

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

KRÄMMEL
WOHN- & GEWERBEBAU GMBH
ecoleben Penzberg

DER BAYERISCHE BAUINDUSTRIEVERBAND E.V.

- Wirtschaftsverband
- Tarifpartner
- Bildungsträger
- Informationen für den Bau

Der Bayerische Bauindustrieverband ist mit all seinen Leistungen seinen Mitgliedern verpflichtet. Dazu gehören eine umfassende Information und Beratung der Mitgliedsfirmen in politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Fragen, die Sicherung branchenspezifischer Aus- und Weiterbildung, die Verhandlung von Tarifverträgen, die Schaffung einer Plattform zum Erfahrungsaustausch zwischen den Unternehmen der Bauindustrie und die Förderung von Innovationen in Forschung und Entwicklung.

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

**KRÄMMEL
WOHN- &
GEWERBEBAU
GMBH**

INHALT

| | |
|--|----|
| VORWORT | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis und verwendete Einheiten..... | 6 |
| EINFÜHRUNG | 7 |
| 1.1. Allgemeine Angaben zu den Objekten..... | 8 |
| 1.2. Baukonstruktion..... | 9 |
| 1.3. Technische Gebäudeausrüstung..... | 12 |
| 1.4. Definition Randbedingungen..... | 13 |
| 2.1. Messkonzept..... | 14 |
| 2.1.1. Raumklima..... | 14 |
| 2.1.2. Außenklima..... | 15 |
| 2.1.3. Untersuchungskonzept..... | 15 |
| ERGEBNISSE RAUMKLIMA | 16 |
| 3.1. Raumklima Sommerfall..... | 16 |
| 3.2. Raumklima Winterfall..... | 19 |
| 3.3. Zusammenfassung und Bewertung des Raumklimas..... | 22 |
| ERGEBNISSE WÄRMESTROM | 24 |
| 4.1. Wärmestrom Winterfall..... | 25 |
| 4.2. Wärmestrom Sommerfall..... | 28 |
| ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT | 30 |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 32 |

VORWORT

Der Bedarf an Wohn- und Arbeitsraum ist insbesondere in den bayerischen Städten und Metropolregionen stark wachsend. Zusammen mit dem steigenden Bewusstsein für eine nachhaltige gesellschaftspolitische Entwicklung ergeben sich für ein nachhaltiges Baugewerbe neue und spannende Herausforderungen. Diese bestehen in der Entwicklung von qualitativ hochwertigen, grundlegend nachhaltigen, CO₂-neutralen Bauweisen, die neben den ökologischen Erfordernissen auch in wirtschaftlicher Hinsicht überzeugen müssen. Um diese Herausforderungen zu meistern, bedarf es einerseits einer interdisziplinären und eng verzahnten Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Baupraxis. Andererseits muss künftig in viel stärkerem Maße als bisher der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet werden, der die Herstellung und Errichtung, den Betrieb sowie den Rückbau und das Recycling der unterschiedlichen Baumaterialien gleichermaßen einschließt. Die integrierte, gleichzeitige Betrachtung dieser unterschiedlichen Teilbereiche ermöglicht es dem Planer bereits im Entwurfsprozess entsprechend fundierte Entscheidungen zu treffen, um die Umsetzung von nachhaltigen Gebäuden sicherzustellen. Der hier vorliegende Abschlussbericht zeigt auf, wie durch die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis innovative und zugleich umsetzbare Strategien für die Realisierung nachhaltiger Planungs- und Bauweisen erarbeitet werden können. Deren Anwendung wird anhand von konkreten Fallbeispielen demonstriert. Baufirmen, Bauherren, Planer und Behörden werden für den Umgang mit dem Themenkomplex der nachhaltigen Entwicklung sensibilisiert und erhalten zudem konkrete Handlungsempfehlungen zu dessen Umsetzung.

Vor diesem Hintergrund arbeiteten im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojekts die Mitarbeiter*innen des Lehrstuhls für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München und der Krämmel GmbH & Co. Bauunternehmung KG sehr eng zusammen, um Antworten auf bauphysikalische, thermische und energetische Fragestellungen zu entwickeln. Hierbei wurden Wohngebäude in Massiv- bzw. Hybridbauweise im Rahmen eines zweijährigen Gebäudemonitorings miteinander verglichen. Hierbei sollte ermittelt werden, ob eine Hybridbauweise mit Holzfassade im Vergleich mit einer Massivbauweise, bestehend aus einer Stahlbeton-Schottenbauweise mit tragenden Innenwänden und perlitgefüllten Ziegeln für die Außenwand, nicht nur beim Materialeinsatz, sondern auch im Gebäudebetrieb eine ökologischere Variante darstellt.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS UND VERWENDETE EINHEITEN

| | |
|-------------------------|--|
| EG | Erdgeschoss |
| GWP | Global Warming Potential (Treibhauspotenzial) |
| K | Kelvin |
| Kg CO ₂ -Äq. | Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalente |
| MDF | Medium Density Fibreboard |
| MW | Mineralwolle |
| OG | Obergeschoss |
| OSB | Oriented Strand Board |
| PP | Polypropylen |
| W | Watt |
| kW/m ² | Kilowatt pro Quadratmeter (Wärmestrom) |
| WDVS | Wärmedämmverbundsystem |
| SQL | Datenbanksprache (engl. Sequence Query Language) |

I. EINFÜHRUNG

Die steigende Nachfrage an Wohnraum und der wachsende Sanierungsdruck von Bestandsgebäuden führen zu einem erhöhten Ressourcenbedarf, wie z.B. Baugrund, Material und Energie im Bau- und Immobilienwesen. Höhere Ressourcenbedarfe führen in der Regel zu steigenden Umweltauswirkungen, z.B. in Form von Treibhausgasemissionen. Diese tragen wiederum zu einem verstärkten Klimawandel bei. Das Bau- und Immobilienwesen, das deutschlandweit für rund 14 Prozent aller Treibhausgasemissionen verantwortlich ist, muss deshalb zum Ziel haben die Umweltauswirkungen von Gebäuden so gering wie möglich zu halten und im besten Fall dem Klimawandel entgegenzuwirken¹. Hierzu braucht es innovative und zukunftsorientierte Lösungsansätze, die in der Praxis realisier- und umsetzbar sind. Mit dem Bauprojekt „ecoleben Penzberg“ der Krämmel GmbH & Co. Bauunternehmung KG, wurden auf einer Gesamtfläche von 7.650 m² fünf Mehrfamilien- und neun Reihenhäuser mit insgesamt 57 Wohneinheiten, inklusive Tiefgarage, errichtet. Dabei wurden zwei der Mehrfamilienhäuser in Hybridbauweise (Stahlbeton-Schottenbauweise mit vorgestellten Holztafelelementfassaden) errichtet. Alle anderen Gebäude wurden inkl. der Außenwände mit einer massiven Tragstruktur (Stahlbeton Schottenbauweise mit tragenden Innenwänden) errichtet.

¹ Quelle: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_zahlen_2019_fs_gebaeude_de_bf.pdf

Bei der Planung und Umsetzung des Projekts fanden unterschiedliche Nachhaltigkeitskriterien Berücksichtigung, die unter anderem folgende Mehrwerte generieren:

- Hohe Behaglichkeit und hoher Komfort
- Hohe Nutzerakzeptanz
- Geringe Betriebs-, und Instandsetzungskosten
- Zukunftsfähigkeit
- Positive öffentliche Wahrnehmung
- Gute Vermarktung des Objekts

Zudem wurde durch die Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München bereits in einem ersten, erfolgreich abgeschlossenen Projekt die Massiv- mit der Hybridbauweise aus bauphysikalischer und ökobilanzieller Sicht miteinander verglichen. Dabei wurden die lebenszyklusbasierten ökologischen und energetischen Vor- und Nachteile der beiden Bauweisen im Vergleich dokumentiert, analysiert und ausgewertet.

Ziel des im Rahmen dieses Berichts beschriebenen Folgeprojekts war das Monitoring thermischer und behaglichkeitsbezogener Parameter während der Nutzung, bzw. dem Bewohnen des Gebäudes. Hierunter versteht man die Erfassung der Komfortbedingungen im Innenraum, des Wärmeübergangs im Bereich der Gebäudehülle und des Heizenergieverbrauchs. Auch hier wurde, analog zum ersten Forschungsprojekt, sowohl die Massiv- als auch Hybridbauweise untersucht. Die Ergebnisse dienen der Validierung des im vorangegangenen Forschungsprojekt erarbeiteten Energiekonzepts und tragen zur Entwicklung eines integrativen Gesamtkonzepts zur lebenszyklusbasierten ökologischen und energetischen Bewertung der untersuchten Gebäude bei. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich unmittelbar auf ähnlich geartete Gebäudetypologien übertragen.

Durch das interdisziplinär aufgestellte Team und die hier vorhandenen Kompetenzen konnten die unterschiedlichen Themenbereiche und Fragestellungen integrativ bearbeitet werden. Aufgrund der engen Zusammenarbeit der Wissenschaftler der Technischen Universität München mit den Praxispartnern der Fa. Krämmel konnten mit Unterstützung des Bayerischen Bauindustrieverband e.V. Lösungsansätze für das nachhaltige Bauen in Hybridbauweise entwickelt, umgesetzt und deren Funktionalität im Rahmen der Nutzung nachgewiesen werden. Dies kann beispielhaft für die weitergehende Zusammenarbeit von Forschung und Praxis im Hinblick auf die Umsetzung zukunftsweisender, nachhaltiger Technologien und Bauweisen angesehen werden.

