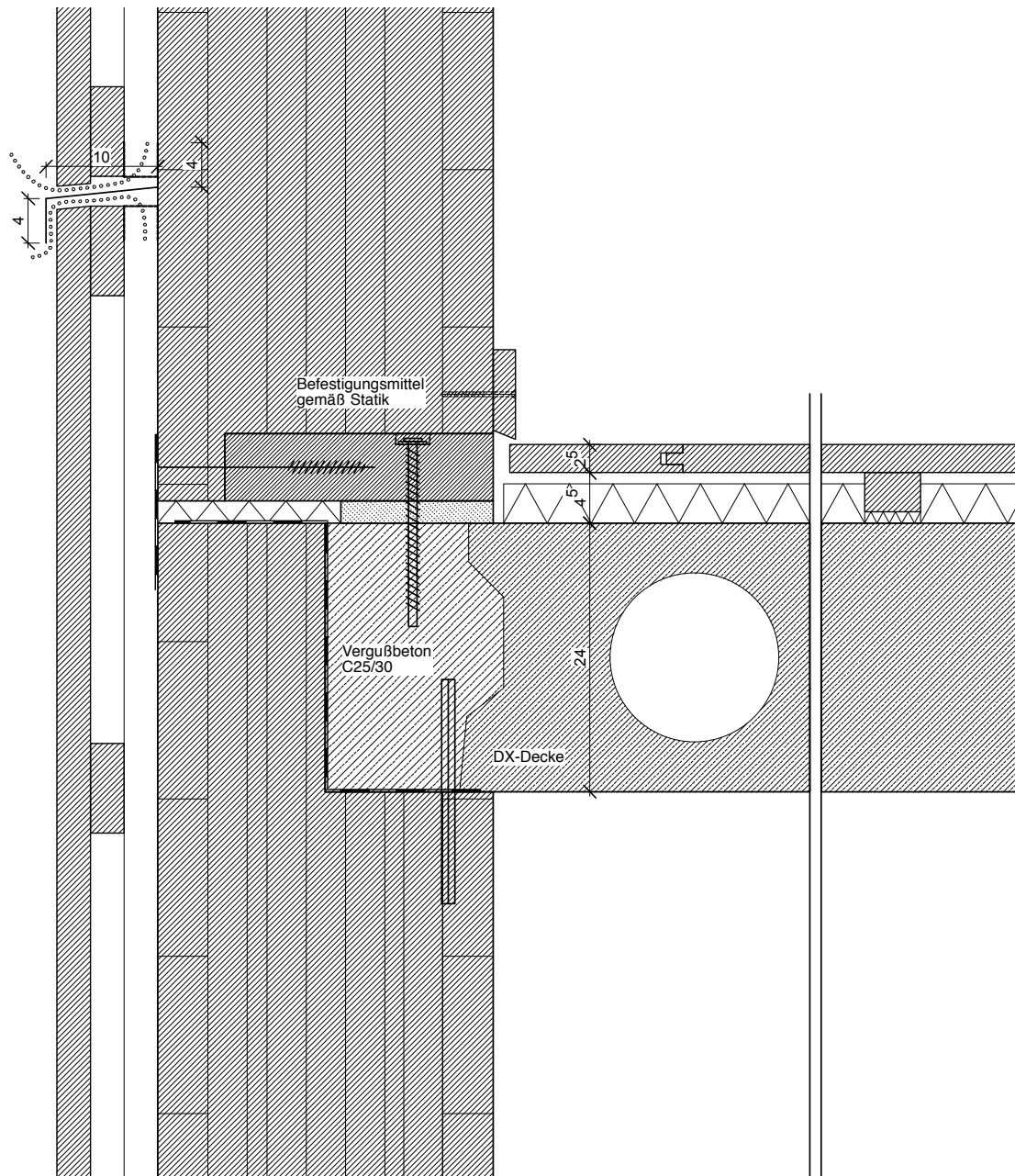


Abbildung 98: Deckenauflagerpunkt. Betonfertigteildecke, Dielenboden und Trennblech in der Holzfassade, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH

Abbildung 104 zeigt, wie der Bauprozess und die Umweltwirkung durch den Einsatz einer Betonfertigteildecke gegenüber den Forschungshäusern in Bad Aibling noch einmal optimiert wurden. Die Dicke der Stahlbetondecke beträgt 24 cm – statt 30 cm wie in Bad Aibling. Den Bodenbelag bilden Holzdielen auf Lagerhölzern. Auf diese Weise kann der Trittschall verbessert werden. Im Hohlraum unter den Dielen können Leitungen der Haustechnik revisionierbar verlegt werden. Heizkörper und Mediendosen können auf diesem Weg bis unter die Fenster geführt werden.

7.4.3. Forschungshäuser 2 Bad Aibling

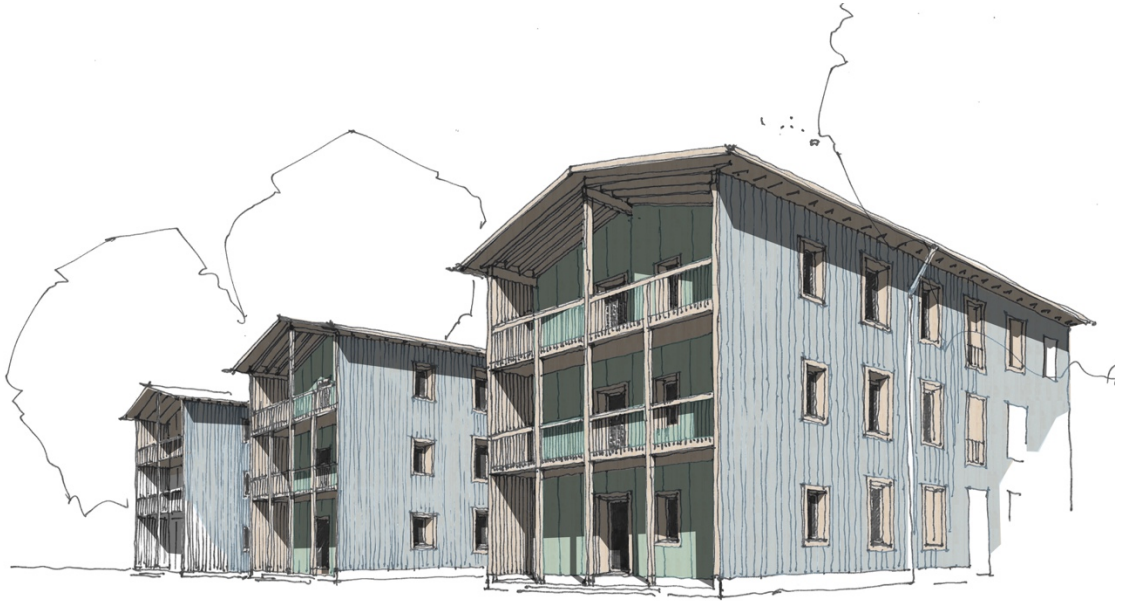


Abbildung 99: Forschungshäuser 2, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH

In direkter Nachbarschaft zu den ersten Forschungshäusern in Bad Aibling beginnt zur Zeit der Bau von drei weiteren Gebäuden. Ziel ist es zusätzlich zur Strategie Einfach Bauen, die Umweltwirkung durch Bauwerk und Gebäudetechnik so klein als möglich zu halten. Dazu werden verschiedene Holzkonstruktionen in Außenwänden und Decken mit tragenden Innenwänden aus Lehmstein, Stampflehm und Recyclingziegeln kombiniert, um genug thermische Speichermasse im Gebäude zu haben. Auf den Einsatz von Beton wird verzichtet, wo es möglich und sinnvoll ist.

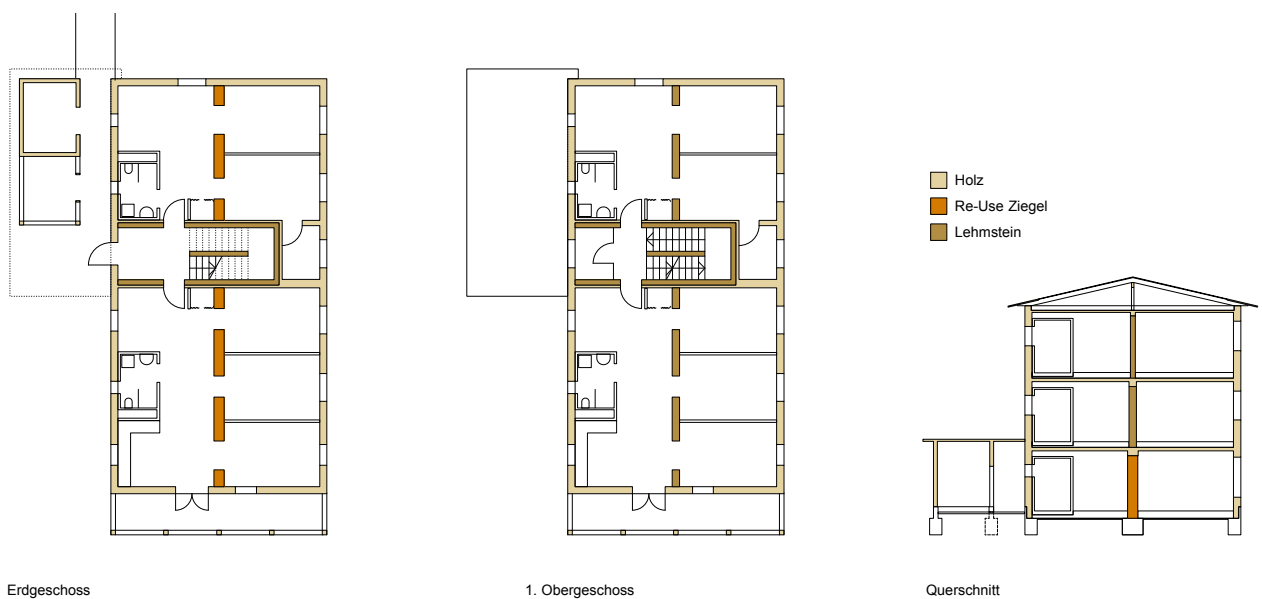


Abbildung 100: Verwendete Materialien von Haus 1, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH

Literaturverzeichnis

ASHRAE (2014). Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. ASHRAE Guideline 14-2014. Atlanta.

ARS Starkholzplatten GmbH (2020) CE Leistungserklärungen.

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

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

Desogus, G., Mura, S. & Ricciu, R. (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.

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

Ficht, R. (2022). Entwicklung probabilistischer Modelle zur Abbildung unsicherer Randbedingungen in der Gebäudesimulation. Masterarbeit. TUM School of Engineering and Design. Technische Universität München.

Flexeder, N. (2022): Geometry data of a sensor envelope for the hygrometric method to determine material moisture content.

Flexeder, N., Ott, S., Bodemer, E., & Winter, S. (2021) Monitoring of an office building in uninsulated cross laminated timber construction regarding hygrothermal component behavior.

Florian Nagler Architekten (2022) Grundrisse 1:200 Leichtbetongebäude, 2. Obergeschoss Forschungshäuser Bad Aibling.

IB Scheerer (2019). Lüftungskonzepte der drei Forschungshäuser, Dietrich-Bonhoeffer-Str. 5a/b/c, 83043 Bad Aibling. Ingenieurbüro Scheerer-TGA. Bad Reichenhall. (Einzusehen in den Planungsunterlagen, Florian Nagler Architekten)

Jarmer, T., Niemann, A., Franke, L., Varga, Z., Diwald, F., Nagler, F. & Auer, T. (2021) Einfach Bauen 2 Planen, Bauen, Messen. Schlussbericht. Unter Mitarbeit von Roman Ficht, Arthur Coelho Debacco, Stephan Ott und Nina Flexeder. München.

Kargruber, J. (2022). Validierung des thermisch-dynamischen Simulationsmodells aus dem Forschungsprojekt Einfach Bauen 3 der TUM anhand von Messdaten. Masterarbeit. TUM School of Engineering and Design. Technische Universität München.

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.

Liu, F., Jia, B., Chen, B. & Geng, W. (2017) Moisture transfer in building envelope and influence on heat transfer. Hg. v. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017.

Mayer, H. (2013) Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung. 6., überarbeitete Auflage. München: Oldenbourg Verlag.

Meisl, M. (2022) Vermietung der Forschungshäuser.

Nagler, F., Jarmer T., Niemann, A., Cruel, A., Auer, T., Franke, L., Kaufmann, H., Winter, S. Ott, S., Krechel, M., Gehlen, C. & Thiel, C. (2019) *Einfach Bauen. Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen - Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Nagler, F. (2022) *Einfach Bauen. Ein Leitfaden*. Basel: Birkhäuser.

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

Norm DIN 68800-1:2019-06, Juni 2019: Holzschutz.

Norm DIN EN ISO 10456, Mai 2010: Baustoffe und Bauprodukte –.

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.

Norm DIN EN 12664, Mai 2001: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Geräte.

Norm DIN EN 16798-1/NA:2021-06. 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.

Norm DIN EN 16798-1:2021-B2.2. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Adaptives Komfortband für den Entwurf von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlagen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.

Norm ISO 8302, 01.08.1991: Thermal insulation.

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

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

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

Österreichisches Institut für Bautechnik (2018): Europäisch Technische Bewertung ETA-13/0643. Starkholzelemente ARS Starkholzplatten GmbH.

Raab-Steiner, E. & Benesch, M. (2015) *Der Fragebogen. Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung*. 4., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Wien: Facultas.

Ruiz, R. und Bandera, F. (2017). Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies*, 10, 1587. <https://doi.org/10.3390/en10101587>

Schlaich, M. & Hückler, A. (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.

Technische Universität München. 2021. Mieterinformation zum Ablauf des Forschungsprojektes der TUM. B&O Forschungshäuser Bad Aibling.

Ziegelsysteme Michael Kellerer GmbH & Co. KG: produktblatt_zmk_11_12. Kellerer
ZMK Ziegelsysteme.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fassadenschnitt Gebäude Leichtbeton:	7
Abbildung 2: Fassadenschnitt Gebäude Holz massiv:	8
Abbildung 3: Fassadenschnitt Gebäude Mauerwerk:	9
Abbildung 4: Messpunkte West- und Nordaußenwand, 2. OG Leichtbetongebäude (Florian Nagler Architekten)	12
Abbildung 5: Aufbau einer Multiringelektrode (links) und Anordnung der Multiringelektroden an der Innenseite, mittig sowie der Außenseite der Nord- und Westwand des Leichtbetongebäudes (rechts)	13
Abbildung 6: Vorhandene Messdaten für Temperatur, relative Luftfeuchte und Wärmestrom im Leichtbetongebäude, TinkerForge-Messtechnik sowie Außenlufttemperatur der Wetterstation	15
Abbildung 7: Vorhandene Messdaten für Temperatur, relative Luftfeuchte und Wärmestrom im Mauerwerksgebäude, TinkerForge-Messtechnik sowie Außenlufttemperatur der Wetterstation	15
Abbildung 8: Vorhandene Messdaten für Temperatur, relative Luftfeuchte und Wärmestrom im Massivholzgebäude, TinkerForge-Messtechnik sowie Außenlufttemperatur der Wetterstation	16
Abbildung 9: links: Messtechnik Westwand, mittig: Messtechnik Nordwand, rechts: Temperaturfühler Oberfläche außen Westwand Leichtbetongebäude	16
Abbildung 10: Aufbau Messtechnik Westseite Leichtbetongebäude	17
Abbildung 11: links: Messtechnik Westwand, mittig: Nordwand, rechts: Temperaturfühler Oberfläche außen Nordwand Mauerwerksgebäude	17
Abbildung 12: Aufbau Messtechnik Westseite Mauerwerksgebäude	18
Abbildung 13: Übersicht Querschnitt Mauerwerksaußenwand mit Messtechnik im Bauteil, Jessica Nagl	18
Abbildung 14: links: Messtechnik Westwand, mittig: Messtechnik Nordwand, rechts: Temperaturfühler Oberfläche außen Westwand Massivholzgebäude	18
Abbildung 15: Aufbau Messtechnik Westseite	19
Abbildung 16: Aufbau Messtechnik zur Feuchtemessung mittels elektrischem Widerstand der verschiedenen Messtiefen t , mittels GANN-Elektroden und Gewindestangen	19