1.1. ALLGEMEINE ANGABEN ZU DEN OBJEKTEN

Bei den Gebäuden in der Johann-Dreher-Straße in Penzberg, Bayern handelt es sich um neu errichtete Wohngebäude aus dem Jahre 2017. Die Gebäude unterscheiden sich maßgeblich dadurch, dass für deren Errichtung zwei grundlegend verschiedene Konstruktionsarten realisiert wurden. Für die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Beobachtungen und Analysen rückt der spezielle Fokus auf Haus D und Haus E. Haus D wurde in einer Hybridbauweise errichtet, während Haus E aus einer Massivbauweise besteht. Eine Ansicht für Haus D ist in Abbildung 1 dargestellt. Die beiden Gebäude gehören zu einem Gesamtprojekt der Krämmel Wohn- und Gewerbebau GmbH „Ecoleben Penzberg“. Weitere Gebäude dieses Projekts sind in naher Umgebung angeordnet, siehe Lageplan in Abbildung 2. Die untersuchten Gebäude verfügen über ein Kellergeschoss, Erdgeschoss und zwei Obergeschosse. Da die Gebäude unterkellert sind bilden die Bodenplatte im Untergeschoss, die Außenwände gegen das Erdreich inklusive Tiefgarage, die oberirdischen Außenwände sowie das Dach die thermische Gebäudehülle. Im Gebäude selbst werden alle oberirdischen Zonen als auf normale Temperaturen beheizte Bereiche ($\theta \geq 19^\circ\text{C}$) sowie das Untergeschoss als niedrig beheizt ($\theta \geq 12^\circ\text{C}$) angesehen.



Abbildung 1: Ansicht von Haus D



Abbildung 2: Lageplan

1.2. BAUKONSTRUKTION

Ein wesentlicher Bestandteil des ersten Forschungsprojekts war die thermische und ökologische Untersuchung von Baukonstruktionsvarianten. Untersucht wurden dabei eine Massivbauweise und alternativ dazu hybride Konstruktionsarten. Die Konstruktionsarten, die letztendlich umgesetzt wurden, werden im Folgenden hinsichtlich deren bauphysikalischer Eigenschaften beschrieben.

TABELLE 1: BAUTEILAUFBAUTEN AUSSENWAND HAUS D: U-WERT 0,15 [W/M²K]

| Baustoff (innen nach außen) | Dicke [mm] | Lambda [W/m²K] | Dichte [kg/m³] |
|--|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Gipskarton | 25 | | |
| Wärmedämmung aus Mineralwolle | 60 | 0,035 | 25 |
| OSB-Platte | 15 | 0,13 | 650 |
| Holzständer 60x140 | 140 | 0,13 | 700 |
| Gefachdämmung aus Mineralwolle | 140 | 0,035 | 25 |
| OSB-Platte | 12,5 | 0,13 | 650 |
| Wärmedämmung aus Mineralwolle | 60 | 0,035 | 25 |
| Putz | 20 | 1,4 | 1400 |
| | 332,5 | | |

TABELLE 1: BAUTEILAUFBAUTEN AUSSENWAND HAUS E: U-WERT 0,20 [W/M²K]

| Baustoff (innen nach außen) | Dicke [mm] | Lambda [W/m²K] | Dichte [kg/m³] |
|--|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Putz | 20 | 1,4 | 1400 |
| Perlitgefüllter Ziegel Poroton S | 425 | 0,08 | 750 |
| Putz | 20 | 1,4 | 1400 |
| | 445 | | |

TABELLE 1: BAUTEILAUFBAUTEN FUSSBODEN

| Baustoff (innen nach außen) | Dicke [mm] | Lambda [W/m*K] | Dichte [kg/m³] |
|---|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Bodenbelag | 10 | | |
| Heizestrich inkl. PE-Folie und Trägerplatte | 100 | 1,4 | 2000 |
| Wärmedämmung | 40 | 0,040 | 25 |
| Stahlbeton | 200 | 2,3 | 2300 |
| | 350 | | |

TABELLE 1: BAUTEILAUFBAUTEN BODENPLATTE: U-WERT 0,13 [W/M²K]

| Baustoff (innen nach außen) | Dicke [mm] | Lambda [W/m*K] | Dichte [kg/m³] |
|---|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Bodenbelag | 10 | | |
| Heizestrich inkl. PE-Folie und Trägerplatte | 90 | 1,4 | 2000 |
| Wärmedämmung | 50 | 0,040 | 25 |
| WU-Stahlbeton | 300 | 2,3 | 2300 |
| Perimeterdämmung | 120 | 0,035 | 30 |
| | 350 | | |

1.3. TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG

Mit dem gewählten energetischen Versorgungssystem sollte zum einen erreicht werden, den Energiebedarf so gering wie möglich zu halten, und zum anderen die Verwendung von erneuerbaren Energien zu forciert werden. Die Wärme- und Kälteübergabe erfolgt im gesamten Gebäude über eine Fußbodenheizung. Der entscheidende Vorteil besteht aus den erforderlichen geringen Vor- und Rücklauftemperaturen von ca. 40/33 °C gegenüber herkömmlichen Radiatoren von ca. 55/ 45 °C. Darüber hinaus bietet die passive Kühlung, bei der nur Energie zum Transport des Kältemediums benötigt wird, entscheidende Vorteile hinsichtlich des geringen Energiebedarfs und der Nutzung einer regenerativen Energiequelle. Aus diesem Grund wird der Wärme- und Kühlenergiebedarf über eine effiziente Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden (bis 200 m Tiefe) als Wärmequelle gedeckt.

Im Folgenden ist die eingesetzte Anlagentechnik zusammengefasst:

Heizung:

| | |
|---------------------|--|
| Wärmeerzeuger: | Sole-Wasser-Wärmepumpe |
| Wärmequelle: | Erdsonden als Doppel U-Rohr, Tiefe 200 m, unter der Bodenplatte |
| Pufferspeicher: | Trennpuffer 600 -1000 l |
| Warmwasserbereiter: | Pufferspeicher mit innen liegendem Edelstahlwellrohr im Strömungsrohr als Trinkwarmwasserbereiter im Durchflussprinzip mit separater Zirkulationsheizfläche für möglichst geringe Übertemperatur |
| Wärmeübergabe: | Fußbodenheizung, Systemtemperatur 40/33 °C |

Kühlung:

| | |
|-----------------|---|
| Kälteerzeugung: | passive Kühlung über Wärmetauscher |
| Rückkühlung: | Erdsonden als Doppel U-Rohr, Tiefe 200 m, unter der Bodenplatte |
| Kälteübergabe: | Fußbodenheizung, Systemtemperatur 23/20 °C |

Lüftung:

In jedem Wohn- und Schlafrum ist ein Außenwandlüftungsgerät mit Kreuzstromwärmetauscher installiert. Es wird empfohlen dieses in der Heizperiode durchgehend auf der kleinsten Stufe (15 m³/h) laufen zu lassen um den Feuchteschutz und hygienischen Luftaustausch sicherzustellen

Photovoltaik

Angestrebt ist, dass so viel PV Strom wie möglich für den Betrieb der Wärmepumpe verwendet wird. Dies wird durch eine intelligente Steuerung geregelt. Steht PV Strom zur Verfügung, bei gleichzeitigen Strombedarf der Wärmepumpe so wird dieser auch dafür verwendet. Ansonsten wird der erzeugte PV Strom in das Netz eingespeist.

- 3,1 bis 25,4 kWp, je nach Dachfläche und -form verteilt auf die einzelnen Häuser, in Summe 95,4 kWp

1.4. DEFINITION RANDBEDINGUNGEN

Im Kontext dieser Auswertung ist es wichtig zu erwähnen, dass die Außenwände der Hybrid- und Massivbauweise unterschiedliche U-Werte aufweisen (siehe Kapitel 1.2). Allerdings erfolgt die Temperierung sowohl im Sommer als auch Winter über das gleiche Energiesystem, also mit gleichen Systemtemperaturen. Zudem haben eine Vielzahl weiterer Faktoren, die im Rahmen des durchgeführten Monitorings nicht aufgezeichnet wurden, einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse, welche im Folgenden dargestellt werden.

Zu den Einflussfaktoren zählen z.B. verschiedene Anwesenheitszeiten der Bewohner, die Variation der Anzahl der sich in der Wohnung befindenden Personen, deren energierelevantes Verhalten (bspw. Heiz- und Lüftungsverhalten), die Platzierung der Möbel im Innenraum, der Unterschied der Anzahl elektrischer Geräte mit thermischen Lasten im Innenraum, die Verschattung der Gebäude durch Vegetation im Außenraum sowie Windschneisen, die durch unterschiedliche Bebauungsstrukturen bedingt werden.

II. GEBÄUDEMONITORING

Ein immer zentralerer werdender Punkt in der Realisierung von ressourceneffizienten Gebäuden ist die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, insbesondere von Holz in der Tragstruktur von Gebäuden. Im direkten Vergleich weisen diese in der Regel allerdings eine geringere spezifische Wärmespeicherfähigkeit auf als massive Baustoffe bzw. Gebäude auf. Im Hinblick auf den Energiebedarf und das thermische Verhalten stellen sich dabei folgende Fragen: Welchen Einfluss hat die Art der Baukonstruktion auf das Raumklima? Wie ist das thermische Verhalten der beiden Gebäude?