Abbildung 17: Übersicht Querschnitt Massivholzaußenwand mit Messtechnik im Bauteil, Jessica Nagl	20
Abbildung 18: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Westwand, Leichtbetongebäude, Zsafia Varga	23
Abbildung 19: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Nordwand, Leichtbetongebäude, Zsafia Varga	24
Abbildung 20: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Nordwand, Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga	26
Abbildung 21: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Westwand, Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga	26
Abbildung 22: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Nordwand, Massivholzgebäude, Zsafia Varga	28
Abbildung 23: Temperaturunterschied Oberfläche T_s und Wärmestrom q Westwand, Massivholzgebäude, Zsafia Varga	28
Abbildung 24: Gemessene elektrische Widerstände in den drei Tiefenlagen der Westwand.....	31
Abbildung 25: Gemessene elektrische Widerstände in den drei Tiefenlagen der Nordwand	31
Abbildung 26: Ermittelte Feuchtegehalte in den drei Tiefenlagen der Westwand	31
Abbildung 27: Ermittelte Feuchtegehalte in den drei Tiefenlagen der Nordwand	32
Abbildung 28: Vergleichende Feuchte- und Temperaturmessungen in zwei Außenwänden des Massivholzgebäudes, jeweils in einer Tiefe von 100 mm, jeweils in der Luftkammer / nicht in der Luftkammer. Bei fehlenden oder ungenügend Daten sind die jeweiligen Zeitabschnitte ausgegraut dargestellt. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)	33
Abbildung 29: Feuchte und Temperaturmessungen in der Tiefe von 100 mm, in der Luftkammer/ nicht in der Luftkammer Westwand Massivholzgebäude. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder).....	34
Abbildung 30: Feuchte und Temperaturmessungen in der Tiefe von 100 mm, in der Luftkammer/ nicht in der Luftkammer Nordwand Massivholzgebäude. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder).....	34
Abbildung 31: Ergebnisse der Holzfeuchteschätzung mittels elektrischer Widerstandsmessung in der nach Westen orientierten Außenwand. Bei fehlenden oder	

ungenügend Daten sind die jeweiligen Zeitabschnitte ausgegraut dargestellt. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)	35
Abbildung 32: Ergebnisse der Holzfeuchteschätzung mittels elektrischer Widerstandsmessung in der nach Norden orientierten Außenwand. Bei fehlenden oder ungenügend Daten sind die jeweiligen Zeitabschnitte ausgegraut dargestellt. (Auswertung und Darstellung: Nina Flexeder)	36
Abbildung 33: relative Luftfeuchte (blau) und Lufttemperatur (rot) Westwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga	37
Abbildung 34: relative Luftfeuchte (blau) und Lufttemperatur (rot) Nordwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga	37
Abbildung 35: relative Luftfeuchte im Bauteil ohne Kammern (blau,) relative Luftfeuchte im Bauteil mit Kammern (grau) und Wärmestrom (rot) Westwand Massivholzgebäude, Zsafia Varga	39
Abbildung 36: relative Luftfeuchte im Bauteil ohne Kammern (orange), relative Luftfeuchte im Bauteil mit Kammern (gelb) und Wärmestrom (rot) Nordwand Massivholzgebäude, Zsafia Varga	40
Abbildung 37: relative Luftfeuchte (blau) und Wärmestrom (rot) Westwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga	41
Abbildung 38: relative Luftfeuchte (blau) und Wärmestrom (rot) Nordwand Mauerwerksgebäude, Zsafia Varga	41
Abbildung 39: Datentransfer intern und extern der Forschungshäuser.....	46
Abbildung 40: Dateninfrastruktur der Forschungshäuser in Bad Aibling.....	47
Abbildung 41: Sensorkennzeichnungssystem des Komfortmonitorings.....	48
Abbildung 42: Sensorplan nach SKS; Grundrissplan 2.OG Leichtbetonhaus (links: Norden)	48
Abbildung 43: Sensorplan nach Parametern; Grundrissplan 2.OG Leichtbetonhaus ..	49
Abbildung 44: Baukastensystem der Firma Tinkerforge GmbH für die Komfortmessung	50
Abbildung 45: Ursprüngliches Messkonzept mit Funk-Datenübertragung via Sensorknotenpunkten	51
Abbildung 46: Sensorknotenpunkte (Stacks); oben: Vorfertigung, links: Installation vor Ort.....	52

Abbildung 47: Tinkerforge GmbH Sensoren (v.l.n.r.): Fensterkontakt, CO2 (oben, im Bild links), Temperatur und Feuchte (oben, im Bild rechts), PT-Sensor an Heizkörper (unten), Wetterstation mit Pyranometer der Firma Ahlborn.....	53
Abbildung 48: Sensor-Installation im Holzhaus; 1-Zi-Ost-Wohnung (links): Sensor-Stativ mit Datentransfereinheit (PC, Monitor, Router); Süd-Wohnung (rechts): Fensterkontakt an Loggia-Türe mit Kabelkanal zum Knotenpunkt.....	53
Abbildung 49: Tinkerforge GmbH Stromwandler (rechts) im Sicherungskasten einer Wohneinheit im Leichtbetonhaus	54
Abbildung 50: links: dezentrale Wohnungsstation für TWW und Heizen der Firma Strasshofer; mitte/rechts: Wärmemengenzähler und Funkverstärker der WDV Molliné GmbH	55
Abbildung 51: Beispiel für Abweichungen der Temperatur- und Feuchtesensoren	56
Abbildung 52: Thermischer Komfort – 2. OG Wohnung Nord Schlafzimmer	58
Abbildung 53: Thermischer Komfort – 2. OG Wohnung Nord Wohnzimmer	59
Abbildung 54: Thermischer Komfort – 2. OG Wohnung Süd Schlafzimmer.....	60
Abbildung 55: Thermischer Komfort – 2. OG Wohnung Süd Wohnzimmer	61
Abbildung 56: Wohnungen Nord – Feuchtebewertung mittels Hx-Diagramm.....	63
Abbildung 57: Wohnungen Süd – Feuchtebewertung mittels Hx-Diagramm	64
Abbildung 58: Thermischer Komfort – Hx-Diagramme der Ost-Wohnungen	66
Abbildung 59: Gemessener Energieverbrauch der Forschungshäuser im Messjahr 2021/22	68
Abbildung 60: Beispielhafte Heizkörperklassifikation nach R. Ficht (Ficht, 2022).....	69
Abbildung 61: Grafische Gegenüberstellung von Energiebedarf (Berechnung nach GEG) und Energieverbrauch (Messung) nach Gebäuden und Wohneinheiten	70
Abbildung 62: Vergleich der Wetterdatensätze TRY (DWD) und eigener Wetterstation	72
Abbildung 63: 12-Zonen-Modell des 2.OG der Forschungshäuser in Rhinoceros®6 ..	73
Abbildung 64: Sommerlicher Komfort, Massivholzhaus, 2.OG, Süd-Wohnung, Küche	78
Abbildung 65a: Einfach Bauen 2, DIN EN 15251, Anhang A.2, Thermischer Komfort, Gebäude Leichtbeton, Apartment Süd, Wohnzimmer	79
Abbildung 66: EB2 und EB3 Simulationen im Vergleich bezüglich ihrer spezifischen Nutzenergie auf Wohnungsebene	82

Abbildung 67: Übersicht über die bewohnten Einheiten während der ersten Befragung (TUM)	91
Abbildung 68: Rücklauf der Fragebögen im Winter (TUM)	92
Abbildung 69: Übersicht über die bewohnten Einheiten während der zweiten Befragung (TUM)	92
Abbildung 70: Rücklauf der Fragebögen im Sommer (TUM)	93
Abbildung 71: Raumtemperatur im Winter; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	94
Abbildung 72: Thermischer Komfort (operative Temperatur), Dezember 2021, Massivholz Süd, Wohnzimmer	95
Abbildung 73: Thermischer Komfort (operative Temperatur), Dezember 2021, Leichtbeton Süd, Wohnzimmer	95
Abbildung 74:: Oberflächentemperatur der Außenwand im Winter; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	96
Abbildung 75: Temperatur des Fußbodens im Winter; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	97
Abbildung 76: Regulierung der Heizung; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	98
Abbildung 77: Maßnahmen in der Winterzeit (Mehrfachnennung möglich)	99
Abbildung 78: Zufriedenheit mit der Temperatur in der Winterzeit; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	100
Abbildung 79: Erwartungen an die Wohnung; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	101
Abbildung 80: Entscheidung, wieder in diese Wohnung zu ziehen; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	101
Abbildung 81: Raumtemperatur im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	103
Abbildung 82: Thermischer Komfort (operative Temperatur), August 2022, Massivholz Süd, Wohnzimmer	104
Abbildung 83: Thermischer Komfort (operative Temperatur), August 2022, Mauerwerk Süd, Wohnzimmer	104
Abbildung 84: Oberflächentemperatur der Außenwand im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	105

Abbildung 85: Temperatur des Fußbodens im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	106
Abbildung 86: Regulierung des Lichteinfalls; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung.....	107
Abbildung 87: Maßnahmen in der Sommerzeit	108
Abbildung 88: Zufriedenheit in der Sommerzeit; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung.....	109
Abbildung 89: Erwartungen an die Wohnung im Sommer; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	110
Abbildung 90: Entscheidung, wieder in diese Wohnung zu ziehen; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	111
Abbildung 91: Grafische Gegenüberstellung von Energiebedarf (Berechnung nach GEG) und Energieverbrauch (Messung) nach Gebäuden und Wohneinheiten	116
Abbildung 92: Gemessener Energieverbrauch der Forschungshäuser im Messjahr 2021/22	117
Abbildung 93: Entscheidung, wieder in diese Wohnung zu ziehen; links: nach Bauart, rechts: nach Himmelsrichtung	118
Abbildung 94: Außenansicht. Wohnen in Bad Aibling, Foto: Sebastian Schels	120
Abbildung 95: Gebäudestruktur Außenwand und Kerne, (Florian Nagler Architekten)	121
Abbildung 96: Fensterladen Detail, (Florian Nagler Architekten)	122
Abbildung 97: Modellfoto der Forschungshäuser Garching, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH	123
Abbildung 98: Deckenauflagerpunkt. Betonfertigteildecke, Dielenboden und Trennblech in der Holzfassade, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH	124
Abbildung 99: Forschungshäuser 2, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH	125
Abbildung 100: Verwendete Materialien von Haus 1, Quelle Florian Nagler Architekten GmbH	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Leichtbetongebäude	25
Tabelle 2: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Mauerwerksgebäude	27
Tabelle 3: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Massivholzgebäude	29
Tabelle 4: Übersicht Einhaltung Bedingung nach ISO 9869-1:2014-08, Massivholzgebäude	69
Tabelle 5: statistische Auswertung der 1-Zimmer-Wohnung im Leichtbetongebäude mit korrigierten Feuchtemesswerten um 5,3 %-Punkte nach abgeschlossener Validierung der 2,5-Zimmer-Wohnung [Kargruber, 2022]	85

Anhang 1, Dokumentation der Bauteile

In der Vergangenheit wurden von verschiedenen forschenden Stellen oft Informationen zur Konstruktion der Forschungshäuser für vergleichende Betrachtungen angefragt. Eine Mengenermittlung aller relevanter Bauteile der Gebäude (auch Stoffbilanz) bildet die Grundlage für jegliche Bilanzierung von Bauwerk und Technik. Als Grundlage für eine solche vergleichende Betrachtung haben wir im Anhang 1 die Bauteile von Bauwerk und Technik aufgelistet. Die Detaillierung orientiert sich dabei an der Detailtiefe der Ökobaudat.

Bauteile Haus Mauerwerk (MW)

BGF-R+S	648,4	m2
BGF-R	594,4	m2
Nutzfläche	453,73	m2
Wohnfläche	365,82	m2
Technikfläche (Zentraler Technikraum für alle drei Gebäude)	39,61	m2

Bauteil	Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID	
						Einheit Bauteil	Bezugs einheit				
Gründung Schotter											
MW-GR1	Auffüllung Recycling Körnung 0/63	1,0000	100%	1.400,00	1,00	1	1.400,00	kg	291 m2	MW-GR1 bd6aa879-e6e6-4181-afc5-1374b2f32dd1	
Bodenplatte											
MW-BP1	Bitumenbahn, Abdichtung DIN 18533-1	0,0040	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm	240 m2	MW-BP1 64da45fc-f415-4875-8a4e-7c23fe7a7aa9	
MW-BP1	Normalbeton C30/37	0,3000	99,3%	2.360,00	1,00	1	0,30	m3		a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c	
MW-BP1	Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg		e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082	
MW-BP1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg		d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8	
MW-BP1	Magerbeton C12/15	0,0500	100%	2.360,00	1,00	1	0,05	m3		9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7	
Aufkantung Bodenplatte											
MW-BP2	Normalbeton C25/30	0,1000	98%	2.360,00	1,00	1	0,10	m3	31 m2	MW-BP2 9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7	
MW-BP2	Bewehrungsstahl	0,1000	2,0%	7.850,00	1,00	1	15,70	kg		e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082	
MW-BP2	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,1000	2,0%	7.850,00	1,00	1	15,70	kg		d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8	
Dach											
MW-DA1	Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm	188 m2	MW-DA1 d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b	
MW-DA1	Holzschalung	0,0240	100%	484,51	1,00	1	0,02	m3		07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e	
MW-DA1	Holzsparren	0,2800	15%	492,92	1,00	1	0,04	m3		1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e	
MW-DA1	Holzfaserplatte	0,2400	100%	200,00	0,55	1	0,13	m3		1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0	
MW-DA1	Normalbeton C30/37	0,2000	99,3%	2.360,00	1,00	1	0,20	m3		a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c	
MW-DA1	Bewehrungsstahl	0,2000	0,7%	7.850,00	1,00	1	10,99	kg		e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082	
MW-DA1	Entsorgung Holzsparren	0,2000	0,7%	7.850,00	1,00	1	10,99	kg		d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8	
MW-DA1	Innenputz	0,0050	100%	900,00	1,00	1	0,01	m3		07f3cd13-22bb-494d-803a-f0a440fbce7a	
MW-DA1	Dispersionsfarbe	0,0001	100%	1.500,00	1,00	1	0,15	kg		35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c	
Dachüberstand											
										41 m2	MW-DA2

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID
							Einheit	Bezugs- einheit			
MW-DA2	Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
MW-DA2	Holz 3-S-Platte Dachrand	0,0400	100%	510,45	1,00	1	0,04	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
MW-DA2	Holzsparren	0,2800	15%	492,92	1,00	1	0,04	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
Dach Anbau									36 m2		MW-DA3
MW-DA3	Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
MW-DA3	Holz 3-S-Platte Dachrand	0,1000	100%	510,45	1,00	1	0,10	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
MW-DA3	Holzsparren	0,2800	4%	492,92	1,00	1	0,01	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
Spengler									1 psch.		MW-DA4
MW-DA4	Dachrinne, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	51,00	1	80,58	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
MW-DA4	Fallrohr, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	13,00	1	20,54	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
MW-DA4	Traufkante, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	34,00	1	53,72	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
H1-DA4	Entsorgung Edelstahl	0,0002	100%	0,00	30,00	1	154,84	kg			55945019-018a-46da-baae-a3ee62d59cf3
Außenwand Infraleichbeton									566 m2		MW-AW1
MW-AW1	Dispersionsfarbe	0,0001	100%	1.500,00	1,00	1	0,15	kg			35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c
MW-AW1	Innenputz	0,0050	100%	900,00	1,00	1	0,01	m3			07f3cd13-22bb-494d-803a-f0a440fbce7a
MW-AW1	Luftkammerziegel	0,4250	100%	575,00	1,00	1	0,43	m3			f98eea66-671c-4014-bfbb-2db1ffba8331
MW-AW1	Außenputz	0,0200	100%	1.300,00	1,00	1	26,00	kg			da57ac9b-96ef-4509-b855-222c821f971f
Außenwand Anbau Infraleichtbeton									48 m2		MW-AW2
MW-AW2	Dispersionsfarbe	0,0001	100%	1.500,00	1,00	1	0,15	kg			35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c
MW-AW2	Innenputz	0,0050	100%	900,00	1,00	1	0,01	m3			07f3cd13-22bb-494d-803a-f0a440fbce7a
MW-AW2	Luftkammerziegel	0,2400	100%	575,00	1,00	1	0,24	m3			f98eea66-671c-4014-bfbb-2db1ffba8331
MW-AW2	Außenputz	0,0200	100%	1.300,00	1,00	1	26,00	kg			da57ac9b-96ef-4509-b855-222c821f971f
Außendämmung bei Loggia/Zugang									33 m2		MW-AW3
MW-AW3	Holzgefach 20x8, e=80 cm KVH	0,2000	10%	492,92	1,00	1	0,02	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
MW-AW3	Holzfaserplatte WF 042 B2 DZ	0,1600	90%	200,00	0,55	1	0,08	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
MW-AW3	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
Nichttragende Außenwand Loggia									6 m2		MW-AW4
MW-AW4	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
MW-AW4	PE-Folie	0,0002	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0
MW-AW4	Holzgefach 20x8, e=80 cm	0,2000	10%	492,92	1,00	1	0,02	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID
							Einheit	Bezugs- einheit			
MW-AW4	Holzfaserplatte WF 042 B2 DZ	0,1600	90%	200,00	0,55	1	0,08	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
MW-AW4	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
Fenster / Außentüren									86 m2		MW-AF1
MW-AF1	Holz Blendrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			4127e60a-3c42-4076-83f5-5232b4ed642e
MW-AF1	Holz Flügelrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da
MW-AF1	Griff	1,0000	100%	0,00	0,50	1	0,50	pcs.			38ddefe2-e01c-4ece-9952-a353b7dfb246
MW-AF1	Beschlag	1,0000	100%	0,00	0,50	1	0,50	pcs.			b1efabb9-6371-4b96-9ee2-d1f11f9f3b25
MW-AF1	3-fach-Glas Ug≤0,90 W/m2K, g≤0,50	1,0000	70%	0,00	1,00	1	0,70	qm			fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451
Decke ü. EG u. 1. OG									373 m2		MW-DE1
MW-DE1	Normalbeton C30/37	0,3000	99,3%	2.360,00	1,00	1	0,30	m3			a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c
MW-DE1	Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
MW-DE1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
MW-DE1	Innenputz	0,0050	100%	900,00	1,00	1	0,01	m3			07f3cd13-22bb-494d-803a-f0a440fbce7a
MW-DE1	Dispersionsfarbe	0,0001	100%	1.500,00	1,00	1	0,15	kg			35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c
Bodenbelag Lino									155 m2		MW-DE2
MW-DE2	Linoleum, ΔLw ≥ 18 dB	0,0250	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			56e977b3-d042-4843-b40d-3a33dbb5a555
Bodenbelag Sisal									252 m2		MW-DE3
MW-DE3	Sisal, ΔLw ≥ 18 dB	0,0250	100%		1,00		1,00	qm			
Aufbau auf Bodenplatte									133 m2		MW-DE4
MW-DE4	Zementestrich, DIN18560 CT F5 S65	0,0750	100%	2.400,00	1,00	1	180,00	kg			0973f221-2284-4892-ae3d-1b8c2986b6dd
MW-DE4	PE-Folie	0,0002	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0
MW-DE4	Mineralwolle DES, SD≤20 MN/m3, CP2	0,0200	100%	85,00	1,00	1	0,02	m3			2691d6e4-a41e-40d7-92ca-680f8785fc1d
MW-DE4	Holzfaserplatte WF 042 B2, DEO	0,1800	100%	200,00	0,55	1	0,10	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
Aufbau unter Loggia									4 m2		MW-DE5
MW-DE5	Betonpflasterstein	0,0400	100%	2.350,00	1,00	1	1,00	qm			e76bcf28-fc7d-408e-a554-6317256cb905
MW-DE5	Splitt 2/15	0,0400	100%	1.500,00	1,00	1	60,00	kg			7502766c-df2f-4f8d-8d45-17bb6938eac8
MW-DE5	Bitumenbahn, 2-lagig E1	0,0040	100%	0,00	2,00	1	2,00	qm			64da45fc-f415-4875-8a4e-7c23fe7a7aa9
MW-DE5	PU Hartschaumdämmung	0,0950	100%	250,00	1,00	1	0,10	m3			2c076ee7-3853-4f69-9bf5-8ec265fa43e0
Belag Eingangsbereich & Anbau									45 m2		MW-DE6

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID
							Einheit	Bezugs- einheit			
MW-DE6	Normalbeton C25/30	0,2500	100%	2.360,00	1,00	1	0,25	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
	Innenwand tragend 24								367 m2		MW-IW1
MW-DE1	Dispersionsfarbe	0,0001	100%	1.500,00	1,00	1	0,15	kg			35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c
MW-DE1	Innenputz	0,0050	100%	900,00	1,00	1	0,01	m3			07f3cd13-22bb-494d-803a-f0a440fbce7a
MW-IW1	Normalbeton unbewehrt C20/25	0,2400	50%	1.800,00	1,00	1	0,12	m3			f74a19da-df9a-4462-a632-3b3dc83377b1
MW-IW1	Normalbeton unbewehrt C20/25	0,2400	50%	2.360,00	1,00	1	0,12	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
MW-DE1	Innenputz	0,0050	100%	900,00	1,00	1	0,01	m3			07f3cd13-22bb-494d-803a-f0a440fbce7a
MW-DE1	Dispersionsfarbe	0,0001	100%	1.500,00	1,00	1	0,15	kg			35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c
	Innenwand Leichtbau								110 m2		MW-IW2
MW-IW2	Gipskartonplatten 2-fach	0,0250	100%	760,00	2,00	1	2,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
MW-IW2	Feinblechprofil, bandverzinkt	0,0500	100%	7.850,00	0,0029	1	1,12	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
MW-IW2	Hohlraumdämmung MiWo	0,0400	85%	26,25	1,00	1	0,03	m3			fafd5743-0b42-4614-8e3d-5c4eacdfba98
MW-IW2	Gipskartonplatten 2-fach	0,0250	100%	760,00	2,00	1	2,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
	Innentüren								54 m2		MW-IT1
MW-IT1	Holz Blendrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			4127e60a-3c42-4076-83f5-5232b4ed642e
MW-IT1	Holz Flügelrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da
MW-IT1	Griff	1,0000	100%	0,00	0,30	1	0,30	pcs.			38ddefe2-e01c-4ece-9952-a353b7dfb246
MW-IT1	Beschlag	1,0000	100%	0,00	0,30	1	0,30	pcs.			b1efabb9-6371-4b96-9ee2-d1f11f9f3b25
MW-IT1	Füllung 3-S-Platte	0,0400	80%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
	Badzellen								1 psch.		MW-BZ
MW-BZ	Gipskartonplatten	0,0125	100%	760,00	139,00	1	139,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
MW-BZ	Feinblechprofil, bandverzinkt; Decke	0,0500	100%	7.850,00	0,1056	1	41,44	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
MW-BZ	Feinblechprofil, bandverzinkt, Wand	0,0500	100%	7.850,00	0,5336	1	209,44	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
MW-BZ	Rahmen Profilstahl	0,0001	100%	7.850,00	535,05	1	535,05	kg			38051c22-fbd1-4b0e-944a-ae348b8c7695
MW-BZ	Entsorgung Rahmen Profilstahl	0,0001	100%	7.850,00	535,05	1	535,05	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
MW-BZ	Hohlraumdämmung MiWo	0,0400	100%	22,31	261,00	1	10,44	m3			fafd5743-0b42-4614-8e3d-5c4eacdfba98
MW-BZ	Gipsfaserplatte	0,0200	100%	760,00	59,20	1	59,20	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
MW-BZ	Gipskartonplatten	0,0125	100%	760,00	224,00	1	224,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
MW-BZ	Fliesen	0,0100	100%	2.487,00	16,00	1	16,00	qm			a2b5b7c9-db13-4dbd-be23-b0ff9f0cbd98
	Badzelle Technik								8 Stk.		MW-BZ-T
MW-BZ-T	Keramik Waschtisch und WC	1,0000	100%	1,00	45,00	1	45,00	kg			cace7e48-3fb4-4e11-8cc4-fcefc8b4116a

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID
							Einheit	Bezugs- einheit			
MW-BZ-T	WC Sitz Duroplast	1,0000	100%	1,00	1,00	1	1,00	pcs.			e7ed29a8-bbb8-49c6-bdb5-15b5a7f6ffef
MW-BZ-T	Duschtasse Stahl-Email	1,0000	100%	1,00	0,81	1	0,81	qm			8633a241-2785-4389-a646-1032c5b5506e
MW-BZ-T	Heizkörper	1,0000	100%	1,00	10,00	1	10,00	kg			c6de5beb-ffe9-4b5f-aba8-c0c2d3528c58
MW-BZ-T	Elektro Kabel	1,0000	100%	1,00	15,00	1	15,00	m			c812d890-4e1c-4293-bc81-6f5bd95d7930
MW-BZ-T	LED Leuchten	1,0000	100%	1,00	2,00	1	2,00	pcs.			43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
MW-BZ-T	Wasserleitungen Edelstahl	1,0000	100%	0,40	15,00	1	6,00	kg			4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
MW-BZ-T	Abwasserleitung	1,0000	100%	8,50	3,00	1	25,50	kg			64e16249-8051-483b-968e-46008a43ef18
MW-BZ-T	Badlüfter 60 m3/h	1,0000	100%	1,00	8,00	1	8,00	pcs.			c8cf7494-2f23-4193-a185-f7d4dfa36b6
MW-BZ-T	Abwasserleitung	1,0000	100%	1,47	24,00	1	35,28	kg			b24ae8b5-e28a-42f7-a592-05779a347164
	Technik								1 psch.		Technik
Technik	Heizkörper	1,0000	100%	1,00	210,00	1	210,00	kg			c6de5beb-ffe9-4b5f-aba8-c0c2d3528c58
Technik	Heizkörperleitung	1,0000	100%	1,00	210,00	1	210,00	kg			8622539c-592c-45b0-9a4b-e5f8b4fea367
Technik	Mineralwolle Rohrisolierung	1,0000	100%	1,00	0,50	1	0,50	m3			2691d6e4-a41e-40d7-92ca-680f8785fc1d
Technik	Umwälzpumpen	1,0000	100%	1,00	2,00	1	2,00	pcs.			b4e4d89b-e4d0-4df3-a233-deacc76b2fee
Technik	Pufferspeicher	1,0000	100%	1,00	150,00	1	150,00	kg			b273afc9-27a1-4a82-a390-8780fd631008
Technik	Übergabestation / Wasserbehandlung	1,0000	100%	1,00	100,00	1	100,00	kg			dcd5e23a-9bec-40b6-b07c-1642fe696a2e
Technik	Wandschalter	1,0000	100%	1,00	81,00	1	81,00	pcs.			bafc0f4a-7e8d-4536-b7b5-db8ca8f2ed75
Technik	Steckdose	1,0000	100%	1,00	270,00	1	270,00	pcs.			4cb7ca91-5be5-4fa6-99c1-99f597310351
Technik	Elektro Kabel	1,0000	100%	1,00	810,00	1	810,00	m			c812d890-4e1c-4293-bc81-6f5bd95d7930
Technik	LED Leuchten	1,0000	100%	1,00	10,00	1	10,00	pcs.			43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
Technik	Wasserleitungen Edelstahl	1,0000	100%	1,00	226,50	1	226,50	kg			4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
Technik	Abwasserrohr PP	1,0000	100%	1,00	60,00	1	60,00	kg			94355965-8d24-4e78-a910-9f35b8ae1193

Bauteile Haus Holz Massiv (HM)

BGF-R+S	648,4	m2
BGF-R	594,4	m2
Nutzfläche	463,67	m2
Wohnfläche	414,98	m2

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	Bauteil- UUID
							Einheit	Bezugs einheit			
	Gründung Schotter								291 m2		HM-GR1
HM-GR1	Auffüllung Recycling Körnung 0/63	1,0000	100%	1.400,00	1,00	1	1.400,00	kg			bd6aa879-e6e6-4181-afc5-1374b2f32dd1
	Bodenplatte								240 m2		HM-BP1
HM-BP1	Bitumenbahn, Abdichtung DIN 18533-1	0,0040	100%		1,00	1	1,00	qm			64da45fc-f415-4875-8a4e-7c23fe7a7aa9
HM-BP1	Normalbeton C30/37	0,3000	99,3%	2.360,00	1,00	1	0,30	m3			a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c
HM-BP1	Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
HM-BP1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
HM-BP1	Magerbeton C12/15	0,0500	100%	2.360,00	1,00	1	0,05	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
	Aufkantung Bodenplatte								31 m2		HM-BP2
HM-BP2	Normalbeton C25/30	0,1000	98%	2.360,00	1,00	1	0,10	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
HM-BP2	Bewehrungsstahl	0,1000	2,0%	7.850,00	1,00	1	15,70	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
HM-BP2	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,1000	2,0%	7.850,00	1,00	1	15,70	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
	Dach								188 m2		HM-DA1
HM-DA1	Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%		1,00	1	1,00	qm			d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
HM-DA1	Holzschalung	0,0240	100%	484,51	1,00	1	0,02	m3			07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e
HM-DA1	Holzsparren	0,2800	15%	492,92	1,00	1	0,04	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
HM-DA1	Holzfaserplatte	0,2400	100%	200,00	0,55	1	0,13	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
HM-DA1	Normalbeton C30/37	0,2000	99,3%	2.360,00	1,00	1	0,20	m3			a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c
HM-DA1	Bewehrungsstahl	0,2000	0,7%	7.850,00	1,00	1	10,99	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
HM-DA1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,2000	0,7%	7.850,00	1,00	1	10,99	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
	Dachüberstand								41 m2		HM-DA2
HM-DA2	Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%		1,00	1	1,00	qm			d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
HM-DA2	Holz 3-S-Platte Dachrand	0,0400	100%	510,45	1,00	1	0,04	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	Bauteil- UUID
							Einheit	Bezugs- einheit			
HM-DA2	Holzsparren	0,2800	15%	492,92	1,00	1	0,04	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
	Dach Anbau								36 m2		HM-DA3
HM-DA3	Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%		1,00	1	1,00	qm			d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
HM-DA3	Holz 3-S-Platte Dachrand	0,1000	100%	510,45	1,00	1	0,10	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
HM-DA3	Holzsparren	0,2800	4%	492,92	1,00	1	0,01	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
	Spengler								1 psch.		HM-DA4
HM-DA4	Dachrinne, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	51,00	1	80,58	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
HM-DA4	Fallrohr, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	13,00	1	20,54	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
HM-DA4	Traufkante, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	34,00	1	53,72	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
H1-DA4	Entsorgung Edelstahl	0,0002	100%		30,00	1	154,84	kg			55945019-018a-46da-baae-a3ee62d59cf3
	Außenwand Infraleichbeton								566 m2		HM-AW1
HM-AW1	Brettsperrholz	0,3000	100%	330,00	1,00	1	0,30	m3			7f12b868-0c13-4a5d-bfe7-0f05734cca89
HM-AW1	Nadelschnittholz	0,0600	13%	540,00	1,00	1	0,01	m3			07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e
HM-AW1	Luftschicht	0,5000	87%								
HM-AW1	Verschalung Lärche	0,0300	100%	3.050,00	1,00	1	0,03	m3			07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e
	Außenwand Anbau Infraleichtbeton								48 m2		HM-AW2
HM-AW2	Brettsperrholz	0,1000	100%	330,00	1,00	1	0,10	m3			7f12b868-0c13-4a5d-bfe7-0f05734cca89
HM-AW2	Nadelschnittholz	0,0600	13%	540,00	1,00	1	0,01	m3			07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e
HM-AW2	Luftschicht	0,0600	87%								
HM-AW2	Verschalung Lärche	0,0300	100%	3.050,00	1,00	1	0,03	m3			07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e
	Außendämmung bei Loggia/Zugang								33 m2		HM-AW3
HM-AW3	Holzgefach 20x8, e=80 cm KVH	0,2000	10%	492,92	1,00	1	0,02	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
HM-AW3	Holzfaserplatte WF 042 B2 DZ	0,1600	90%	200,00	0,55	1	0,08	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
HM-AW3	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
	Nichttragende Außenwand Loggia								6 m2		HM-AW4
HM-AW4	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
HM-AW4	PE-Folie	0,0002	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0
HM-AW4	Holzgefach 20x8, e=80 cm	0,2000	10%	492,92	1,00	1	0,02	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
HM-AW4	Holzfaserplatte WF 042 B2 DZ	0,1600	90%	200,00	0,55	1	0,08	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
HM-AW4	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	Bauteil- UUID
							Einheit	Bezugs einheit			
	Fenster / Außentüren								86 m2		HM-AF1
HM-AF1	Holz Blendrahmen	1,0000	100%		3,00	1	3,00	m			4127e60a-3c42-4076-83f5-5232b4ed642e
HM-AF1	Holz Flügelrahmen	1,0000	100%		3,00	1	3,00	m			318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da
HM-AF1	Griff	1,0000	100%		0,50	1	0,50	pcs.			38ddefe2-e01c-4ece-9952-a353b7dfb246
HM-AF1	Beschlag	1,0000	100%		0,50	1	0,50	pcs.			b1efabb9-6371-4b96-9ee2-d1f11f9f3b25
HM-AF1	3-fach-Glas Ug≤0,90 W/m2K, g≤0,50	1,0000	70%		1,00	1	0,70	qm			fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451
	Decke ü. EG u. 1. OG								373 m2		HM-DE1
HM-DE1	Normalbeton C30/37	0,3000	99,3%	2.360,00	1,00	1	0,30	m3			a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c
HM-DE1	Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
HM-DE1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,3000	0,7%	7.850,00	1,00	1	16,49	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
	Bodenbelag Lino								155 m2		HM-DE2
HM-DE2	Linoleum, ΔLw ≥ 18 dB	0,0250	100%		1,00	1	1,00	qm			56e977b3-d042-4843-b40d-3a33dbb5a555
	Bodenbelag Sisal								252 m2		HM-DE3
HM-DE3	Sisal, ΔLw ≥ 18 dB	0,0250	100%		1,00		1,00	qm			keine Daten vorhanden
	Aufbau auf Bodenplatte								133 m2		HM-DE4
HM-DE4	Zementestrich, DIN18560 CT F5 S65	0,0750	100%	2.400,00	1,00	1	180,00	kg			0973f221-2284-4892-ae3d-1b8c2986b6dd
HM-DE4	PE-Folie	0,0002	100%		1,00	1	1,00	qm			99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0
HM-DE4	Mineralwolle DES, SD≤20 MN/m3, CP2	0,0200	100%	85,00	1,00	1	0,02	m3			2691d6e4-a41e-40d7-92ca-680f8785fc1d
HM-DE4	Holzfasерplatte WF 042 B2, DEO	0,1800	100%	200,00	0,55	1	0,10	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
	Aufbau unter Loggia								4 m2		HM-DE5
HM-DE5	Betonpflasterstein	0,0400	100%	2.350,00	1,00	1	1,00	qm			e76bcf28-fc7d-408e-a554-6317256cb905
HM-DE5	Splitt 2/15	0,0400	100%	1.500,00	1,00	1	60,00	kg			7502766c-df2f-4f8d-8d45-17bb6938eac8
HM-DE5	Bitumenbahn, 2-lagig E1	0,0040	100%		2,00	1	2,00	qm			64da45fc-f415-4875-8a4e-7c23fe7a7aa9
HM-DE5	PU Hartschaumdämmung	0,0950	100%	250,00	1,00	1	0,10	m3			2c076ee7-3853-4f69-9bf5-8ec265fa43e0
	Belag Eingangsbereich & Anbau								45 m2		HM-DE6
HM-DE6	Normalbeton C25/30	0,2500	100%	2.360,00	1,00	1	0,25	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
	Innenwand tragend 16								367 m2		HM-IW1
HM-IW1	Brettsperrholz	0,1600	100%	489,41	1,00	1	0,16	m3			7f12b868-0c13-4a5d-bfe7-0f05734cca89