Um den Einfluss der unterschiedlichen spezifischen Wärmespeicherfähigkeit auf das Raumklima, das thermische Verhalten und die Wärmeverluste über die thermische Gebäudehülle zu untersuchen wurden die beiden Untersuchungsobjekte über einen Zeitraum von zwei Jahren messtechnisch erfasst.

2.1. MESSKONZEPT

Ziel des Messkonzepts ist es die Parameter zu erheben, die einen Vergleich zwischen den beiden Baukonstruktionsarten, in Bezug auf das Raumklima bzw. das thermische Empfinden der Nutzer, ermöglichen. Um einen spezifischen Vergleich zwischen den Konstruktionsarten zu ermöglichen, werden die relevanten Parameter in einer sehr detaillierten und minütlichen Auflösung erfasst. Erfasst werden dabei Parameter des Raumklimas, des Außenklimas sowie der Außenbauteile wie z.B. Oberflächentemperaturen und Wärmeströme. Um valide Aussagen treffen zu können ist zudem ein ausreichend langer Messzeitraum notwendig. Beide Gebäude wurden daher über einen Zeitraum von zwei Jahren März 2017 (Bezugsbeginn) bis März 2019 erfasst.

Die erhobenen Parameter werden im Folgenden detailliert erläutert.

2.1.1. RAUMKLIMA

Das Raumklima wird in den beiden Gebäuden in jeweils zwei verschiedenen Räumen mit unterschiedlicher Nutzung erhoben. Zum einen im Wohnbereich und zum anderen im Schlafraum. In Wohngebäuden sind diese beiden Nutzungen von extrem großer Bedeutung, da Personen sich in diesen Räumen am öftesten aufhalten. Dementsprechend werden unterschiedliche Anforderungen an das Raumklima gestellt.

Ein wichtiger Aspekt hierbei ist zudem der Einfluss des Nutzers. In Wohnbereichen kann der Nutzer durch aktives Verhalten z.B. Lüftung, oder Aktivierung des Sonnenschutzes, das Raumklima nach seinen Bedürfnissen beeinflussen. In Schlafbereichen hingegen ist das aktive Eingreifen deutlich reduziert. Im Hinblick auf die thermische Behaglichkeit und den Energieverbrauch jedoch nicht zu vernachlässigen, da sich der Nutzer dort in der Regel ca. acht Stunden pro Tag aufhält. Während des Schlafens emittiert eine Person viel Feuchtigkeit und CO₂ was zu einer deutlichen Verschlechterung des Raumklimas und Schlafs führen kann. Erfasst werden darauf aufbauend folgende Parameter:

- Lufttemperatur in °C
- Relative Luftfeuchtigkeit in %
- CO₂ Konzentration in ppm

2.1.2. AUSSENKLIMA

Da das thermische Verhalten des Gebäudes und der resultierende Energieverbrauch maßgeblich vom Außenklima beeinflusst wird, werden relevante Parameter des Außenklimas mittels einer Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes erfasst. Dabei spielt die Außenlufttemperatur eine maßgebliche Rolle, da diese einen direkten Einfluss auf den Transmissionswärmeverlust hat. Darüber hinaus werden die Außenluftfeuchtigkeit und die Globalstrahlung ermittelt.

- Lufttemperatur in °C
- Relative Luftfeuchtigkeit in %
- Globalstrahlung in W
- Windgeschwindigkeit in m/s
- Windrichtung in °
- Niederschlag in mm

2.1.3. UNTERSUCHUNGSKONZEPT

Um den Einfluss der unterschiedlichen Baukonstruktion auf das Raumklima darstellen zu können werden zwei repräsentative Zeiträume für die Untersuchung herangezogen. Maßgeblich für die Untersuchung des thermischen Empfindens sind die klimatischen Bedingungen sowohl im Sommer-, als auch im Winterfall. Die erhobenen Parameter werden im ersten Schritt für beide Jahreszeiten dar und gegenübergestellt. Im nächsten Schritt werden aus den zwei untersuchten Perioden die jeweiligen Extremwochen identifiziert und die Messergebnisse nochmals sehr spezifisch für diese Zeiträume ausgewertet. Dieses Vorgehen ermöglicht es Tendenzen zwischen den Konstruktionsarten über einen langen Zeitraum, als auch sehr spezifisch die Auswirkung auf das Raumklima auf Stunden und Tagesbasis, aufzuzeigen.

Folgende Zeiträume werden für die Auswertungen herangezogen:

- Winterperiode: 01. Dezember – 28. Februar 2017
Winterwoche: 04. – 10. Dezember 2017
- Sommerperiode: 01. Juni – 31. August 2018
Sommerwoche: 03. – 09. August 2018

III. ERGEBNISSE RAUMKLIMA

Im folgenden Kapitel wird das Raumklima für den Sommerfall und den Winterfall dargestellt. Das Raumklima wird dabei für zwei Gebäude Haus D (Hybrid) und Haus E (Massivbau) als auch für die zwei untersuchten Zonen Wohnbereich und Schlafbereich getrennt analysiert. Mit Hilfe der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit lässt sich der dynamische Verlauf in Abhängigkeit des untersuchten Raumes und des Außenklimas darstellen. Dabei ist anzumerken, dass im Sommerfall, der Effekt der passiven Kühlung zu berücksichtigen ist. Diese läuft bei beiden Gebäuden mit den Systemtemperaturen 23 °C/20 °C. Technisch gesehen ist eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Gebäude gegeben, jedoch können, wie schon erwähnt, weitere Aspekte einen Einfluss auf die Messergebnisse haben, siehe Kapitel 1.4.

3.1. RAUMKLIMA SOMMERFALL

Wie bereits erwähnt, werden die Raumlufttemperaturen in Bezug zur Außenlufttemperatur dargestellt. Für das Außenklima sind die Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte in Tabelle 2 aufgelistet. In Tabelle 3 ist das Raumklima zusammengefasst. Die Temperaturverläufe für die jeweiligen Nordräume (Schlafen) sind in der Abbildung 3 und für die Südräume (Wohnen) in Abbildung 4 dargestellt. Die Temperaturen werden dabei nach der Bauart getrennt dargestellt. Betrachtet man die Außenlufttemperatur, so zeigt sich, dass während der Sommerperiode 2018 die höchste Temperatur am 09. August bei 33,4 °C lag. Im Durchschnitt lag die Außenlufttemperatur bei 18,6 °C.

TABELLE 2: AUSSENKLIMA SOMMERFALL 2018

| | Min | Max | Ø |
|-------------------------------|------|------|------|
| Lufttemperatur [°C] | 2,5 | 33,4 | 18,6 |
| relative Luftfeuchtigkeit [%] | 22,1 | 93,4 | 67,1 |

Das mittlere Raumklima für beide Gebäude und beide Zonen ist in Tabelle 3 aufgelistet.

TABELLE 3: RAUMKLIMA SOMMERFALL 2018

| | | Hybrid | Massiv |
|-----------------|-------------------------------|--------|--------|
| Nordraum | Lufttemperatur [°C] | 23,9 | 22,8 |
| | relative Luftfeuchtigkeit [%] | 52,7 | 54,6 |
| Südraum | Lufttemperatur [°C] | 24,8 | 24,0 |
| | relative Luftfeuchtigkeit [%] | 48,4 | 53,4 |

Hinsichtlich der Raumlufttemperaturen zeigt sich, dass diese sowohl in den Nordräumen als auch in den Südräumen über den gesamten Zeitraum nur sehr geringen Schwankungen unterliegen. Selbst bei den heißen Sommertagen erwärmen sich die Bereiche nur sehr geringfügig. Am heißesten Tag des Jahres (09. August) lagen die Lufttemperaturen in den Nordräumen bei 25,0 °C für die Massivbauweise und bei 25,4 °C für die Hybridbauweise. Dies lässt sich direkt auf die passive Kühlung zurückführen und zeigt somit auch die Wirksamkeit bei hoher Energieeffizienz. Des Weiteren zeigt sich anhand der Verläufe, dass die Lufttemperatur im Gebäude mit Hybridbauweise tendenziell höher ist als bei der Massivbauweise. Der Nordraum ist in Haus D im Mittel +1,1 °C wärmer als im Haus E.