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	Bauteil- UUID
							Einheit	Bezugs- einheit			
	Innenwand Leichtbau Vorwand								156 m2		HM-IW2
HM-IW2	Gipskartonplatten 2-fach	0,0250	100%	760,00	2,00	1	2,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
HM-IW2	Feinblechprofil, bandverzinkt	0,0500	100%	7.850,00	0,0029	1	1,12	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
HM-IW2	Hohlraumdämmung MiWo	0,0400	85%	26,25	1,00	1	0,03	m3			fafd5743-0b42-4614-8e3d-5c4eacdfba98
	Innenwand Leichtbau								110 m2		HM-IW3
HM-IW3	Gipskartonplatten 2-fach	0,0250	100%	760,00	2,00	1	2,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
HM-IW3	Feinblechprofil, bandverzinkt	0,0500	100%	7.850,00	0,0029	1	1,12	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
HM-IW3	Hohlraumdämmung MiWo	0,0400	85%	26,25	1,00	1	0,03	m3			fafd5743-0b42-4614-8e3d-5c4eacdfba98
HM-IW3	Gipskartonplatten 2-fach	0,0250	100%	760,00	2,00	1	2,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
	Innentüren								54 m2		HM-IT1
HM-IT1	Holz Blendrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			4127e60a-3c42-4076-83f5-5232b4ed642e
HM-IT1	Holz Flügelrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da
HM-IT1	Griff	1,0000	100%	0,00	0,30	1	0,30	pcs.			38ddefe2-e01c-4ece-9952-a353b7dfb246
HM-IT1	Beschlag	1,0000	100%	0,00	0,30	1	0,30	pcs.			b1efabb9-6371-4b96-9ee2-d1f11f9f3b25
HM-IT1	Füllung 3-S-Platte	0,0400	80%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
	Badzellen								1 psch.		HM-BZ
HM-BZ	Gipskartonplatten	0,0125	100%	760,00	139,00	1	139,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
HM-BZ	Feinblechprofil, bandverzinkt; Decke	0,0500	100%	7.850,00	0,1056	1	41,44	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
HM-BZ	Feinblechprofil, bandverzinkt, Wand	0,0500	100%	7.850,00	0,5336	1	209,44	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
HM-BZ	Rahmen Profilstahl	0,0001	205%	7.850,00	261,00	1	535,92	kg			38051c22-fbd1-4b0e-944a-ae348b8c7695
HM-BZ	Entsorgung Rahmen Profilstahl	0,0001	205%	7.850,00	261,00	1	535,92	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
HM-BZ	Hohlraumdämmung MiWo	0,0400	85%	26,25	261,00	1	8,87	m3			fafd5743-0b42-4614-8e3d-5c4eacdfba98
HM-BZ	Gipsfaserplatte	0,0200	160%	760,00	37,00	1	59,20	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
HM-BZ	Gipskartonplatten	0,0125	100%	760,00	224,00	1	224,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
HM-BZ	Fliesen	0,0100	100%	2.487,00	16,00	1	16,00	qm			a2b5b7c9-db13-4dbd-be23-b0ff9f0cbd98
	Badzelle Technik								8 Stk.		HM-BZ-T
HM-BZ-T	Keramik Waschtisch und WC	1,0000	100%	1,00	45,00	1	45,00	kg			cace7e48-3fb4-4e11-8cc4-fcefc8b4116a
HM-BZ-T	WC Sitz Duroplast	1,0000	100%	1,00	1,00	1	1,00	pcs.			e7ed29a8-bbb8-49c6-bdb5-15b5a7f6ffef
HM-BZ-T	Duschtasse Stahl-Email	1,0000	100%	1,00	0,81	1	0,81	qm			8633a241-2785-4389-a646-1032c5b5506e
HM-BZ-T	Heizkörper	1,0000	100%	1,00	10,00	1	10,00	kg			c6de5beb-ffe9-4b5f-aba8-c0c2d3528c58
HM-BZ-T	Elektro Kabel	1,0000	100%	1,00	15,00	1	15,00	m			c812d890-4e1c-4293-bc81-6f5bd95d7930

		Volumen		Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	Bauteil- UUID
Bauteil		Bauteil- dicke m	anteil an Schicht %				Einheit Bauteil	Bezugs einheit			
HM-BZ-T	LED Leuchten	1,0000	100%	1,00	2,00	1	2,00	pcs.			43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
HM-BZ-T	Wasserleitungen Edelstahl	1,0000	100%	0,40	15,00	1	6,00	kg			4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
HM-BZ-T	Abwasserleitung	1,0000	100%	8,50	3,00	1	25,50	kg			64e16249-8051-483b-968e-46008a43ef18
HM-BZ-T	Badlüfter 60 m3/h	1,0000	100%	1,00	8,00	1	8,00	pcs.			c8cf7494-2f23-4193-a185-f7d4fdfa36b6
HM-BZ-T	Abwasserleitung	1,0000	100%	1,47	24,00	1	35,28	kg			b24ae8b5-e28a-42f7-a592-05779a347164
Technik									1 psch.	Technik	
Technik	Heizkörper	1,0000	100%	1,00	210,00	1	210,00	kg			c6de5bebf-fe9-4b5f-aba8-c0c2d3528c58
Technik	Heizkörperleitung	1,0000	100%	1,00	210,00	1	210,00	kg			8622539c-592c-45b0-9a4b-e5f8b4fea367
Technik	Mineralwolle Rohrisolierung	1,0000	100%	1,00	0,50	1	0,50	m3			2691d6e4-a41e-40d7-92ca-680f8785fc1d
Technik	Umwälzpumpen	1,0000	100%	1,00	2,00	1	2,00	pcs.			b4e4d89b-e4d0-4df3-a233-deacc76b2fee
Technik	Pufferspeicher	1,0000	100%	1,00	150,00	1	150,00	kg			b273afc9-27a1-4a82-a390-8780fd631008
Technik	Übergabestation / Wasserbehandlung	1,0000	100%	1,00	100,00	1	100,00	kg			dcd5e23a-9bec-40b6-b07c-1642fe696a2e
Technik	Wandschalter	1,0000	100%	1,00	81,00	1	81,00	pcs.			bafc0f4a-7e8d-4536-b7b5-db8ca8f2ed75
Technik	Steckdose	1,0000	100%	1,00	270,00	1	270,00	pcs.			4cb7ca91-5be5-4fa6-99c1-99f597310351
Technik	Elektro Kabel	1,0000	100%	1,00	810,00	1	810,00	m			c812d890-4e1c-4293-bc81-6f5bd95d7930
Technik	LED Leuchten	1,0000	100%	1,00	10,00	1	10,00	pcs.			43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
Technik	Wasserleitungen Edelstahl	1,0000	100%	1,00	226,50	1	226,50	kg			4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
Technik	Abwasserrohr PP	1,0000	100%	1,00	60,00	1	60,00	kg			94355965-8d24-4e78-a910-9f35b8ae1193

Bauteile Haus Leichtbeton (LB)

BGF-R+S	648,4	m2
BGF-R	594,4	m2
Nutzfläche	445,3	m2
Wohnfläche	397,79	m2

Bauteil	Bauteile Haus LB	Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro Einheit Bauteil	Bezugs- einheit	Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID
LB-GR1	Gründung Schotter Auffüllung Recycling Körnung 0/63	1,0000	100%	1.400,00	1,00	1	1.400,00	kg	291 m2		LB-GR1 bd6aa879-e6e6-4181-afc5-1374b2f32dd1
LB-BP1	Bodenplatte Bitumenbahn, Abdichtung DIN 18533-1	0,0040	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm	240 m2		LB-BP1 64da45fc-f415-4875-8a4e-7c23fe7a7aa9
LB-BP1	Normalbeton C30/37	0,3000	99,56%	2.360,00	1,00	1	0,30	m3			a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c
LB-BP1	Bewehrungsstahl	0,3000	0,44%	7.850,00	1,00	1	10,36	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
LB-BP1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,3000	0,44%	7.850,00	1,00	1	10,36	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
LB-BP1	Magerbeton C12/15	0,0500	100%	2.360,00	1,00	1	0,05	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
LB-BP2	Aufkantung Bodenplatte Normalbeton C25/30	0,1000	98%	2.360,00	1,00	1	0,10	m3	31 m2		LB-BP2 9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
LB-BP2	Bewehrungsstahl	0,1000	2,0%	7.850,00	1,00	1	15,70	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
LB-BP2	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,1000	2,0%	7.850,00	1,00	1	15,70	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
LB-DA1	Dach Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm	188 m2		LB-DA1 d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
LB-DA1	Holzschalung	0,0240	100%	484,51	1,00	1	0,02	m3			07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e
LB-DA1	Holzsparren	0,2800	15%	492,92	1,00	1	0,04	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
LB-DA1	Holzfaserplatte	0,2400	100%	200,00	0,55	1	0,13	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
LB-DA1	Normalbeton C30/37	0,2000	99,56%	2.360,00	1,00	1	0,20	m3			a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c
LB-DA1	Bewehrungsstahl	0,2000	0,44%	7.850,00	1,00	1	6,91	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
LB-DA1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,2000	0,44%	7.850,00	1,00	1	6,91	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
LB-DA2	Dachüberstand Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm	41 m2		LB-DA2 d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
LB-DA2	Holz 3-S-Platte Dachrand	0,0400	100%	510,45	1,00	1	0,04	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927

Bauteil	Bauteile Haus LB	Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	Bauteil- UUID
							Einheit	Bezugs einheit			
LB-DA2	Holzsparren	0,2800	15%	492,92	1,00	1	0,04	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
	Dach Anbau								36 m2		LB-DA3
LB-DA3	Bitumenbahn beschiefert, E1	0,0050	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			d56bd904-09a0-4d30-bdbe-5d4f892cc12b
LB-DA3	Holz 3-S-Platte Dachrand	0,1000	100%	510,45	1,00	1	0,10	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
LB-DA3	Holzsparren	0,2800	4%	492,92	1,00	1	0,01	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
	Spengler								1 psch.		LB-DA4
LB-DA4	Dachrinne, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	51,00	1	80,58	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
LB-DA4	Fallrohr, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	13,00	1	20,54	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
LB-DA4	Traufkante, Edelstahl	0,0002	100%	7.900,00	34,00	1	53,72	kg			88559403-7658-48f2-bac9-7986b4d0f4c2
H1-DA4	Entsorgung Edelstahl	0,0002	100%	0,00	30,00	1	154,84	kg			55945019-018a-46da-baae-a3ee62d59cf3
	Außenwand Infraleichtbeton								566 m2		LB-AW1
LB-AW1	Blähglas	0,5000	44,2%	330,00	1,00	1	72,93	kg			e2306538-776d-4bc5-ae3b-1c920fb40285
LB-AW1	Blähton	0,5000	12,6%	540,00	1,00	1	34,02	kg			f70e7397-ab7b-47c8-a172-6992a615ee2e
LB-AW1	Portlandhüttenzement	0,5000	6,9%	3.100,00	1,00	1	106,95	kg			df40fb5f-9a10-422d-8d95-69a3af9d0d96
LB-AW1	Hochofenzement	0,5000	4,4%	3.050,00	1,00	1	67,10	kg			55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfdc
LB-AW1	Flugasche	0,5000	4,2%	2.400,00	1,00	1	50,40	kg			a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134
LB-AW1	Silikastaub	0,5000	1,2%	1.370,00	1,00	1	8,22	kg			230cd2c6-0b79-461b-b51a-d092e66843ca
LB-AW1	Luftporen	0,5000	10,0%								
LB-AW1	Wasser	0,5000	16,5%	1.000,00	1,00	1	82,50	kg			ce3057d1-3371-47b4-a982-a1c42c2c6a85
LB-AW1	Entsorgung Leichtbeton	0,5000	100,0%	750,00	1,00	1	375,00	kg			4a937f66-c9c2-402b-9a00-83767031bfa7
	Außenwand Anbau Infraleichtbeton								48 m2		LB-AW2
LB-AW2	Blähglas	0,3000	44,2%	330,00	1,00	1	43,76	kg			e2306538-776d-4bc5-ae3b-1c920fb40285
LB-AW2	Blähton	0,3000	12,6%	540,00	1,00	1	20,41	kg			f70e7397-ab7b-47c8-a172-6992a615ee2e
LB-AW2	Portlandhüttenzement	0,3000	6,9%	3.100,00	1,00	1	64,17	kg			df40fb5f-9a10-422d-8d95-69a3af9d0d96
LB-AW2	Hochofenzement	0,3000	4,4%	3.050,00	1,00	1	40,26	kg			55105a8e-947d-47fe-a98e-3bcf356edfdc
LB-AW2	Flugasche	0,3000	4,2%	2.400,00	1,00	1	30,24	kg			a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134
LB-AW2	Silikastaub	0,3000	1,2%	1.370,00	1,00	1	4,93	kg			230cd2c6-0b79-461b-b51a-d092e66843ca
LB-AW2	Luftporen	0,3000	10,0%								
LB-AW2	Wasser	0,3000	16,5%	1.000,00	1,00	1	49,50	kg			ce3057d1-3371-47b4-a982-a1c42c2c6a85
LB-AW2	Entsorgung Leichtbeton	0,3000	100,0%	750,00	1,00	1	225,00	kg			4a937f66-c9c2-402b-9a00-83767031bfa7
	Außendämmung bei Loggia/Zugang								33 m2		LB-AW3

Bauteil	Bauteile Haus LB	Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	Bauteil- UUID
							Einheit Bauteil	Bezugs einheit			
LB-AW3	Holzgefach 20x8, e=80 cm KVH	0,2000	10%	492,92	1,00	1	0,02	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
LB-AW3	Holzfaserplatte WF 042 B2 DZ	0,1600	90%	200,00	0,55	1	0,08	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
LB-AW3	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
Nichttragende Außenwand Loggia									6 m2		LB-AW4
LB-AW4	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
LB-AW4	PE-Folie	0,0002	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0
LB-AW4	Holzgefach 20x8, e=80 cm	0,2000	10%	492,92	1,00	1	0,02	m3			1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e
LB-AW4	Holzfaserplatte WF 042 B2 DZ	0,1600	90%	200,00	0,55	1	0,08	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
LB-AW4	Holz 3-S-Platte Lärche	0,0300	100%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
Fenster / Außentüren									86 m2		LB-AF1
LB-AF1	Holz Blendrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			4127e60a-3c42-4076-83f5-5232b4ed642e
LB-AF1	Holz Flügelrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da
LB-AF1	Griff	1,0000	100%	0,00	0,50	1	0,50	pcs.			38ddefe2-e01c-4ece-9952-a353b7dfb246
LB-AF1	Beschlag	1,0000	100%	0,00	0,50	1	0,50	pcs.			b1efabb9-6371-4b96-9ee2-d1f11f9f3b25
LB-AF1	3-fach-Glas Ug≤0,90 W/m2K, g≤0,50	1,0000	70%	0,00	1,00	1	0,70	qm			fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451
Decke ü. EG u. 1. OG									373 m2		LB-DE1
LB-DE1	Normalbeton C30/37	0,3000	99,56%	2.360,00	1,00	1	0,30	m3			a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c
LB-DE1	Bewehrungsstahl	0,3000	0,44%	7.850,00	1,00	1	10,36	kg			e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082
LB-DE1	Entsorgung Bewehrungsstahl	0,3000	0,44%	7.850,00	1,00	1	10,36	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
Bodenbelag Lino									155 m2		LB-DE2
LB-DE2	Linoleum, ΔLw ≥ 18 dB	0,0250	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			56e977b3-d042-4843-b40d-3a33dbb5a555
Bodenbelag Sisal									252 m2		LB-DE3
LB-DE3	Sisal, ΔLw ≥ 18 dB	0,0250	100%		1,00		1,00	qm			
Aufbau auf Bodenplatte									133 m2		LB-DE4
LB-DE4	Zementestrich, DIN18560 CT F5 S65	0,0750	100%	2.400,00	1,00	1	180,00	kg			0973f221-2284-4892-ae3d-1b8c2986b6dd
LB-DE4	PE-Folie	0,0002	100%	0,00	1,00	1	1,00	qm			99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0
LB-DE4	Mineralwolle DES, SD≤20 MN/m3, CP2	0,0200	100%	85,00	1,00	1	0,02	m3			2691d6e4-a41e-40d7-92ca-680f8785fc1d
LB-DE4	Holzfaserplatte WF 042 B2, DEO	0,1800	100%	200,00	0,55	1	0,10	m3			1d8ac430-ac11-4bc9-b302-e2278a9ef6f0
Aufbau unter Loggia									4 m2		LB-DE5

Bauteil		Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID
							Einheit	Bezugs- einheit			
	Bauteile Haus LB										
LB-DE5	Betonpflasterstein	0,0400	100%	2.350,00	1,00	1	1,00	qm			e76bcf28-fc7d-408e-a554-6317256cb905
LB-DE5	Splitt 2/15	0,0400	100%	1.500,00	1,00	1	60,00	kg			7502766c-df2f-4f8d-8d45-17bb6938eac8
LB-DE5	Bitumenbahn, 2-lagig E1	0,0040	100%	0,00	2,00	1	2,00	qm			64da45fc-f415-4875-8a4e-7c23fe7a7aa9
LB-DE5	PU Hartschaumdämmung	0,0950	100%	250,00	1,00	1	0,10	m3			2c076ee7-3853-4f69-9bf5-8ec265fa43e0
	Belag Eingangsbereich & Anbau								45 m2		LB-DE6
LB-DE6	Normalbeton C25/30	0,2500	100%	2.360,00	1,00	1	0,25	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
	Innenwand tragend 24								367 m2		LB-IW1
LB-IW1	Normalbeton unbewehrt C20/25	0,2400	100%	2.360,00	1,00	1	0,24	m3			9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7
	Innenwand Leichtbau								110 m2		LB-IW2
LB-IW2	Gipskartonplatten 2-fach	0,0250	100%	760,00	2,00	1	2,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
LB-IW2	Feinblechprofil, bandverzinkt	0,0500	100%	7.850,00	0,0029	1	1,12	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
LB-IW2	Hohlraumdämmung MiWo	0,0400	85%	26,25	1,00	1	0,03	m3			fafd5743-0b42-4614-8e3d-5c4eacdffa98
LB-IW2	Gipskartonplatten 2-fach	0,0250	100%	760,00	2,00	1	2,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
	Innentüren								54 m2		LB-IT1
LB-IT1	Holz Blendrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			4127e60a-3c42-4076-83f5-5232b4ed642e
LB-IT1	Holz Flügelrahmen	1,0000	100%	0,00	3,00	1	3,00	m			318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da
LB-IT1	Griff	1,0000	100%	0,00	0,30	1	0,30	pcs.			38ddefe2-e01c-4ece-9952-a353b7dfb246
LB-IT1	Beschlag	1,0000	100%	0,00	0,30	1	0,30	pcs.			b1efabb9-6371-4b96-9ee2-d1f11f9f3b25
LB-IT1	Füllung 3-S-Platte	0,0400	80%	510,45	1,00	1	0,03	m3			f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
	Badzellen								1 psch.		LB-BZ
LB-BZ	Gipskartonplatten	0,0125	100%	760,00	139,00	1	139,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
LB-BZ	Feinblechprofil, bandverzinkt; Decke	0,0500	100%	7.850,00	0,1056	1	41,44	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
LB-BZ	Feinblechprofil, bandverzinkt, Wand	0,0500	100%	7.850,00	0,5336	1	209,44	kg			93edef71-49e3-4e1f-ba6d-1e449e7d328d
LB-BZ	Rahmen Profilstahl	0,0001	205%	7.850,00	261,00	1	535,92	kg			38051c22-fbd1-4b0e-944a-ae348b8c7695
LB-BZ	Entsorgung Rahmen Profilstahl	0,0001	205%	7.850,00	261,00	1	535,92	kg			d9f045e5-ae07-4ae6-9fde-5346560411d8
LB-BZ	Hohlraumdämmung MiWo	0,0400	85%	26,25	261,00	1	8,87	m3			fafd5743-0b42-4614-8e3d-5c4eacdffa98
LB-BZ	Gipsfaserplatte	0,0200	160%	760,00	37,00	1	59,20	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
LB-BZ	Gipskartonplatten	0,0125	100%	760,00	224,00	1	224,00	qm			08fae34a-2af4-464f-bd38-c5c5477607d5
LB-BZ	Fliesen	0,0100	100%	2.487,00	16,00	1	16,00	qm			a2b5b7c9-db13-4dbd-be23-b0ff9f0cbd98
	Badzelle Technik								8 Stk.		LB-BZ-T

Bauteil	Bauteile Haus LB	Bauteil- dicke m	Volumen anteil an Schicht %	Rohdichte (kg/m3)	ggf. Faktor auf Bauteil- einheit	Bezug sgroes se	Menge Bezugs- einheit pro		Bauteil- menge	Bauteil- einheit	UUID
							Einheit	Bezugs einheit			
LB-BZ-T	Keramik Waschtisch und WC	1,0000	100%	1,00	45,00	1	45,00	kg			cace7e48-3fb4-4e11-8cc4-fcefc8b4116a
LB-BZ-T	WC Sitz Duroplast	1,0000	100%	1,00	1,00	1	1,00	pcs.			e7ed29a8-bbb8-49c6-bdb5-15b5a7f6ffef
LB-BZ-T	Duschtasse Stahl-Email	1,0000	100%	1,00	0,81	1	0,81	qm			8633a241-2785-4389-a646-1032c5b5506e
LB-BZ-T	Heizkörper	1,0000	100%	1,00	10,00	1	10,00	kg			c6de5beb-ffe9-4b5f-aba8-c0c2d3528c58
LB-BZ-T	Elektro Kabel	1,0000	100%	1,00	15,00	1	15,00	m			c812d890-4e1c-4293-bc81-6f5bd95d7930
LB-BZ-T	LED Leuchten	1,0000	100%	1,00	2,00	1	2,00	pcs.			43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
LB-BZ-T	Wasserleitungen Edelstahl	1,0000	100%	0,40	15,00	1	6,00	kg			4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
LB-BZ-T	Abwasserleitung	1,0000	100%	8,50	3,00	1	25,50	kg			64e16249-8051-483b-968e-46008a43ef18
LB-BZ-T	Badlüfter 60 m3/h	1,0000	100%	1,00	1,00	1	1,00	pcs.			c8cf7494-2f23-4193-a185-f7d4fdfa36b6
LB-BZ-T	Lüftungskanal	1,0000	100%	1,47	24,00	1	35,28	kg			b24ae8b5-e28a-42f7-a592-05779a347164
									1 psch.	Technik	
Technik	Heizkörper	1,0000	100%	1,00	210,00	1	210,00	kg			c6de5beb-ffe9-4b5f-aba8-c0c2d3528c58
Technik	Heizkörperleitung	1,0000	100%	1,00	210,00	1	210,00	kg			8622539c-592c-45b0-9a4b-e5f8b4fea367
Technik	Mineralwolle Rohrisolierung	1,0000	100%	1,00	0,50	1	0,50	m3			2691d6e4-a41e-40d7-92ca-680f8785fc1d
Technik	Umwälzpumpen	1,0000	100%	1,00	2,00	1	2,00	pcs.			b4e4d89b-e4d0-4df3-a233-deacc76b2fee
Technik	Pufferspeicher	1,0000	100%	1,00	150,00	1	150,00	kg			b273afc9-27a1-4a82-a390-8780fd631008
Technik	Übergabestation / Wasserbehandlung	1,0000	100%	1,00	100,00	1	100,00	kg			dcd5e23a-9bec-40b6-b07c-1642fe696a2e
Technik	Wandschalter	1,0000	100%	1,00	81,00	1	81,00	pcs.			bafc0f4a-7e8d-4536-b7b5-db8ca8f2ed75
Technik	Steckdose	1,0000	100%	1,00	270,00	1	270,00	pcs.			4cb7ca91-5be5-4fa6-99c1-99f597310351
Technik	Elektro Kabel	1,0000	100%	1,00	810,00	1	810,00	m			c812d890-4e1c-4293-bc81-6f5bd95d7930
Technik	LED Leuchten	1,0000	100%	1,00	10,00	1	10,00	pcs.			43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
Technik	Wasserleitungen Edelstahl	1,0000	100%	1,00	226,50	1	226,50	kg			4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
Technik	Abwasserrohr PP	1,0000	100%	1,00	60,00	1	60,00	kg			94355965-8d24-4e78-a910-9f35b8ae1193

Anhang 2, überarbeiteter Leitfaden

Im Rahmen von Einfach Bauen 2 wurde ein Leitfaden zusammengestellt, der Interessierten einen leichten Zugang zur Strategie Einfach Bauen vermittelt. Die Aussagen des Leitfadens wurde mit den Erfahrungen des Monitorings und der Befragung abgeglichen und noch entsprechend Passagen editiert oder ergänzt. Die Änderungen sind durch eine Markierung in grüner Farbe leicht nachvollziehbar.

Einfach Bauen

Ein Leitfaden

Mitwirkende

Dipl.-Ing. (FH) Architekt Tilmann Jarmer, M.A. (TUM)
Dipl.-Ing. Architektin Anne Niemann
Johannes Sack, M.Sc.
Laura Traub, B.A. Architektur
TUM – Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren
Prof. Dipl.-Ing. Florian Nagler

Laura Franke, M.Sc.
TUM – Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimage-
rechtes Bauen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Zsafia Varga, M.Sc.
Dipl.-Ing. Architekt Stephan Ott, M.A.
TUM – Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Fabian Diewald, M.Sc.
TUM – Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung
im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Förderer

B&O Gruppe, Bad Aibling

Stiftung Bayerisches Baugewerbe, München

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Bauen wird immer komplexer. Dies überfordert Planer und Baufirmen aber vor allem auch die späteren Nutzer. Inzwischen wurde mehrfach beobachtet, dass die Häuser in der Praxis nicht so funktioniert haben, wie in der Theorie vorgesehen. Dafür gibt es mehrere Gründe: Erstens passieren bei komplexen Projekten viele Fehler. Zweitens verhalten sich die Nutzer nicht so, wie sie es theoretisch sollten. Drittens ändern sich meist die Rahmenbedingungen nach einer gewissen Zeit in einer Art und Weise, die man nicht vorhersehen konnte. Da liegt es nahe zu überlegen, ob es nicht auch einfacher und robuster geht.

Die hier vorgestellten Inhalte basieren auf den Ergebnissen einer Grundlagenforschung, die von der Forschungsgruppe „Einfach Bauen“ an der TU München durchgeführt wurde. Mit Hilfe von mehreren tausend unterschiedlichen Raummodellen wurde untersucht, wie ein einfaches Haus aussehen muss, dass von sich aus im Winter wenig Energie benötigt und sich im Sommer nicht unnötig aufheizt. Dabei wurde das robuste Optimum gesucht, also eine Variante, welche gut funktioniert, unabhängig vom Zutun der Nutzer. Dadurch, dass die Gebäude auf das Wesentliche und Notwendige reduziert sind, ist es möglich, langlebige und umweltverträgliche Häuser zu schaffen – als Kontrapunkt zur aktuellen Entwicklung hin zu immer komplexeren, kurzlebigeren Gebäuden.

Auf dem B&O Parkgelände in Bad Aibling entstanden im Rahmen des Projekts drei Forschungshäuser mit monolithischen Wandaufbauten – eines komplett aus Holz, eines aus Mauerwerk und eines aus Leichtbeton.

Die Gebäude sind inzwischen bewohnt. In den Jahren 2021 und 2022 haben Dauermessungen das Raumklima, den Energieverbrauch und das Nutzerverhalten stattgefunden. Aus den Daten könnten dann Rückschlüsse über den Erfolg der Strategie Einfach Bauen gezogen werden. Bei dem hier vorliegenden Leitfaden handelt es sich um eine

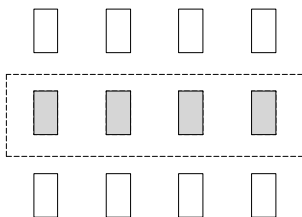
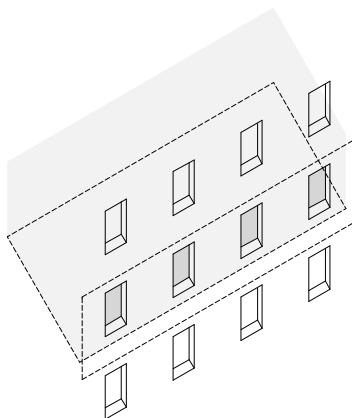
reduzierte überarbeitete Version des Leitfadens der im Birkhäuser Verlag erschienen ist. Der Fokus liegt hierbei auf den Kerninhalten. Der Leitfaden „Einfach Bauen“ fasst die im Forschungsprojekt ermittelten Grundlagen zusammen. Er ermöglicht Interessierten einen tieferen Einblick in die Strategie „Einfach Bauen“. Die Kapitel gehen aus von der Gebäudeform und befassen sich dann mit der konstruktiven Gestaltung, der Blick geht vom großen Ganzen bis ins Detail. Es wird jeweils erklärt, auf welche Projektparameter dabei besonderes Augenmerk gelegt werden sollte und warum. Am Ende eines jeden Abschnitts wird auf die konkrete Umsetzung bei den Forschungshäusern eingegangen.

Kompaktheit

»Hüllfläche reduzieren. Bauliche Dichte erhöhen.«

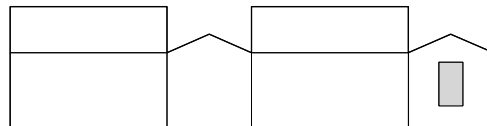
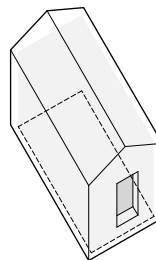
Gegenüberstellung von einer Stadtwohnung mit einem
Tiny House hinsichtlich Wohn- und Hüllfläche

Wohnung im Obergeschoss
Wohnfläche 72 m²



Hüllfläche gegen Außenluft
42 m²

Tiny House
Wohnfläche 18 m²



Hüllfläche gegen Außenluft
89 m²

Die Gegenüberstellung einer Stadtwohnung mit einem Tiny House zeigt es deutlich: Auch wenn man die Wohnfläche auf 18 m² reduziert, ist die Hüllfläche – also Dach, Außenwand und Fenster – doppelt so groß wie bei einer 72 m² großen Wohnung im Obergeschoss eines mehrstöckigen Hauses. Außenwände und Dächer sind die teuersten Flächenbauteile an einem Gebäude. Im Vergleich zu Innenwänden und Decken entstehen bei der Herstellung Mehrkosten von 50 - 300 EUR/m². [1] Die Hülle zu reduzieren spart also Geld.

Bauteile der Hülle sind deshalb teurer, weil sie gedämmt sein müssen. Dämmung behindert den Fluss von Wärmeenergie „von warm nach kalt“. Ein gedämmtes Haus verliert im Winter deshalb über die Außenhülle weniger Wärme an die Umwelt.

Außenwände und Dächer gut zu dämmen ist also sinnvoll. Noch besser ist es aber, die Fläche der Hülle selbst zu reduzieren. Dabei gibt es zwei Strategien:

1. Reduktion der Wohnfläche : Geht man effizient mit der Wohnfläche um, dann reduziert sich die notwendige Hülle automatisch mit.

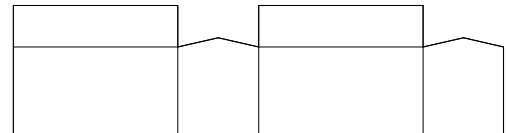
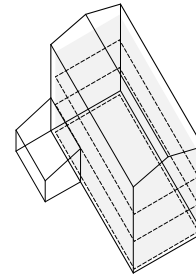
2. Kompakte Bauweise: Die Flächen der Außenwand und des Daches werden gegenüber der Wohnfläche reduziert. Eine städtische Blockrandbebauung zum Beispiel verfolgt diese Strategie besonders konsequent. Werden beide Strategien, also die Reduktion der Wohnfläche und eine kompakte Bauweise, miteinander kombiniert, wird dadurch der Materialeinsatz und der Energieverbrauch im Betrieb direkt gesenkt. Gleichzeitig werden häufig auch Umwelteinflüsse wie Flächenverbrauch, Erschließungsaufwand und Verkehrsaufkommen positiv beeinflusst. Es ist wichtig anzuerkennen, dass bauliche Dichte nicht nur auf der persönlichen, sondern auch auf der kommunalen, politischen und gesellschaftlichen Ebene verhandelt und entschieden wird. Ob es möglich ist, diese beiden Strategien einzeln oder kombiniert anzuwenden, hängt also von den eigenen Wünschen,

dem Bauplatz und dem Umfeld ab.