VERLAUF LUFTTEMPERATUR IN DEN NORDRÄUMEN IM SOMMERFALL
Lufttemperatur in [°C]

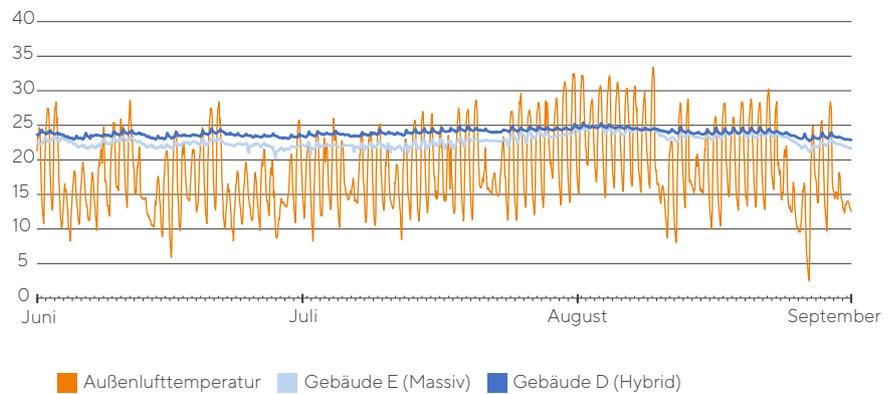


Abbildung 3 Verlauf der Lufttemperatur der Nordräume für den Sommerfall

VERLAUF LUFTTEMPERATUR IN DEN SÜDRÄUMEN IM SOMMERFALL
Lufttemperatur in [°C]

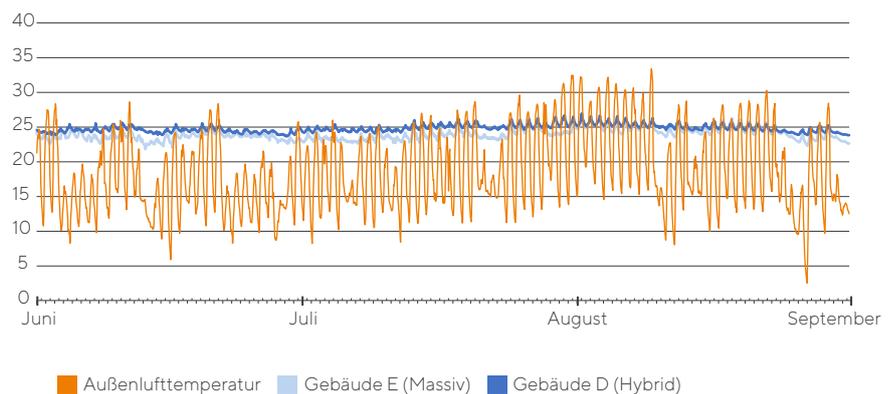


Abbildung 4 Verlauf der Lufttemperatur der Südräume für den Sommerfall

Die maximalen Lufttemperaturen in den Südräumen betragen auf Grund der Ausrichtung etwas mehr, und zwar 26,4°C für die Massivbauweise und 26,9°C für die Hybridbauweise. Im Südraum beträgt die Differenz zwischen Haus D und Haus E im Mittel +0,8°C. Dies liegt daran, dass die Hybridbauweise in Haus D über eine geringere wirksame Wärmespeicherfähigkeit verfügt. Während der Sommerperiode kann also weniger Wärme durch die Solarstrahlung von der Baukonstruktion gepuffert werden, weswegen sich der Raum mehr aufheizt. Dies zeigt sich insbesondere bei der Betrachtung der untersuchten Woche, siehe Abbildung 5 und Abbildung 6. Die Temperatur in Haus D ist dabei in der Regel höher als im Haus E. Grundsätzlich kann jedoch gesagt werden, dass sich bei beiden Gebäuden sehr behagliche Temperaturen während der Sommerperiode einstellen. Während der kompletten Sommerperiode und auch während der heißesten Woche werden Temperaturen von 27°C nicht überschritten. Ohne die realisierte passive Kühlung wären die Temperaturspitzen jedoch höher.

VERLAUF LUFTTEMPERATUR IN DEN NORDRÄUMEN IM SOMMERFALL, erste Augustwoche 2018
Lufttemperatur in [°C]

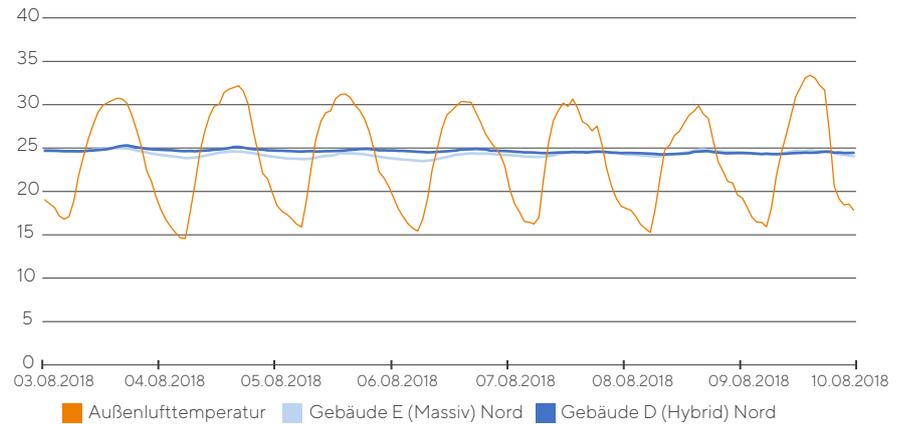


Abbildung 5 Verlauf über eine spezifische Woche der Lufttemperatur der Nordräume für den Sommerfall

VERLAUF LUFTTEMPERATUR IN DEN SÜDRÄUMEN IM SOMMERFALL, erste Augustwoche 2018
Lufttemperatur in [°C]

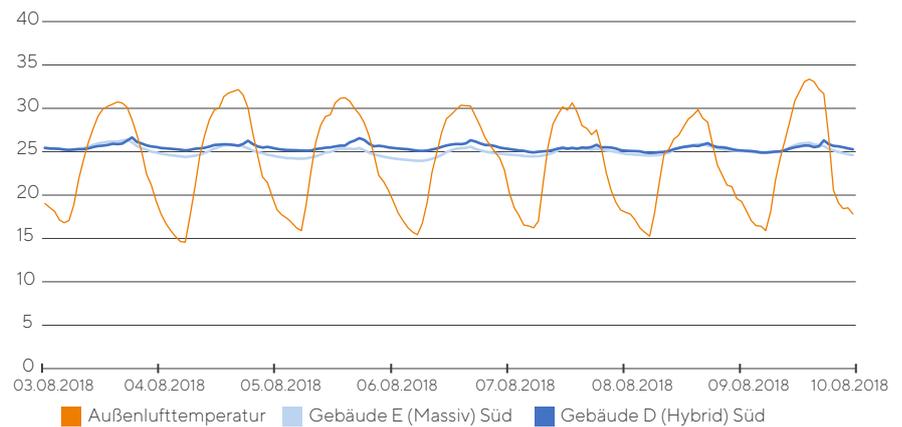


Abbildung 6 Verlauf über eine spezifische Woche der Lufttemperatur der Südräume für den Sommerfall

Ein weiterer bedeutender Parameter in der Bewertung des Innenraumklimas stellt die relative Luftfeuchtigkeit dar. Diese hängt dabei maßgeblich von der relativen Luftfeuchtigkeit der Außenluft (insbesondere beim Lüften) sowie den internen Lasten bspw. Aktionen mit hoher Feuchtigkeitsabgabe wie Kochen und Duschen oder auch Feuchtigkeitsabgabe bei der menschlichen Atmung ab. Dabei treten in der Regel über das Jahr betrachtet zwei Probleme auf. In der Sommerperiode besteht die Gefahr von Unbehaglichkeit (aufgrund schwülwarmer Luft), während im Winter eine hohe Luftfeuchtigkeit an kalten Oberflächen zur Schimmelbildung und Anfall von Kondensat, im schlimmsten Fall auch zu Bauschäden, führen kann.

Für den Nordraum zeigt sich anhand der Abbildung 7, dass die relative Luftfeuchtigkeit in beiden Gebäuden zwischen 30% und 67% schwankt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Baukonstruktionen ist nicht zu identifizieren. Hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit schneiden beide Gebäude somit gleich gut ab.

VERLAUF LUFTFEUCHTIGKEIT IN DEN NORDRÄUMEN IM SOMMERFALL
Relative Luftfeuchtigkeit in [%]

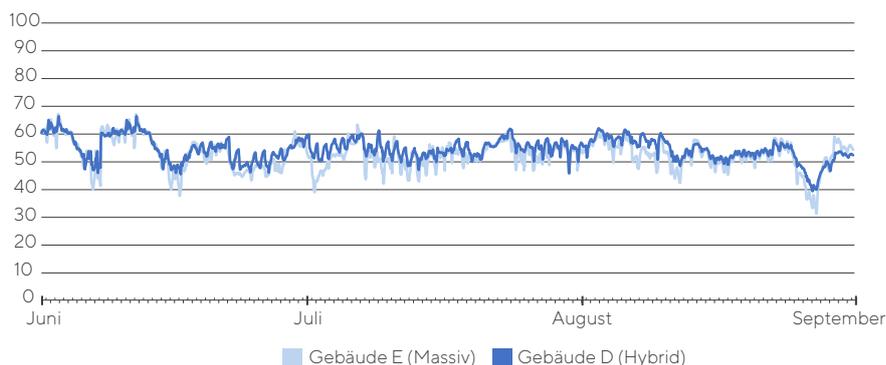


Abbildung 7 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Nordräume für den Sommerfall

VERLAUF LUFTFEUCHTIGKEIT IN DEN SÜDRÄUMEN IM SOMMERFALL
Relative Luftfeuchtigkeit in [%]