Umsetzung in den Forschungshäusern

Die Forschungshäuser in Bad Aibling bieten jeweils eine Wohnfläche von je 400 m² bei einer Hüllfläche von 870 m². Das Verhältnis von ca.1:2 ist günstig im Vergleich zum Tiny House (ca. 1:5) und ungünstiger als die Wohnung im Obergeschoss einer Blockrandbebauung (ca. 2:1).

Forschungshaus
Wohnfläche 400 m²

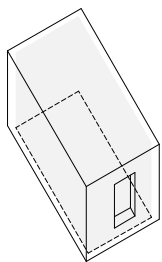


Hüllfläche gegen Außenluft
870 m²

Fenster

»Glasfläche der Fenster = 10 – 15 %
der zu belichtenden Raumfläche. Auf
Sonnenschutzverglasung verzichten.«

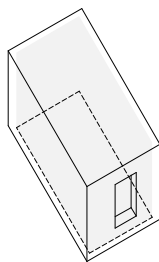
Wie groß muss das Fenster sein, um bei unterschiedlichen Glasarten den Raum mit derselben Lichtmenge zu versorgen?



zwei
Glasscheiben

$T_{vis} = 82 \%$

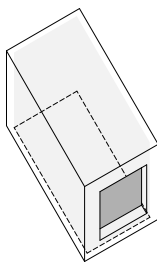
benötigte
Glasfläche
2,01 m²



2-Scheiben-
Isolierglas

$T_{vis} = 81 \%$

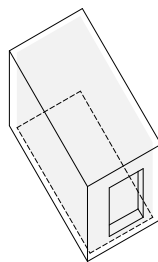
benötigte
Glasfläche
2,04 m²



2-Scheiben-
Sonnenschutzglas

$T_{vis} = 37 \%$

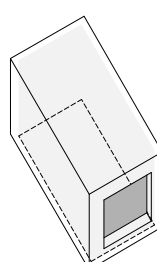
benötigte
Glasfläche
4,46 m²



3-Scheiben-
Isolierglas

$T_{vis} = 71 \%$

benötigte
Glasfläche
2,32 m²

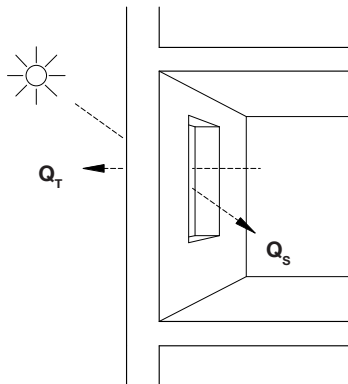


3-Scheiben-
Sonnenschutzglas

$T_{vis} = 36 \%$

benötigte
Glasfläche
4,58 m²

Energiebilanz Süd-Verglasung: Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Glasarten auf den Energiehaushalt des Raumes?



Sonneneinstrahlung pro Tag im Dezember: **720 Wh/m²**

Außentemperatur: **0,7 °C**

Innenraumtemperatur: **22 °C**

Himmelsrichtung: **Süden**

Raummaße B x T x H: **3 x 6 x 3 m**

Glasparameter

Lichttransmissionsgrad: **T_{vis}**

Gesamtenergiedurchlassgrad: **g**

Wärmedurchgang: **U_g**

	T _{vis} (Licht)	benötigte Fläche Glas
zwei Glasscheiben	82 %	2,01 m ²
2-Scheiben-Isolierglas	81 %	2,04 m ²
2-Scheiben-Sonnenschutzglas	37 %	4,46 m ²
3-Scheiben-Isolierglas	71 %	2,32 m ²
3-Scheiben-Sonnenschutzglas	36 %	4,58 m ²

g (Energie)	Q _s solare Gewinne	U _g in (Wärme)	Q _T Verluste Wärme	Bilanz Glas 24 h
77 %	1115 Wh	2,95 W/m ² *K	-3034 Wh	-1919 Wh
74 %	1085 Wh	1,18 W/m ² *K	-1229 Wh	-144 Wh
23 %	738 Wh	1,12 W/m ² *K	-2553 Wh	-1815 Wh
49 %	820 Wh	0,63 W/m ² *K	-748 Wh	72 Wh
20 %	660 Wh	0,62 W/m ² *K	-1452 Wh	-792 Wh

Am Übergang von Innen- zu Außenraum spielt das Fenster eine entscheidende Rolle. Der Blick nach draußen oder die Möglichkeit zu lüften sind bei jedem Fenster gegeben. Die Tageslichtversorgung ist dagegen vor allem von drei Faktoren abhängig: von der Größe des Fensters, der Glasart und der Einbausituation.

Vor allem die Größe und die Glasart stehen in direktem Zusammenhang. Im Bild oben sind die typischen Glasarten gegenübergestellt. Das erste Beispiel zeigt eine Verglasung aus zwei separaten, hintereinander angeordneten Scheiben, wie man sie in Altbauten heute noch häufig antreffen kann. Daneben folgen die vier heute gebräuchlichsten Isolierverglasungen. Diese Scheiben sind entlang der Ränder fest miteinander verbunden und die Zwischenräume mit speziellen Gasen gefüllt, um die Dämmwirkung der Scheiben zu erhöhen. Die Sonnenschutzgläser sind zusätzlich mit einer Beschichtung versehen, welche Anteile der Sonnenstrahlung reflektiert.

Wie viel Licht im Raum ankommt, hängt also von der Beschaffenheit des Fensterglases ab. 3-Scheiben-Isolierglas lässt 71 % des sichtbaren Lichtes durch. Bei 3-Scheiben-Sonnenschutzglas sind es lediglich 36 %; der übrige Teil wird von der aufgetragenen Beschichtung reflektiert.

Je nach Glasart muss also die Fläche entsprechend gewählt werden, um zu erreichen, dass der Raum ausreichend Tageslicht erhält. Bei Sonnenschutzglas muss das Fenster deshalb etwa doppelt so groß sein, um den Raum mit der gleichen Tageslichtmenge versorgen zu können.

Gleichzeitig hat die Wahl des Glases aber auch Auswirkungen auf dessen energetische Bilanz. Der Energieaustausch findet bei Fenstern auf zwei Wegen statt. Erstens werden das Tageslicht und die Wärmestrahlung der Sonne als Wärmeenergie in den Raum eingetragen. Man spricht hierbei von solaren Gewinnen (Q_g). Zweitens findet ein Wärmeaustausch

über das Fenster statt, wenn innen und außen unterschiedliche Temperaturen herrschen. Dies bezeichnet man als Transmissionswärmeverluste (Q_t). Dieser Effekt ist im Winter besonders groß. Beide Effekte, also solare Gewinne und Wärmeverluste über das Glas, finden dabei gleichzeitig statt.

Der hier vorgestellte Vergleich zeigt die Gesamtbilanz für einen Tag-Nacht-Zyklus dar. Dabei werden sämtliche Energiegewinne und -verluste über diese Zeit betrachtet. Es wurde davon ausgegangen, dass das Fenster nach Süden zeigt, im Raum eine Temperatur von 22 °C und eine Außentemperatur von 0,7 °C herrscht. Der Wert für die Sonneneinstrahlung ist ein empirisch ermittelter typischer Wert für den Monat Dezember. [2]

Die Verglasung, die aus zwei separaten, hintereinander angeordneten Scheiben besteht, hat eine negative Energiebilanz. Die Wärmeverluste (3.034 Wh) sind also größer als die solaren Gewinne (1.115 Wh). Dem Raum müssen deshalb täglich 1.919 Wh zugeführt werden. Anderenfalls würde die Innenraumtemperatur absinken. Das entspricht ungefähr der Energie, die eine Mikrowelle mit einer Leistung von 2000 W in einem einstündigen Dauerbetrieb verbraucht.

Die Isoliergläser haben eine bessere Energiebilanz. Die Verglasung mit 2 Scheiben benötigt 144 Wh, die Verglasung mit 3 Scheiben erreicht sogar ein Plus von 72 Wh, gewinnt also insgesamt Energie.

Erstaunlich schlecht ist das Ergebnis bei den Sonnenschutzgläsern. Das 3-Scheiben-Glas produziert einen Verlust von 792 Wh. Das 2-Scheiben-Sonnenschutzglas ist mit einem Verlust von 1.815 Wh sogar fast so schlecht wie die Altbau-Verglasung.

Das liegt zum einen daran, dass die Sonnenschutzgläser jeweils mehr als doppelt so groß sind, um die Tageslichtversorgung erreichen zu können, und dadurch eben auch mehr Wärmeverluste haben. Den größten Anteil an der schlechten Performance hat aber die Sonnenschutzbeschichtung, die die solaren

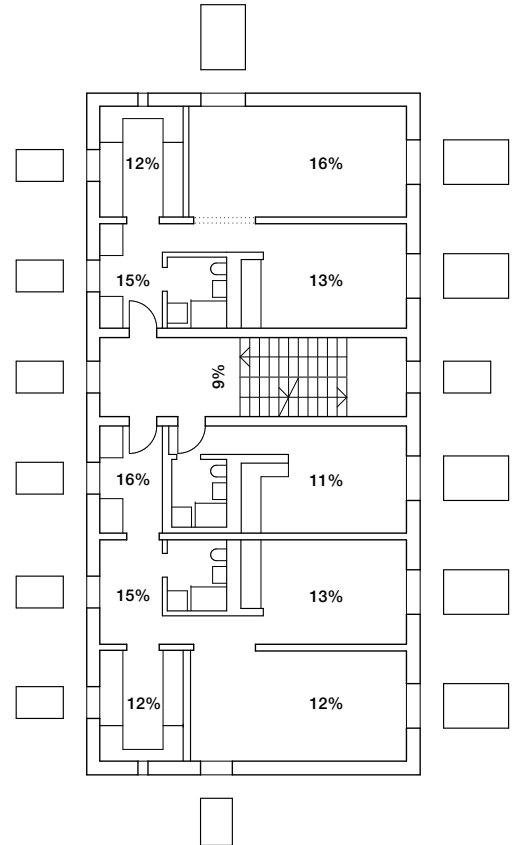
Gewinne reduziert. Man sollte deshalb 2-Scheiben- oder 3-Scheiben-Isoliergläser verwenden und auf eine Sonnenschutzbeschichtung verzichten. Die Größe der Fenster sollte so gewählt werden, dass eine ausreichende Tageslichtversorgung gegeben ist. Als Daumenregel kann man sich merken, dass die Größe der Glasflächen ca. 10 bis 15 % der zu belichtenden Raumfläche entsprechen sollte, damit der Raum ausreichend belichtet ist und weder Sonnenschutzverglasung noch Sonnenschutz benötigt werden. Die Himmelsrichtung spielt bei der Tageslichtversorgung keine entscheidende Rolle. An trüben Tagen, wenn die Tageslichtversorgung besonders kritisch ist, beträgt der diffuse Anteil des Sonnenlichtes nahezu 100 %. Die Himmelsrichtung hat in diesem Fall also keinen Einfluss. [3]

Wichtig ist die Einbausituation. Bei bedecktem Himmel ist das Licht vom Zenit etwa drei Mal stärker als jenes vom Horizont. Hohe Räume mit hoch angesetzten Fenstern bringen viel Tageslicht aus einem zenitnahen Bereich in den Raum. Eine Belichtung von mehreren Seiten schafft gleiche Helligkeit bei ausgeglichenen Kontrasten. [4]

Umsetzung in den Forschungshäusern

Für die Forschungsgebäude wurden durchgängig 3-Scheiben-Isoliergläser eingesetzt. Die Dreifachverglasung lässt 70 % des sichtbaren Anteils der solaren Strahlung passieren. Entsprechend beträgt der Anteil der Glasfläche in Bezug zur jeweiligen Raumgröße zwischen 12 % und 16 % in den Räumen der Wohnungen und 9 % im Treppenraum. Dadurch ist der solare Wärmeeintrag im Sommer nicht sehr hoch, weil die Fenster nur so groß sind, wie für eine angemessene Versorgung mit Tageslicht notwendig ist. Die Fenster sind auf die Innenseite der Wand gesetzt. Die Laibung wirft einen Schatten auf die Fenster und reduziert so den Wärmeeintrag zusätzlich.

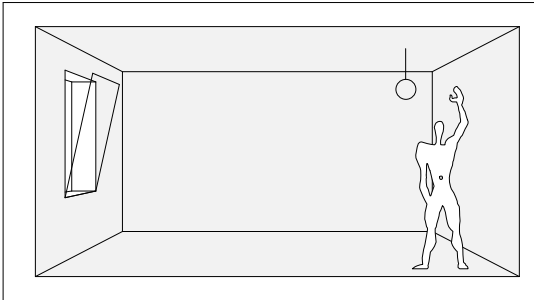
Obergeschoss eines Forschungshauses: Anteil der Glasfläche der Fenster im Verhältnis zu der zu belichtenden Raumfläche



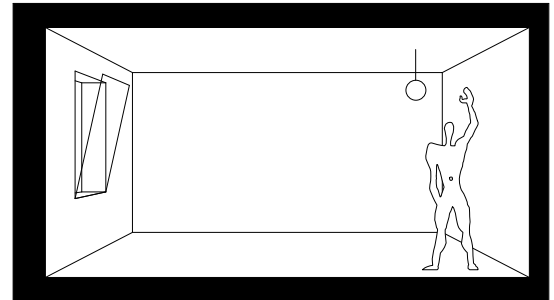
Thermische Trägheit

»Eine schwere Bauweise speichert die Temperatur.
Über Nachtlüftung kühlt die thermische Masse ab.«

Energie, die benötigt wird, um die Raumluft oder die den Raum umschließenden Bauteile zu erwärmen



Raumluft um
1 Grad erwärmen:
18 Wh



Bauteile des Raumes um
1 Grad erwärmen:
2.500 - 5.500 Wh

Gebäude mit einer hohen Masse verhalten sich thermisch träge. Jeder kennt Orte wie Kirchen oder Kellerräume, die auch im Sommer kühl bleiben.

Luft hingegen ist das genaue Gegenteil eines trägen Bauteils. Wenig Energie, und zwar 18 Wh, reicht, um die Luft in einem Raum mit einem Volumen von 55 m³ um ein Grad zu erwärmen. Das entspricht der Wärme, die zwei Personen in 5 Minuten abgeben oder die Mittagssonne durch ein normales Südfenster innerhalb von 5 Minuten einträgt. [3]

Gäbe es die thermische Trägheit des Gebäudes nicht, würde es im Innenraum schnell sehr warm werden. Man kann sich das Gebäude wie eine thermische Batterie vorstellen, die die Temperatur der Raumluft immer wieder ausgleichen kann. Die Kapazität dieser „Batterie“ ist abhängig von der Bauweise des Gebäudes. Leichte Bauweisen haben pro Raum eine Kapazität von 2.500 Wh/K, schwere Bauweisen sogar von 5.500 Wh/K. Das bedeutet, dass man 2,5 bis 5,5 kWh braucht, um alle den Raum umschließenden Bauteile um ein Grad zu erwärmen.

Beobachten wir die Wirkung dieser „Batterie“ an einem Sommertag: Immer wenn die Temperatur im Raum um ein Grad steigt, kühlen Decke und Wände die Raumluft wieder ab. Je nach Bauweise wird dieser Zyklus 140- bis 300-mal durchlaufen, bevor die Temperatur der Decken und Wände um 1 Grad gestiegen ist. Die „Batterie“ funktioniert weiter, das gesamte System ist allerdings ab jetzt um ein Grad erwärmt.

In der darauffolgenden Nacht kehrt sich der Energiefluss um. Wenn kühlere Nachtluft in den Raum gelangt, kühlen Decken und Wände sich wieder ab. Die „Batterie“ ist für den nächsten Sommertag geladen.

Der Vergleich mit einer Batterie hilft auch bei der Überlegung, wie groß die thermische Trägheit eines Gebäudes sinnvollerweise sein soll. Eine „kleine“ Batterie reicht, wenn diese nicht zu sehr beansprucht und regelmäßig aufgeladen wird. Ist der Raum also

vor der Sonne geschützt oder die Nachtentwärmung wird immer konsequent betrieben, reicht eine leichte Bauweise. Ist mit viel Sonne zu rechnen oder möchte man, dass die thermische Trägheit auch ohne Nachtentwärmung mehrere Tage hintereinander wirksam bleibt, ist es sinnvoll, eine „große“ Batterie zu besitzen, also viel thermisch träge Masse im Haus zu haben.

Durch Einrichtung und Möbel werden die Effekte der thermischen Trägheit in ihrer Wirkung verlangsamt, weil das Mobiliar die Flächen abdeckt und dadurch den Austausch zwischen Wänden und Boden mit der Raumluft reduziert. Im bewohnten Zustand hat deshalb die Decke den größten Einfluss.

Wenn sich die Raumluft besonders schnell erwärmt, wirkt auch noch ein weiterer Effekt. Die von uns wahrgenommene Temperatur ist nämlich nicht nur abhängig von der uns umgebenden Luft, sondern auch von der Temperatur der uns umgebenden Oberflächen. Das bedeutet, solange die Temperatur der uns umgebenden Oberflächen wie Wände und Decken konstant bleibt, empfinden wir die Erwärmung der Raumluft als weniger unangenehm. Der Fachbegriff dafür ist operative Temperatur. Diese wird aus dem Mittelwert aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der umgebenden Oberflächen ermittelt.