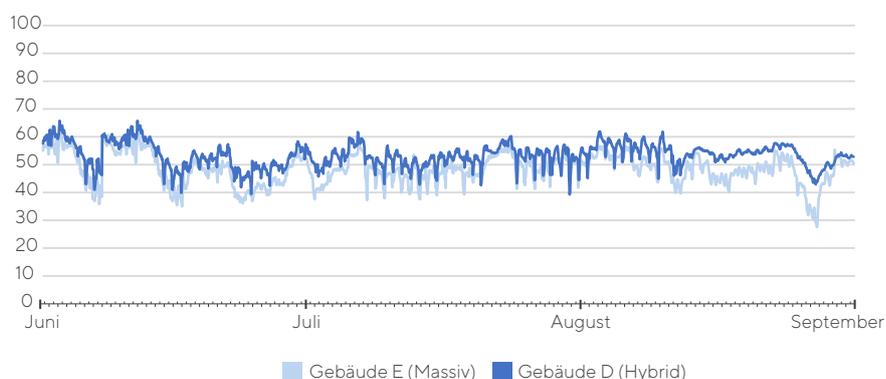


Abbildung 8 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Südräume für den Sommerfall

3.2. RAUMKLIMA WINTERFALL

Für den Winterfall sind die maßgeblichen Parameter des Außenklimas in Tabelle 4 und für das Raumklima in Tabelle 5 aufgeführt. Zunächst zeigt sich, dass die minimalste Außenlufttemperatur $-9,8^{\circ}\text{C}$ beträgt. Die mittlere Außenlufttemperatur betrug $1,3^{\circ}\text{C}$. Es zeigt sich außerdem, dass es während dieser Winterperiode auch durchaus wärmere Tage gegeben hat und keine längeren Kälteperioden vorhanden waren. So schwankten die Temperaturen im gesamten Zeitraum relativ stark zwischen $-9,8^{\circ}\text{C}$ und $14,7^{\circ}\text{C}$, siehe Abbildung 9. Somit ergibt sich eine maximale Temperaturschwankung von $23,8^{\circ}\text{C}$.

TABELLE 4: AUSSENKLIMA WINTERFALL 2017/18

| | Min | Max | Ø |
|---------------------------------------|------|------|------|
| Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] | -9,8 | 14,3 | 1,3 |
| relative Luftfeuchtigkeit [%] | 29,6 | 92,6 | 76,7 |

Betrachtet man im gleichen Zuge die Lufttemperaturen der Innenräume, so zeigt sich, dass diese trotz der großen Temperaturschwankungen im Außenraum, ein recht konstantes Temperaturniveau aufweisen. Im Mittel ergeben sich für die untersuchten Räume über den betrachteten Zeitraum folgende Temperaturen: Im Nordraum beträgt die mittlere Temperatur im Hybridbau 20,1°C und 21,2°C im Massivbau. Dem gegenüber weist der Südraum im Hybridbau eine mittlere Temperatur von 23,4°C und im Massivbau von 22,9°C auf. Dabei zeigt sich auch, dass die Schlafbereiche tendenziell kühler sind als die Wohnbereiche. Des Weiteren zeigt sich, dass die Schlafbereiche eine höhere mittlere relative Luftfeuchtigkeit als die Wohnräume aufweisen. Dies lässt sich durch den reduzierten Einfluss auf die Lüftung und den erhöhten Feuchtigkeitsausstoß beschreiben.

TABELLE 5: RAUMKLIMA WINTERFALL 2017/18

| | | Hybrid | Massiv |
|-----------------|-------------------------------|--------|--------|
| Nordraum | Lufttemperatur [°C] | 20,1 | 21,2 |
| | relative Luftfeuchtigkeit [%] | 40,1 | 29,9 |
| Südraum | Lufttemperatur [°C] | 23,4 | 22,9 |
| | relative Luftfeuchtigkeit [%] | 34,6 | 23,6 |

Die folgenden Abbildungen, siehe Abbildung 9 und Abbildung 10, zeigen den Temperaturverlauf für den untersuchten Winterfall von Anfang Dezember 2017 bis Ende Februar 2018.

VERLAUF LUFTTEMPERATUR IN DEN NORDRÄUMEN IM WINTERFALL
Lufttemperatur in [°C]

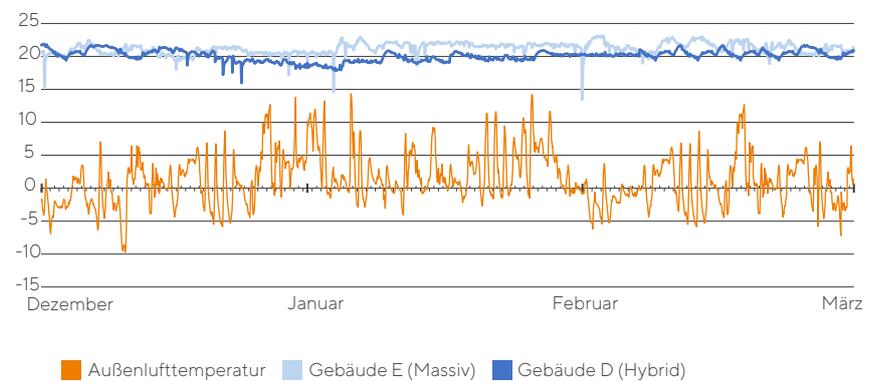


Abbildung 9 Verlauf der Lufttemperatur der Nordräume für den Winterfall

VERLAUF LUFTTEMPERATUR IN DEN SÜDRÄUMEN IM WINTERFALL
Lufttemperatur in [°C]

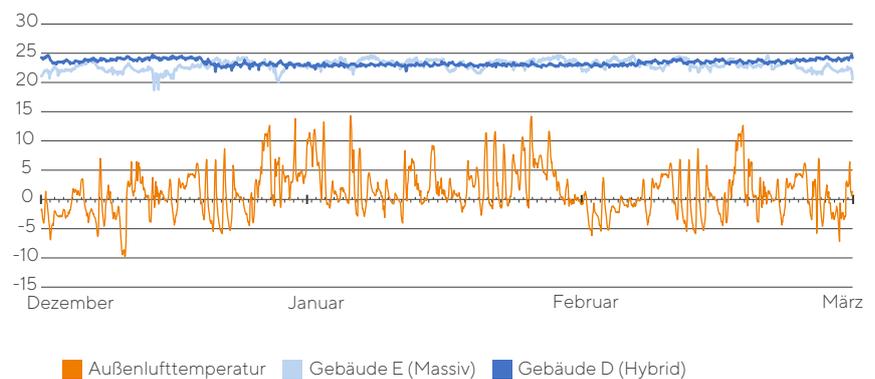


Abbildung 10 Verlauf der Lufttemperatur der Südräume für den Winterfall

Einzig im Nordraum des Gebäude E, siehe Abbildung 9, sind temporär deutliche Schwankungen nach unten zu erkennen. Dies lässt sich auf das Nutzerverhalten zurückführen. Zu diesen Zeitpunkten wurde über eine längere zeitliche Periode gelüftet, wodurch sich die Lufttemperatur im Inneren deutlich absenkte. Im Nordraum ist zudem eine signifikante Differenz zwischen den untersuchten Bauarten zu erkennen. Dies lässt sich allerdings nicht allein auf die Baukonstruktion zurückführen, da hier auch das Nutzerverhalten einen maßgeblichen Einfluss hat. Da Menschen, insbesondere in Schlafräumen, unterschiedliche thermische Präferenzen aufweisen, sind hier Unterschiede sogar zu erwarten. Je nach Präferenz wird hier vom Nutzer die Soll-Raumtemperatur beeinflusst, weswegen ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Im Südraum dagegen sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bauweisen zu erkennen. Zur Bewertung des Einflusses der Baukonstruktion auf das thermische Verhalten des Raumes sind daher weitere Untersuchungen anhand anderer Parameter notwendig, siehe Kapitel 4.

Wie bereits erwähnt ist die mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Winterfall grundsätzlich geringer als im Sommerfall. Dies liegt maßgeblich am Dampfdruck. Wassermoleküle werden durch diesen zusammengehalten. Da der maximale Dampfdruck bei kalter Luft geringer ist als bei warmer Luft kann diese auch weniger absolute Feuchtigkeit aufnehmen. Für den Nordraum zeigt sich anhand der Abbildung 11, dass die relative Luftfeuchtigkeit in beiden Gebäuden zwischen 20 % und 52 % schwankt.

VERLAUF LUFTFEUCHTIGKEIT IN DEN NORDRÄUMEN IM WINTERFALL
Relative Luftfeuchtigkeit in [%]

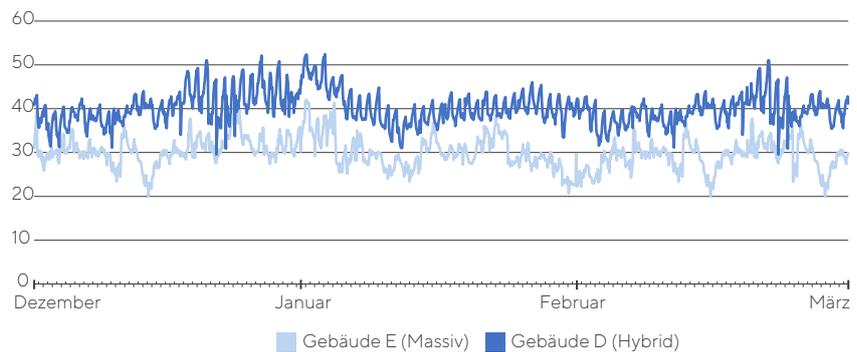


Abbildung 11 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Nordräume für den Winterfall

Im Südraum, siehe Abbildung 12, schwankt die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 18 % und 50 %. Mitte Dezember weist der Südraum im Hybridgebäude einen Ausreißer auf, bei dem die relative Luftfeuchtigkeit zeitweise auf 60 % steigt.

VERLAUF LUFTFEUCHTIGKEIT IN DEN SÜDRÄUMEN IM WINTERFALL Relative Luftfeuchtigkeit in [%]

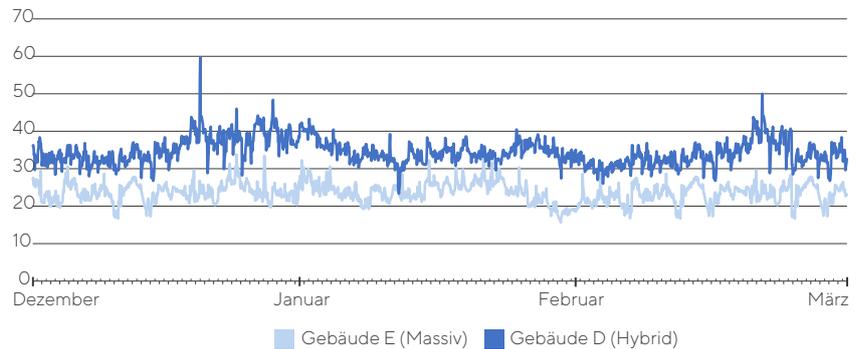


Abbildung 12 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Südräume für den Winterfall

3.3. ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DES RAUMKLIMAS

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Art der Baukonstruktion bei den Analysen der Messergebnisse beider Gebäude durchaus einen Einfluss auf das Raumklima hat. Für den Sommerfall zeigt sich, dass die mittlere Temperatur im Haus D (Hybrid) im Vergleich zum Haus E (Massiv) im Nordraum um $1,1^{\circ}\text{C}$ und im Südraum um $0,8^{\circ}\text{C}$ höher liegt. Im Winterfall liegt die mittlere Lufttemperatur im Haus D und Nordraum um $-1,1^{\circ}\text{C}$ unterhalb der im Haus E, bzw. $0,5^{\circ}\text{C}$ höher im Südraum. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit lassen sich in Bezug auf die Baukonstruktion keine signifikanten und eindeutigen Unterschiede feststellen. Der maßgeblichste Unterschied ist im Nordraum zu identifizieren. Die mittlere Luftfeuchtigkeit im Hybridgebäude liegt bei $40,1\%$ während diese im Massivgebäude bei $29,9\%$ liegt. Da die relative Luftfeuchtigkeit insbesondere im Winter sehr stark von den internen Feuchtigkeitslasten abhängig ist lässt sich hier kein unmittelbarer Rückschluss auf die Baukonstruktionen ziehen.

Im Hinblick auf die Bewertung die verschiedenen Raumklimas zeigt sich, anhand der mittleren Temperaturen und relativen Luftfeuchtigkeit, dass sich in beiden Gebäuden thermisch behagliche Zustände einstellen.

IV. ERGEBNISSE WÄRMESTROM

Die Messung des Wärmestroms durch Außenwände gibt Aufschluss über Transmissionswärmeverluste- und gewinne des Gebäudes nach außen, bzw. von außen. Anhand des Wärmestroms lassen sich somit Aussagen zum Wärmeeintrag in das Gebäude im Sommer und Wärmeverluste nach außen im Winter treffen. Um die Wärmeeinträge, bzw. die Wärmeverluste zwischen der Massiv- und Hybridbauweise der untersuchten Erdgeschosswohnungen zu analysieren und zu beurteilen, wurden auf der Süd- und Nordseite jeweils auf gleicher Höhe, unter dem Putz der Innen- und Außenseite der Außenwand, Wärmestrommessplatten angebracht (siehe Abbildung 13).

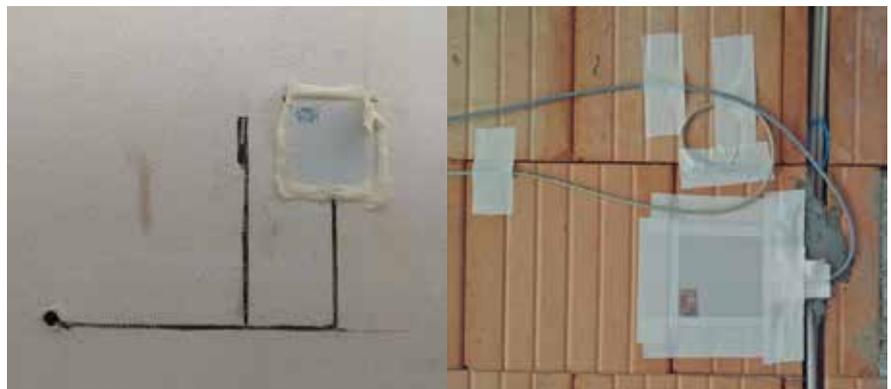


Abbildung 13 Wärmestromplatten

Die über jeweils eine Minute gemittelten Werte wurden für die Auswertung und Analyse mit den Daten der durchschnittlichen Außen- und Innenlufttemperatur und den durchschnittlichen Innen- und Außenoberflächentemperaturen der Außenwände in den Kontext gebracht. Für die Ermittlung der Transmissionswärmegewinne, also dem Wärmeeintrag von außen in den Innenraum, wurden die bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnten Sommermonate Juni bis August gewählt. Für die Ermittlung der Transmissionswärmeverluste des Innenraums an den Außenraum, wurden die bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnten Wintermonate Dezember bis Februar betrachtet. Da die Analyse und Auswertungsergebnisse in den Sommer- und Winterfällen über die Jahre hinweg die gleichen Tendenzen aufzeigen wird folglich der Winterfall 2017/2018 und der Sommerfall 2018 näher analysiert und beschrieben.

4.1. WÄRMESTROM WINTERFALL

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für den Winterfall 2017/18 (siehe Tabelle 6) lässt sich erkennen, dass, im Vergleich zur Hybridbauweise, der Transmissionswärmeverlust bei der Massivbauweise um rund 227% höher war. Dabei listet Tabelle 6 die Transmissionswärmeverluste als Summe der Energieverluste, über die betrachteten Monate, in Kilowattstunden pro Quadratmeter Außenwandfläche [kWh/m²] auf. Alle Temperaturwerte werden als Durchschnittswerte in Grad Celsius [°C] aufgeführt.

TABELLE 6 TRANSMISSIONSWÄRMEVERLUSTE WINTERFALL 2017/18

| | | Hybrid | Massiv |
|--------------------|--|--------------|---------------|
| Südfassade | Außenlufttemperatur [°C] | 4.88 | 5.93 |
| | Oberflächentemperatur außen [°C] | 1.20 | 0.72 |
| | Innenraumtemperatur [°C] | 23.22 | 23.02 |
| | Oberflächentemperatur innen [°C] | 21.44 | 20.82 |
| | Σ Transmissionswärmeverluste [kWh/m ²] | -4.34 | -13.09 |
| Nordfassade | Außenlufttemperatur [°C] | 6.34 | 4.19 |
| | Oberflächentemperatur außen [°C] | 1.22 | 0.61 |
| | Innenraumtemperatur [°C] | 19.88 | 21.27 |
| | Oberflächentemperatur innen [°C] | 17.93 | 19.07 |
| | Σ Transmissionswärmeverluste [kWh/m ²] | -4.00 | -14.12 |

Die erhöhten Transmissionswärmeverluste bei der Massivbauweise im Winter lassen sich maßgeblich durch den höheren U-Wert von $U_{\text{Massiv}} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu

$U_{\text{Hybrid}} = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Wärmedurchgangskoeffizienten) und die höhere wirksame Wärmespeicherfähigkeit (c_{wirk}) bei der Massivbauweise erklären.

Bedingt durch den 25% höheren U-Wert bei der Massivbauweise, im Vergleich zur Hybridbauweise, ist der Wärmestrom durch die Außenwand im Winter deutlich höher. Da sich die Innenraumtemperaturen zwischen den zwei Bauweisen im Mittel nicht groß voneinander unterscheiden, kann man somit darauf schließen, dass Haus E (massiv) einen deutlich höheren Heizenergiebedarf hat als Haus D (hybrid) hat.

Durch die deutlich höhere wirksame Wärmespeicherfähigkeit des perlitgefüllten Mauerziegels bei der Massivbauweise (siehe Tabelle 7) speichert dieser tagsüber, wenn im Winter der Innenraum beheizt wird, deutlich mehr Wärme ein, als die Hybridbauweise. Ein nicht zu verachtender Anteil an Wärmeenergie heizt somit nicht nur den Innenraum, sondern eben auch den Mauerziegel auf. Es muss folglich in Summe mehr Wärmeenergie aufgewandt werden, um den Innenraum des Gebäudes aus Mauerziegel aufzuheizen, da ein Teil der Wärmeenergie im Mauerziegel gespeichert wird. Dieser Anteil fällt bei der Hybridbauweise erheblich kleiner aus.