Auch das fünf-minütige Stoßlüften im Winter funktioniert in Räumen mit viel thermischer Trägheit gut. Kurze Zeit nachdem wir das Fenster wieder geschlossen haben, empfinden wir den Raum als angenehm warm, obwohl fast die gesamte verbrauchte Raumluft durch kühlere Außenluft ersetzt wurde. Die operative Temperatur ist nur geringfügig gefallen, die Bauteile werden die Raumluft bald wieder erwärmt haben.

Umsetzung in den Forschungshäusern

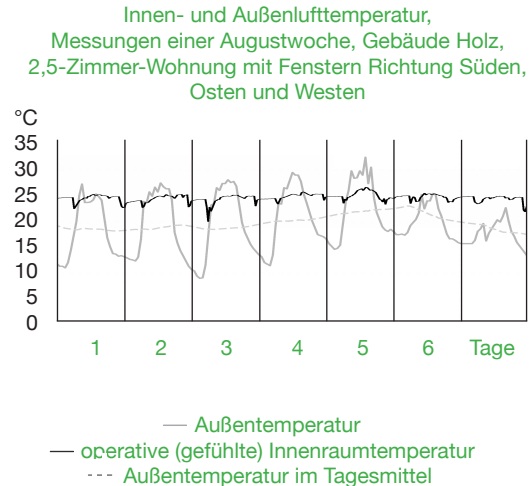
Alle drei Forschungshäuser haben eine Decke aus

Stahlbeton. Die tragenden Innenwände sind je nach Bauweise aus Beton, massivem Holz oder Vollziegeln. Dadurch ergibt sich eine hohe thermische Trägheit, das System wird robust. Das Betonhaus hat die größte Speichermasse mit 5600 Wh/K je Raum, das entspricht dem 300-Fachen der umschlossenen Luft. Aber auch das Holzhaus mit 3300 Wh/K je Raum fällt noch in die Kategorie „schwere Bauweise“. Das Mauerwerkshaus liegt mit 4400 Wh/K je Raum fast genau dazwischen.

Ein weiterer Baustein zur Nutzung der thermischen Trägheit der Bauteile ist die Möglichkeit einer effektiven Lüftung während kühler Sommernächte. Dadurch, dass in fast allen Wohnungen mehrere Fenster zu verschiedenen Gebäudeseiten vorhanden sind, kann quergelüftet werden. Das funktioniert deshalb besonders gut, weil schon leichte Winde dafür sorgen, dass eine gute Lüftung in der Wohnung stattfindet. Eine weitere Maßnahme, um die Nachtlüftung effektiv zu ermöglichen, ist der Einsatz von Schwingfenstern (siehe Abbildung 16). Dabei hat das Fenster seinen Drehpunkt mittig. Schon in der minimalen Kippstellung findet ein guter Luftaustausch statt, da sich jeweils oben und unten eine Öffnung ergibt. Die warme Luft kann oben entweichen und die kühle Nachtluft unten nachströmen.

Die Grafik zeigt eine Woche im August. Die drei Linien bilden die gemessene Außenlufttemperatur, die operative Innenraumtemperatur und die Außenlufttemperatur im Tagesmittel dar. Die Außenlufttemperaturen lagen zwischen 30 °C am Freitagnachmittag und ca. 8 °C in der Nacht zum Mittwoch. Die operative Temperatur, also die gemittelte Temperatur aller Oberflächen des Raumes und der Raumluft, steigt hingegen nicht über 25 °C. Die Messungen belegen gut, wie die thermische Trägheit der Bauteile ausgleichend auf das Raumklima wirkt. Am Zappeln der Kurve kann man das Lüftungsverhalten der Bewohner erkennen, die vor allem morgens und abends kräftig durchlüften.

Die Messergebnisse für eine Woche im August zeigen:
Die Temperaturen bleiben angenehm konstant.

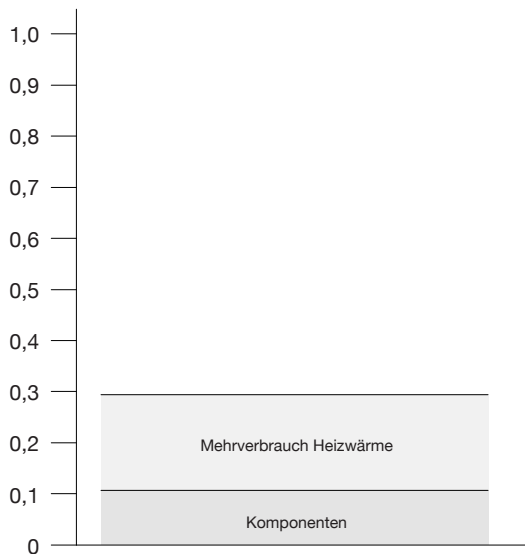


Robuste Technik

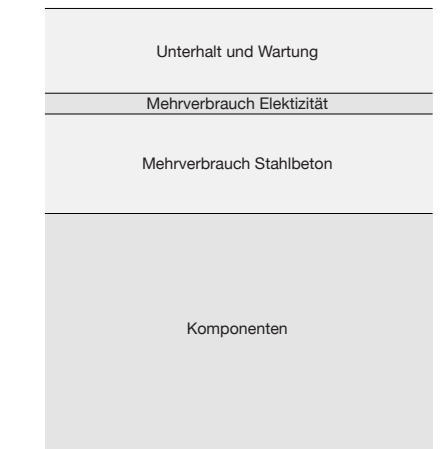
»Robuste und reduzierte Techniksysteme einsetzen.
Das Verhalten der Nutzenden berücksichtigen.«

Umweltauswirkung verschiedener Lüftungssysteme der Wohnsiedlung Klee in Zürich-Affoltern, bezogen auf 1 m² beheizte Nutzfläche und ein Jahr; eigene Darstellung nach Knecht und Sigrist [5].

Treibhauspotential
in kg CO₂-Äq./m₂a



Fensterlüftung & Abluft



Zentrale Lüftungsanlage mit
Wärmerückgewinnung

Etwa 20 % der gesamten Lebenszykluskosten eines Gebäudes fallen während der Planungs- und Bauphase an. Die restlichen 80 % der Kosten gehören zur Nutzungsphase.

Ein großer Teil dieser Kosten entfällt auf den Energieverbrauch. Seit einigen Jahren wird versucht, diesen Verbrauch zu senken, indem zum Beispiel mehr Dämmung verbaut bzw. nachgerüstet wird. Auch technische Systeme, zum Beispiel die Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung, stehen im Ruf, den Energieverbrauch des Gebäudes und die damit einhergehenden Kosten und negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Dass diese Maßnahmen aber häufig nicht die gewünschten Einsparungen erreichen, zeigt die Grafik auf den vorherigen Seiten: In der Wohnsiedlung Klee in Zürich-Affoltern wurden in einer Langzeitmessung die Daten der Lüftungssysteme aufgezeichnet. [5]. Die materialintensive zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung wurde über den gesamten Lebenszyklus verglichen mit dem einfachen Konzept der Fensterlüftung mit Badabluft. Es stellt sich heraus: Der Mehraufwand bei Technik, Betriebsenergie, Unterhalt und Wartung übersteigt die erzielte Einsparung der Heizenergie bei Weitem. Abbildung 19 zeigt sogar, dass die zentrale Lüftungsanlage gegenüber der Fensterlüftung mit Badabluft einen dreifach erhöhten negativen Einfluss auf die Erderwärmung (Treibhausgaspotenzial) produziert.

Immer wenn theoretisch berechnete Ergebnisse von der Praxis abweichen, spricht man von einem „Performance Gap“, also einer Lücke zwischen Theorie und Praxis. [6] Der Performance Gap zwischen Planung und Betrieb entsteht hauptsächlich auf den Ebenen der Gebäudetechnik und des Nutzerverhaltens. [6] [7] Das Konzept Einfach Bauen versucht diese Lücke durch reduzierte und robuste Technikkonzepte möglichst klein zu halten.

Zuerst möchten wir die drei wichtigsten Effekte kurz beschreiben, die diese Lücke erzeugen und die bereits mehrfach untersucht wurden. [6] [7] [8]:

1. Das Verhalten der Nutzerschaft wird falsch eingeschätzt.

Nutzerinnen und Nutzer verhalten sich anders als prognostiziert: In energetisch optimierten Gebäuden lassen sich während der Heizperiode durchschnittlich höhere Innenraumtemperaturen oder häufigeres Fensteröffnen beobachten. Das heißt, Nutzerinnen und Nutzer verschwenden bei Gebäuden mit erhöhtem Wohnkomfort durch ihr Verhalten mehr Energie als erwartet. Dieser Effekt wird Rebound-Effekt genannt. [9] Im Gegensatz dazu verhält sich die Nutzerschaft in Altbauten im Durchschnitt energiesparender als prognostiziert. Zum Beispiel werden hier im Winter nur Teile der Wohnung bzw. des Hauses beheizt oder es wird nur reduziert gelüftet. Dies wird als Prebound-Effekt bezeichnet. [9]

Ein anderer Grund sind die statischen Komfortmodelle und vereinfachte Berechnungsmethoden nach Norm, die die Nutzerinnen und Nutzer nicht realistisch und flexibel genug abbilden: [10] Seit den 1950er-Jahren gab es mehrere Studien, die zur Erhebung von Verhaltensdaten durchgeführt wurden. [11] Bisher stützt sich die Theorie auf statistische Modelle, die auf solchen empirischen Datensätzen basieren. [12] Hinter diesen Daten steht jedoch eine eingeschränkte Anzahl an Nutzerinnen und Nutzern, deren Komfortempfinden nur in einer Laborumgebung getestet wurde.

2. Die Technischen Systeme funktionieren nicht richtig. Wer technische Systeme betreibt bzw. Energie plant, erlebt beispielsweise, dass die Stellmotoren der Fußbodenheizung nach dem Einbau nicht von „manuell“ auf „automatisch“ umgestellt werden oder dass die Photovoltaikanlage mangels verständlicher Anlagenbeschreibung keinen PV-Strom in das öffentliche Netz ausspeist. [13] Ohne eine

regelmäßige und konsequente Kontrolle – also ohne Monitoring – fallen diese Fehler nicht auf, obwohl sie leicht zu beheben sind und einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch haben.

Vor allem im Geschosswohnungsbau lässt sich beobachten: Nutzerinnen und Nutzer in Gebäuden mit maschineller Lüftung und Wärmerückgewinnung öffnen trotzdem die Fenster, sodass der gemessene Energiebedarf den prognostizierten um ein Vielfaches übersteigt. Hingegen wird bei natürlich gelüfteten Häusern der prognostizierte Energiebedarf eingehalten oder sogar leicht unterschritten. Eine maschinelle Lüftung ist demnach im Geschosswohnungsbau keine robuste Lösung. [5]

3. Der Verbrauch für den Betrieb der technischen Systeme wird unterschätzt.

Generell sind heutzutage die Komponenten für ein technisches Anlagensystem in guter Qualität mit geringem Energiebedarf auf dem Markt verfügbar. Es ist aber eine Kunst, diese wie bei einem Puzzle so zusammenzusetzen, dass das System funktioniert und die Bestandteile optimal abgestimmt sind. Am Beispiel von energieeffizienten Pumpen kann dies verdeutlicht werden: Trotz energiesparender Technologie sind die hydraulischen Systeme meist mit viel zu hohen Druckverlusten behaftet, sodass der Energiebedarf des Pumpstroms oft unnötig hoch ist. Mangelhaft eingestellte Betriebspunkte und eine falsche Auslegung führen zu diesen hohen Energiewerten.

Um die oben genannten Effekte zu reduzieren und den Performance Gap zu schließen, sollten bei der Konzeption der technischen Systeme folgende Ziele verfolgt werden:

1. Nutzerinnen und Nutzer regeln selbst.

Anstelle komplexer Regelungstechnik, welche den Innenkomfort statisch regelt, sollen die Nutzerinnen und Nutzer den Komfort selbst nach ihrem individuellen Empfinden adaptiv regeln können (Nutzerinteraktion).

Zusätzlich ist es sinnvoll, sie zu sensibilisieren, damit sie nicht unwissentlich unnötig Energie verschwenden (Nutzerbewusstsein). Die Erfahrung zeigt dabei, dass sie sich thermisch komfortabler fühlen, wenn sie selbst eingreifen können. [7] [14]

2. So einfach wie möglich! Nur das Nötigste einbauen! Eine einfache Gebäudetechnik ist gegenüber komplexen Systemen weniger anfällig bezüglich Systemfehlern, Fehlbedienungen und Ausfällen technischer Komponenten. Eine einfache Technik kann auch noch in vielen Jahren einfach gewartet und verändert werden. Nur wenn man das Techniksystem in seiner Gesamtheit erfassen kann, ist es möglich, in der Konzeption, aber auch bei zukünftigen Veränderungen die richtigen Entscheidungen zu treffen. Eine einfache Gebäudetechnik, im Sinne von robusten, passiven und gleichzeitig nutzergeregelten Systemen, führt nicht nur zu einem reduzierten Energiebedarf und geringeren Installationskosten, sondern erhöht gleichzeitig die Nutzerzufriedenheit (siehe Punkt 1. Nutzerinnen und Nutzer regeln selbst) und reduziert den Performance Gap.

3. Technik richtig bewerten

Je weniger Technik in einem Gebäude betrieben werden muss, desto weniger Energie wird für dessen Betrieb benötigt. Zusätzliche Techniksysteme sollten nur dann Anwendung finden, wenn diese auch bei abweichendem Verhalten der Nutzerschaft noch erfolgreich funktionieren. In die Bewertung sollten nicht nur die Kosten für die zusätzliche Technik selbst, sondern auch der Platzbedarf, der Wartungsaufwand und der Energieverbrauch im Betrieb mit einbezogen werden – und künftig auch die Umweltauswirkung in Form des Treibhausgaspotenzials.

Umsetzung in den Forschungshäusern

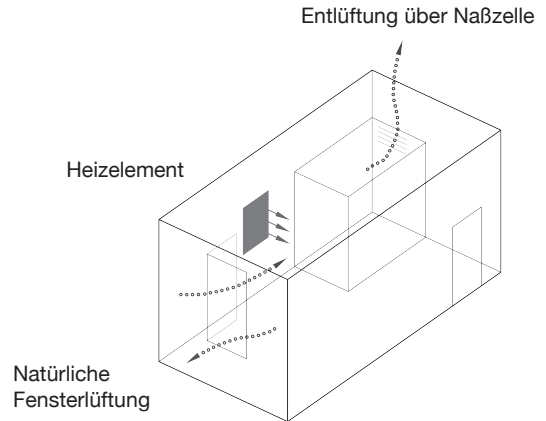
Bei den Forschungshäusern sorgen die Nutzerinnen

und Nutzer selbst für Frischluftzufuhr über die Fenster. Die Wärmeversorgung erfolgt vor Ort über eine Nahwärmenetz, das von Holzkesseln und Solarthermie mit Wärme versorgt wird. Eine Gaskessel deckt Lastspitzen ab und erzeugt Redundanz. Die Heizung wird über die Thermostatventile der Heizkörper gesteuert, die Beleuchtung über Lichtschalter.

Das ganz normale Wohnen produziert zusätzliche Feuchtigkeit im Raum, sei es durch Atmen, Kochen, Duschen, Wäschetrocknen oder Grünpflanzen. Wenn diese Feuchte über längere Zeit nicht durch Lüften wieder aus dem Haus gebracht wird, kann es sein, dass es zu Schäden am Gebäude kommt. Zum Beispiel, weil die Feuchte in der Luft an der Innenseite der Außenwände kondensiert. In den durchfeuchteten Bauteilen kann dann Fäule oder Schimmel entstehen. Um das zu vermeiden, wird in manchen Mietverträgen eine bestimmte Mindestlüftung durch die Bewohnerinnen und Bewohner festgelegt. Das Ziel dieser Festlegungen ist es, die Feuchte in der Luft zu kontrollieren. Problematisch ist dabei, dass die Verantwortung für Feuchteschäden dadurch auf die Mieterinnen und Mieter übergeht.

Die Forschungshäuser wurden dagegen so konzipiert, dass die darin Wohnenden sich so verhalten können, wie sie möchten. Es gibt keinen Lüftungszwang. Bei geschlossenem Fenster wird der Mindestluftwechsel zum Feuchteschutz über Lüftungsschlitze im Fensterfalz – sogenannte Fensterfalzlüfter – erreicht. Der Luftaustausch wird über die Abluftventilatoren in den innenliegenden Bädern angeregt. Das betätigen des Lichtschalters im Bad gibt das Signal zum Betrieb des Badlüfters der dann für mindestens 15 Minuten lang durchläuft. Danach regelt die Steuerung des Lüfters die Förderleistung von 60 m³/h auf 15 m³/h zurück. Durch diesen reduzierten Dauerbetrieb wird ein Mindestluftwechsel in den Wohnungen erzeugt, der ca. alle fünf Stunden die Luft einmal austauscht und so Raumluftfeuchte aus den Wohnungen abführt.