Nachts, wenn die Temperaturen im Außenraum im Vergleich zum Tag deutlich absinken, ergibt sich für den Ziegel aufgrund der hier gespeicherten Wärme eine größere Temperaturdifferenz zur Außenluft; es wird mehr Wärme bzw. thermische Energie an den Außenraum abgegeben.

Basierend auf physikalischen Grundprinzipen strömt Wärme immer von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur. Dadurch, dass im Wandaufbau der Hybridbauweise deutlich weniger Wärme gespeichert wird, geht diese im Umkehrschluss nachts auch nicht verloren. Die Hybridbauweise hat also im Winter einen Vorteil durch die geringere Masse. Der Ziegel hingegen ist aufgrund des homogenen Aufbaus im Vergleich zu einem Wandaufbau aus Beton und Wärmedämmung im Nachteil, da die Speichermasse beim Perlitziegel über die gesamte Wandstärke gleichmäßig verteilt ist, anstatt möglichst vollständig an der Wandinnenseite, also hinter der Wärmedämmung angeordnet zu sein.

Der Tages- und Nachtverlauf der Temperaturen lässt sich exemplarisch anhand des in Abbildung 14 gezeigten zweitägigen Kurvenverlaufs des Wärmestroms erklären. Auf der Südfassade der Hybridbauweise ergibt sich im Winterfall lediglich für ein kurzes Zeitfenster, zwischen dem späten Vormittag und dem frühen Nachmittag, ein positiver Wärmestrom. Ein positiver Wärmestrom bedeutet ein Wärmestrom von außen in den Innenraum, im Winterfall positiv zu wertende Wärme-gewinne. Dies geschieht bspw. durch steigende Außenlufttemperaturen oder einer direkten Sonneneinstrahlung.

Wie in Abbildung 14 erkennbar, wurde an den beiden untersuchten Tagen kurz gegen 9:00 Uhr morgens stoßgelüftet, wodurch erwartungsgemäß die Innenraumtemperatur deutlich gesunken ist. Das Stoßlüften lässt sich an dem kurzen Abfall der Innenlufttemperatur zu erkennen.

Durch das frühe Untergehen der Sonne im Winter entfällt die wärmende Einstrahlung auf die Außenwand. Zudem nimmt die Außenlufttemperatur ab, während im Vergleich dazu die Innenlufttemperatur gleich hoch bleibt bzw. durch Anwesenheit der Bewohner im Laufe des Abends ansteigt. Durch den zunehmenden Temperaturunterschied dreht sich der Wärmestrom um und es ergeben sich Wärmeverluste. Der Wärmestrom reagiert auf Grund der geringen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit der Hybridbauweise direkt auf die sich im Außen- und Innenraum ergebenden Veränderungen. Trotz allem führt der geringe U-Wert sehr deutlich zu geringeren Transmissionswärmeverlusten und dabei auch zu geringeren Heizenergiebedarfen.

WÄRMEGEWINNE UND -VERLUSTE SÜDFASSADE HYBRIDBAUWEISE, WINTERFALL 2017/2018

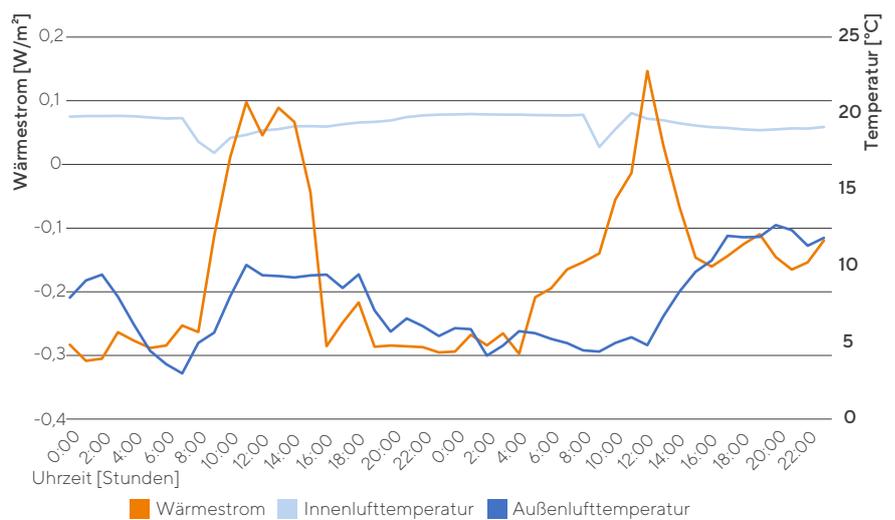


Abbildung 14 Wärmegewinne und -verluste Südfassade Hybridbauweise Winterfall 2017/18

Bei der Betrachtung des Kurvenverlaufs des Wärmestroms derselben zwei Tage durch die Südfassade der Massivbauweise (siehe Abbildung 15) ist zu erkennen, dass dieser über den gesamten Zeitraum im negativen Bereich verläuft. Es ergeben

sich somit über die zwei Tage hinweg konstant Wärmeverluste aus dem Gebäude. Das Ansteigen der Außenlufttemperatur und die Einstrahlung der Sonne auf die Außenwand reichen nicht aus, um die thermisch wirksame Schicht der Massivbauwand, die an den Innenraum grenzt, so zu erwärmen, dass sich daraus Wärmegewinne für den Innenraum ergeben. Zudem ist zu erkennen, dass die Massivbauwand durch ihre höhere wirksame Wärmespeicherfähigkeit deutlich träger auf Umwelteinwirkungen, bzw. Änderungen im Innen- und Außenraum reagiert. Steigt z.B. die Außenlufttemperatur an, dann verringern sich die Wärmeverluste erst mit einem deutlichen zeitlichen Versatz. Die Pufferwirkung der Massivbaukonstruktion verhindert das Aufwärmen der thermisch wirksamen Schicht – eine Wärmeübertragung an den Innenraum an milden und sonnigen Wintertagen findet nicht statt.

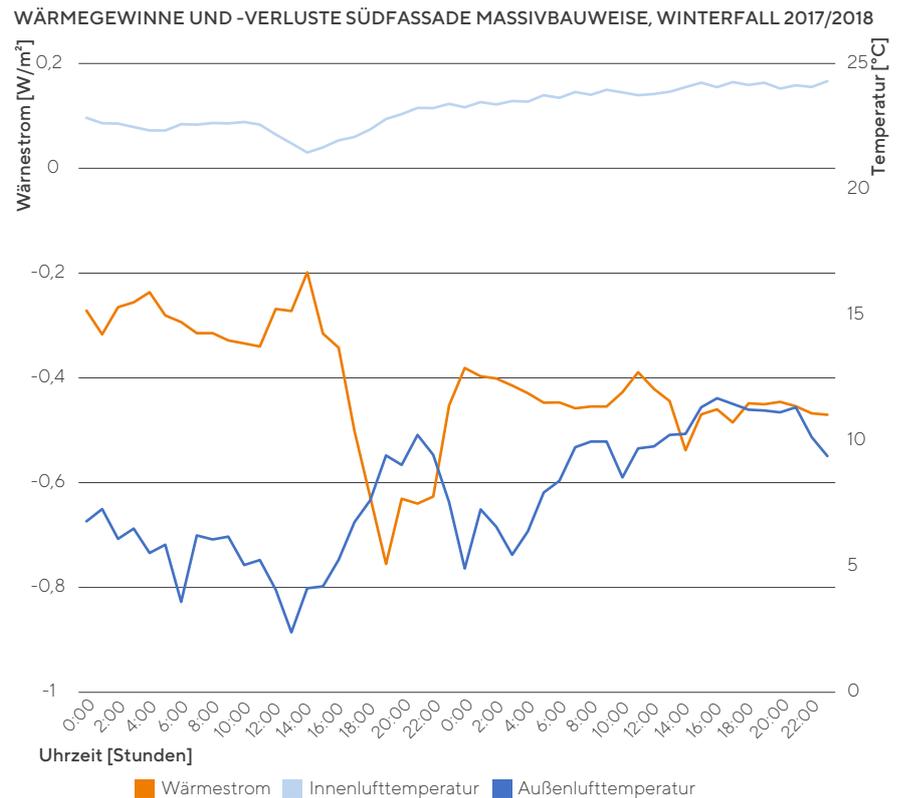


Abbildung 15 Wärmegewinne und -verluste Südfassade Massivbauweise Winterfall 2017/18

Im Umkehrschluss bedeutet das, dass sich trotz einer geringeren Temperaturdifferenz zwischen Innen zu Außen bei der Massivbauweise ($\Delta 17,09^\circ\text{C}$), im Vergleich zur Hybridbauweise ($\Delta 18,34^\circ\text{C}$), deutlich mehr Wärmeverluste auf Grund der verschiedenen wirksamen Wärmespeicherfähigkeiten der Bauweisen ergeben. Die Systeme reagieren zudem unterschiedlich „schnell und direkt“ auf sich ändernde Einflüsse aus der Umwelt. Die Wärmeverluste über die Außenwände der Nord- und Südfassade zeigen jeweils die gleichen Tendenzen auf. Vergleicht man die Wärmeverluste der Hybridbauweise zwischen der Süd- und Nordwand, so zeigt sich außerdem, dass die Wärmeverluste auf der Nordwand leicht geringer sind. Bei der Massivbauweise ist der Wärmeverlust über die Nordwand leicht höher als bei der Südwand. Diese geringfügigen Veränderungen können auf den Unterschied des U-Wertes und die bereits erwähnte „Vielzahl weiterer Faktoren“ (siehe Kapitel 1.4), die einen Einfluss auf die Werte der aufgezeichneten Parameter haben können, erklärt werden.