Während der Langzeitmessung wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren sowohl der Energieverbrauch, das Raumklima und das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer erfasst. Die gewonnenen Daten bestätigen, dass die Strategie in den Forschungshäusern in der Praxis funktioniert. Die erhobenen Daten konnten auch dabei helfen, das Verhalten der Nutzerschaft besser zu verstehen. So ist es zukünftig möglich, Optimierungen besser auf Praxisstauglichkeit einzustellen. Mit den Messdaten könnten auch die bisher verwendeten Simulationstools überprüft und für die Zukunft kalibriert werden.



Forschungshäuser in Bad Aibling - Schema des einfachen Lüftungskonzepts Fensterlüftung mit Badablüfter

Systemtrennung

»An zukünftige Nutzungen denken. Varianten einplanen.
Die technischen Systeme von der Konstruktion trennen.«

Lebensdauer von Bauteilschichten [15]

Einrichtung: ± 5 Jahre

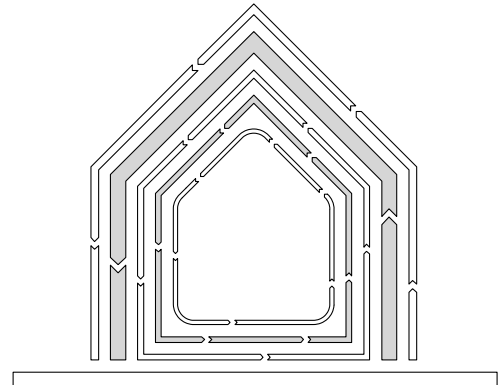
Raumnutzung: ± 10 Jahre

Technische Systeme: ± 20 Jahre

Hülle: ± 50 Jahre

Konstruktion: ± 100 Jahre

Bauplatz: ∞ (± 2 Milliarden Jahre)



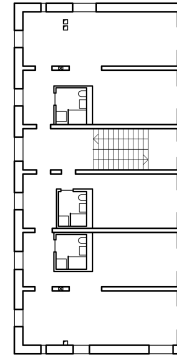
Häuser werden von uns als statisch wahrgenommen. Daher bezeichnen wir diese auch als „Immobilie“ im Gegensatz zum beweglichen „Mobiliar“. Betrachtet man ein Gebäude aber über eine Zeitspanne von 100 Jahren oder länger, wird schnell deutlich: Viele Teile des Gebäudes durchlaufen mehrere Zyklen der Veränderung. Die Zyklen dabei möglichst auszudehnen und dadurch den Umbau zu verzögern, ist eine gute Idee. Irgendwann ist trotzdem die Zeit gekommen, dass bestimmte Teile erneuert oder zumindest verändert werden müssen. Eine konsequente und bereits in der frühen Planung angedachte Systemtrennung erleichtert das enorm. Damit ist eine Trennung technischer und baulicher Systeme gemeint. Ein Heizkörper ist zum Beispiel leichter auszutauschen als eine Fußbodenheizung

Umsetzung in den Forschungshäusern

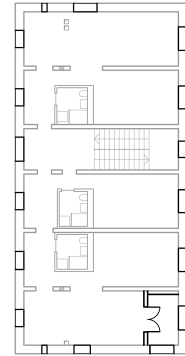
Die Konstruktion und Fügung der Bauteile ist so gestaltet, dass Flächenverbindungen möglichst vermieden und alle Bauteilschichten zugänglich und lösbar oder mit Einzelverbindungen ausgebildet wurden. Dadurch erhöht sich die Reparatur- und Austauschfähigkeit und somit die Lebensdauer der einzelnen Bauteile.

Beim Entwurf wurde darauf geachtet, dass die Gewerke nacheinander und nicht, wie oft üblich, gleichzeitig am Bau arbeiten. Überschneidungen wurden so weit wie möglich vermieden. Das sorgt einerseits für einen problemärmeren Bauablauf, hat aber auch den wertvollen Nebeneffekt, dass bei späteren Änderungen quasi in umgekehrter Reihenfolge wieder zurückgebaut werden kann, ohne unnötige Zerstörungen zu produzieren. Auch bei der Gebäudetechnik wurde die Trennung der Gewerke angestrebt. Leitungen sind in wenigen Steigschächten zentral gebündelt und führen direkt an Badfertigzellen vorbei durch die Wohneinheiten. Alle Bedienelemente wie Unterverteilung und Absperreinrichtungen sind möglichst dicht an

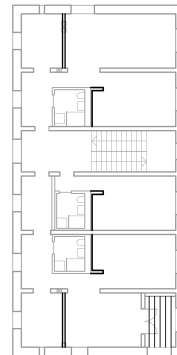
diesem Schacht positioniert. Die weitere Verteilung erfolgt revisionierbar in Sockelleisten oder einfach als Aufputz-Installation.



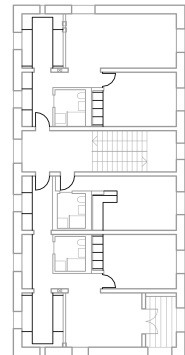
Rohbau



Hülle



Ausbau

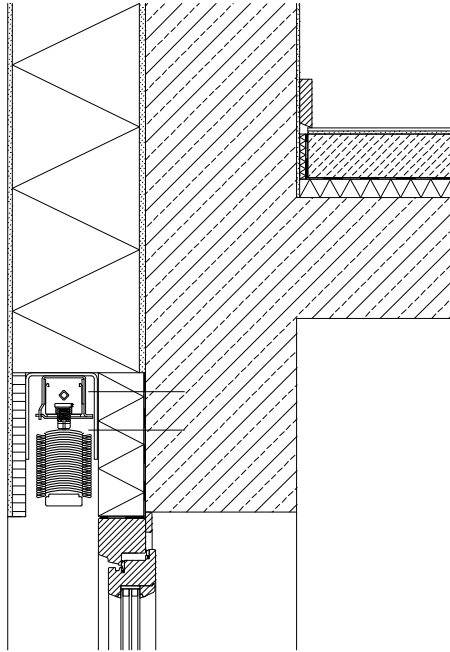


Einbauten

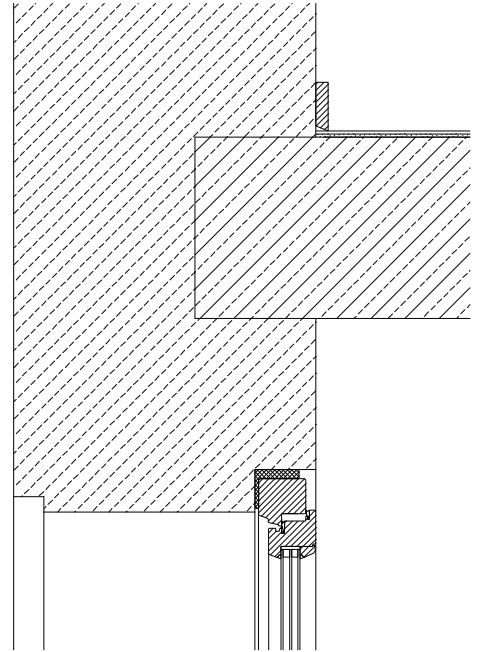
Materialgerechte Konstruktion

»Wenige, sortenreine Bauteilschichten verwenden.
Zu robusten und langlebigen Konstruktionen fügen.«

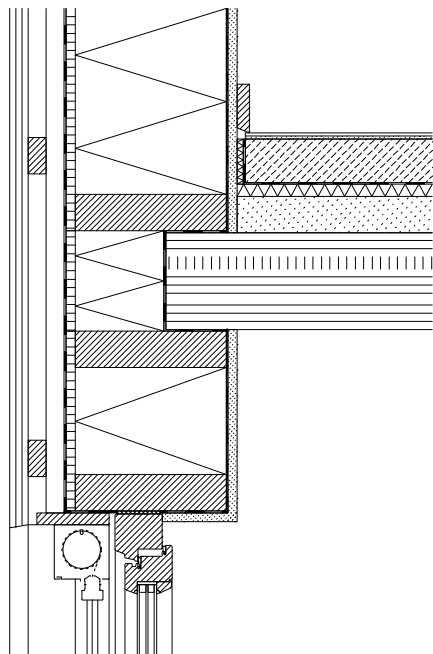
Vergleich Standard-Wandaufbau mit monolithischer
Bauweise der Forschungshäuser



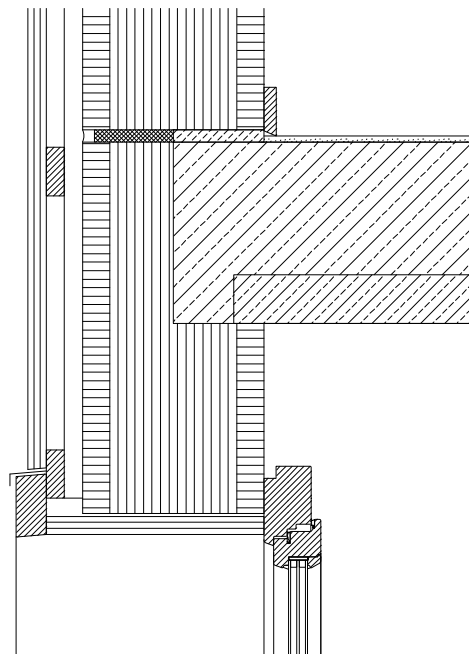
Beton - übliche Konstruktion



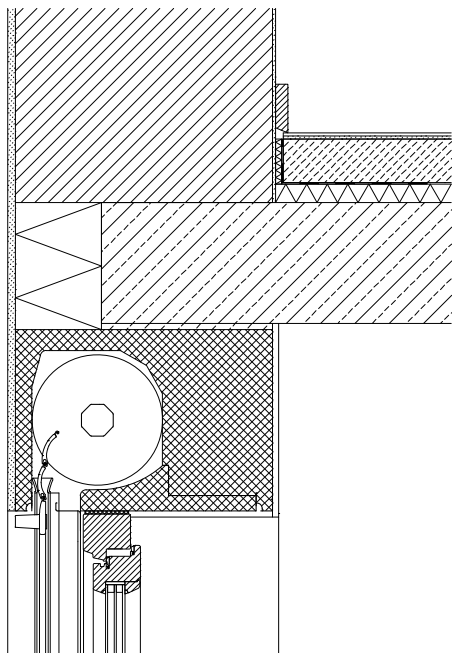
Beton - Einfach Bauen



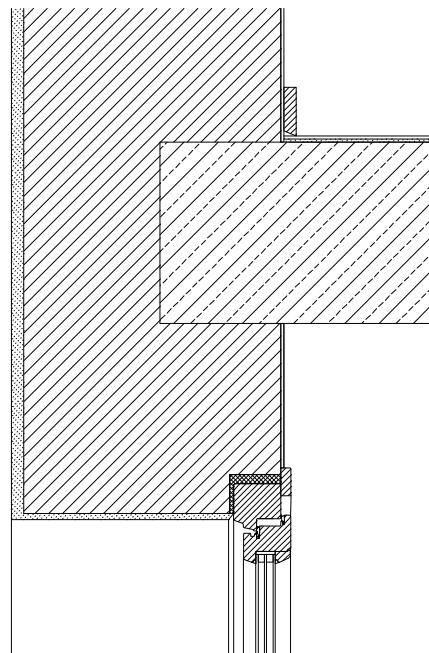
Holz - übliche Konstruktion



Holz - Einfach Bauen



Mauerwerk - übliche Konstruktion



Mauerwerk - Einfach Bauen

Lärm, Regen, Wind, Kälte oder Hitze – die Außenwand schützt uns vor unangenehmen Umwelteinflüssen. Gleichzeitig ist die Außenwand meist Teil des Tragwerks und bestimmt als Fassade die Gestalt des Hauses im Stadtbild. Vor allem bei den Dämmeigenschaften sind die Ansprüche in den letzten Jahren weiter gestiegen. Deshalb werden Außenwände häufig aus mehreren Schichten konstruiert, die Unterschiedliches leisten.

Üblicherweise bildet eine Schicht aus Mauerwerk, Stahlbeton oder Holz das Tragwerk und sorgt mit ihrer Masse für Schallschutz und thermische Trägheit. Die in der Regel außen angebrachte Schicht aus Dämmstoffen garantiert die Wärmeisolation der Außenwand. Den Abschluss bildet die Fassade als Gestaltungselement und wetterabweisende Schicht. Wir sprechen hier von einer Strategie der Materialschichtung.

Eine andere Strategie sind Materialmischungen. Der Baustoffhandel bietet viele Mauersteine mit einer Füllung aus Dämmstoffen an. Ergänzt werden sie durch Sonderbauteile wie gedämmte Fensterstürze oder Sondersteine, die zum Beispiel entlang des Auflagers der Decken zum Einsatz kommen. Häufig werden heute beide Strategien in Kombination verfolgt. Macht man sich nun Gedanken über die weitere Zukunft der Gebäude, stellen sich Fragen: Welcher Instandhaltungsaufwand entsteht, wenn verschiedene Schichten das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben? Sind Ersatzteile für das Gebäude auch zukünftig verfügbar? Kann ich die Teile des Gebäudes wiederverwenden oder Materialmischungen wieder voneinander trennen? Ganz allgemein: Wie steht es um die Nachhaltigkeit?

Umsetzung in den Forschungshäusern

Am Anfang des Kapitels sind die Fügungen der Bauteile Außenwand, Fenstersturz und Decke dargestellt. Links sind heute übliche Konstruktionen platziert. Rechts daneben sind die einfachen Konstruktionen

gegenübergestellt, welche für die Forschungshäuser in Bad Aibling entwickelt und angewendet wurden.

Besondere Materialien und eine Konstruktion, die den Eigenschaften des Materials folgt, machen diese Vereinfachung möglich. Die verschiedenen Fensterformen ergeben sich aus den jeweiligen spezifischen Möglichkeiten des Materials, die Fensteröffnung zu überspannen. Holz ermöglicht eine rechteckige Fensterform, da die Holzfasern als Träger wirken. Die Wand aus Infralichtbeton ist ohne Stahl gebaut. Auf diesen konnte aufgrund der materialgerechten Statik des Gebäudes verzichtet werden. Das ist sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll, da der Stahl zwar nur ca. 5 – 15 % der Masse ausmacht, aber für einen großen Teil der Kosten und der Umweltwirkung verantwortlich ist. Beton ist sehr gut auf Druck belastbar, aber ohne Stahl nicht sehr zugfest. Ein gerader Sturz bekäme ohne Stahlbewehrung also schnell Risse. Die Öffnung wird deshalb mit einem Rundbogen überspannt. Auch bei dem Mauerwerk wurde auf stahl-verstärkte Sonderbauteile verzichtet. Durch einen gemauerten Segmentbogen kann auch hier die Fensteröffnung überbrückt werden. Die materialgerechte Konstruktion bildet also gleichzeitig den Ausgangspunkt für eine interessante Formensprache.



Quellenverzeichnis

- [1] BKI Baukosten Gebäude Neubau 2020; Statistische Kostenkennwerte für Gebäude - Neubau (Teil 1)
- [2] DIN V 4108-6:2003-6, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.
- [3] Keller, Rutz, 2011: Pinpoint - Fakten der Bauphysik zu nachhaltigem Bauen, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN: 978-3728133892
- [4] Eberle et al. (Ed.) (2016), Die Temperatur der Architektur: Be 2226; Portrait eines energieoptimierten Hauses, Birkhäuser, Basel.
- [5] Knecht, K. & Sigrist, D. (2019). Vergleich der beiden Lüftungskonzepte der Siedlung Klee bezüglich Ökologie und Ökonomie. Sustainable Solutions GmbH i.A.v. Baugenossenschaft Hagenbrünneli, Zürich
- [6] Delzendeh, E., et al. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 80. 1061-1071.
- [7] OBB (2017). e% - Energieeffizienter Wohnungsbau. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellbauvorhabens. Technische Universität München. Hochschule Augsburg. Hochschule Coburg. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr.

[8] BINE (2015). Nutzerverhalten bei Sanierungen berücksichtigen. BINE Informationsdienst. Projektinfo 02/2015. Energieforschung konkret. E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen University.

[9] IWU (2019). Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen. Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). BBSR-Online-Publikation Nr. 04/2019.

[10] DIN V 4108-6, DIN 4701-10, DIN 18599

[11] Tam, V.W.Y., Almeida, L., Le, K. (2018). Energy-Related Occupant Behaviour and Its Implications in Energy Use: A Chronological Review. Sustainability 10, no. 8: 2635.

[12] Brager, G. & De Dear, R.J. (2001). Climate, comfort, & natural ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE standard 55. Proceedings of Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century: An International Conference. 5-8th April 2001. Oxford Brooks University. Oxford.

[13] Campo V (2020). Auf dem richtigen Weg - Aktivplus-Studentenwohnhaus "Campo V" in Stuttgart. db deutsche bauzeitung. Ausgabe 05/2020. Trends: Energie. S. 52 - 55.

[14] GEWOFAG Riem, 2014

[15] Brand, Stewart: How Buildings Learn: What Happens After They're Built. New York City: Viking Verlag, 1994 ISBN-13: 978-0670835157