4.2. WÄRMESTROM SOMMERFALL

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für den Sommerfall 2018 (siehe Tabelle 7) lässt sich erkennen, dass generell der Wärmeeintrag deutlich geringer ausfällt als die Wärmeverluste im Winter. Das liegt primär daran, dass die Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und Innenlufttemperatur im Sommer deutlich geringer ausfällt. Das wiederum resultiert in einem im Durchschnitt geringeren Wärmestrom im Sommer. Zudem zeigt sich, dass die Wärmegewinne über die Südfassade bei beiden Gebäuden nahezu identisch sind. Die Hybridbauweise weist einen Transmissionswärmegewinn von 2,13 kWh/m² und die Massivbauweise von 2,15 kWh/m² auf. Auf der Nordfassade zeigt sich ein ähnliches Bild. Dort weisen die Wärmegewinne keine signifikanten Unterschiede auf. Bei der Hybridbauweise wurde ein Wärmegewinn von 1,25 kWh/m² aufgezeichnet während es beim Massivbau 1,88 kWh/m² sind.

TABELLE 7 TRANSMISSIONSWÄRMEGEWINNE SOMMERFALL 2018

| | | Hybrid | Massiv |
|--------------------|--|-------------|-------------|
| Südfassade | Außenlufttemperatur [°C] | 18.63 | 19.71 |
| | Oberflächentemperatur außen [°C] | 20.14 | 20.16 |
| | Innenraumtemperatur [°C] | 24.85 | 24.02 |
| | Oberflächentemperatur innen [°C] | 24.39 | 23.58 |
| | Σ Transmissionswärmeverluste [kWh/m ²] | 2.13 | 2.15 |
| Nordfassade | Außenlufttemperatur [°C] | 19.79 | 18.48 |
| | Oberflächentemperatur außen [°C] | 18.89 | 18.76 |
| | Innenraumtemperatur [°C] | 23.93 | 22.80 |
| | Oberflächentemperatur innen [°C] | 23.16 | 22.03 |
| | Σ Transmissionswärmeverluste [kWh/m ²] | 1.25 | 1.88 |

Auch hier lässt sich mit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit (c_{wirk}) und den unterschiedlichen U-Werten argumentieren. Zudem hat die passive Kühlung im Sommer, die der Nutzer durch die Regelung des Kühlsystems steuern kann, einen Einfluss auf die Innenraumtemperaturen. Die Innenraumtemperaturen liegen, sowohl auf der Süd-, als auch auf der Nordseite bei der Massivbauweise, im Schnitt immer unter denen der Hybridbauweise. Das liegt daran, dass der Mauerziegel durch seine höhere Wärmespeicherfähigkeit tagsüber einen Puffer darstellt. Zudem kann aber auch das Lüftungsverhalten der Bewohner einen Einfluss darauf haben (Fenster tagsüber durchgängig offen bei der Hybridbauweise). Die durch die Sonneneinstrahlung erhitze Außenluft erwärmt, genauso wie die direkte Sonneneinstrahlung, die Massivbaukonstruktion. Die Wärmeenergie wird somit nicht direkt an den Innenraum weitergegeben, sondern im Mauerziegel zwischengespeichert. Wenn der Mauerziegel aufgrund niedriger Lufttemperaturen und entsprechender Lüftung des Innenraums über Nacht so auskühlen konnte, sodass er tagsüber kälter als die Innenraumluft ist, dann ergibt sich ein Wärmestrom von der Innenraumluft in die thermisch wirksame Schicht des Mauerziegels. In der thermisch wirksamen Schicht die der Außenluft zugewandt ist besteht ebenfalls ein Wärmestrom in den Mauerziegel hinein. Der Mauerziegel wirkt somit so lange als Wärmepuffer, bis sich im Ziegel eine höhere Temperatur als die Innenraumluft ergibt. Ab diesem Punkt wird Wärme vom Mauerziegel in den Innenraum übertragen. Die Außenwandkonstruktion wärmt somit die Innenraumluft auf.

Nachts, wenn die Außenlufttemperatur und somit die Temperatur der thermisch wirksamen Schicht des Mauerziegels unter die Innenlufttemperatur sinkt, dreht sich der Wärmestrom um. Die zwischengespeicherte Wärme wird aus dem Mauerziegel wieder an die kühlere Außenluft abgegeben. Heizt sich der Mauerziegel über Tag jedoch so stark auf, dass die Temperatur des Ziegels nachts nie unter die der Innenluft sinkt, gibt der Ziegel die ganze Nacht über die gespeicherte Wärme an die Innenraumluft ab. Das kann passieren, wenn die Innenluft nachts durch eine Fensterlüftung temperiert wird. Bei der Hybridbauweise läuft dieser Prozess prinzipiell gleich ab, durch die deutlich geringere wirksamen Wärmespeicherfähigkeit, ergo Pufferwirkung, und den geringeren U-Wert jedoch in einem sehr viel geringeren Umfang.

Trotz des sommerlichen Wärmeeintrages lässt sich festhalten, dass sich die Mittelwerte der Innentemperaturen, sowohl auf der Süd- als auch auf der Nordseite, auf Grund der passiven Kühlung im Sommer im behaglichen Bereich liegen.

Bei richtiger Dimensionierung der Außenwandstärken und einem korrekt darauf abgestimmten Lüftungs-, bzw. Heizverhalten kann ein massiver Baustoff somit als Puffer wirken und positiv zur Raumkonditionierung beitragen. Die in diesem Projekt betrachteten Beispiele zeigen jedoch auf, dass ein solch abgestimmtes Lüftungs-, bzw. Heiz- und Kühlverhalten nicht realisiert wurde. Die Hybridbauweise hat im Rahmen der in diesem Projekt aufgezeichneten Werte somit einen geringfügig bis deutlich besseren Effekt auf die Transmissionswärmegewinne im Sommer und Winter. Gerade auch in Bezug auf den Klimawandel und die sich daraus weiterhin ergebenden Veränderungen im Jahrestemperaturverlauf lässt sich mit einer Hybridbauweise agiler und angepasster darauf reagieren.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Bezugnehmend auf die im Rahmen des Vorgängerprojektes (Städtischer Hartplatz Penzberg) und die in diesem Forschungsprojekt erarbeiteten Ergebnisse lässt sich festhalten, dass die Hybridbauweise aus Sicht der betrachteten ressourcenbezogenen, ökologischen und thermischen Parameter eine hervorragende und notwendige Option zur Massivbauweise im Wohnungsbau darstellt.

Bei der Betrachtung des Ressourceneinsatzes und der dadurch bedingten Umweltauswirkungen „im direkten Vergleich der Fassadentypen zeigt sich der positive Effekt bei Verwendung einer Fassade aus regenerativen Baustoffen“ (siehe Endbericht Vorgängerprojekt). Durch die Verwendung von deutlich weniger Baumaterial (siehe Kapitel 1.2) und die sich daraus ergebenden geringeren Wandstärken entsteht zudem ein positiver Effekt auf die Größe der Nutzfläche des Gebäudes aus Hybridbauweise. Jedoch muss in Bezug auf das Tragwerk und die Tiefgarage, und hauptsächlich Ausführung in Stahlbeton, in Richtung alternativer Möglichkeiten und Konzepte nachgedacht werden. Das Tragwerk und die Tiefgarage relativieren nämlich den Einsatz regenerativer Baustoffe bei der Hybridbauweise.

Bei der Betrachtung der gemessenen bauphysikalischen Parameter für die Bewertung des Raumklimas und unter Berücksichtigung der passiven Kühlung lässt sich erkennen, dass sich in Bezug auf die mittleren Temperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit, in beiden Gebäuden, sowohl im Sommer- als auch im Winterfall, thermisch Behagliche Zustände einstellen. So stellen sich während der Sommerperiode in den Wohnräumen mittlere Lufttemperaturen von 24,8 °C (Hybrid) und 24,0 °C (Massiv) ein.

Aus der Betrachtung der Wärmeströme lässt sich schlussfolgern, dass, unter Berücksichtigung des Einflusses der bereits genannten Parameter, die Hybridbauweise eine gute Performance aufweist. Gerade durch die höhere wirksame Wärmespeicherfähigkeit des perlitgefüllten Mauerziegels speichert dieser tagsüber deutlich mehr Wärme als die Hybridbauweise. Es muss daher deutlich mehr Wärmeenergie aufgewendet werden, was ggfs. zu höheren Heizkosten führen kann, um den Innenraum und damit einhergehend auch der Mauerziegel aufzuheizen. Hinsichtlich der Wärmeverluste über die Außenbauteile zeigt sich, dass im Winter bei der Hybridbauweise im Südraum einen Wärmeverlust von -4,34 kWh/m² und die Massivbauweise von -13,09 kWh/m² aufweist. Diese Unterschiede lassen sich zum einen durch den genannten Unterschied in der Wärmespeicherfähigkeit als auch durch den unterschiedlichen U-Wert erklären.

Gerade in Bezug auf den Klimawandel und die sich daraus weiterhin ergebenden Veränderungen im Jahrestemperaturverlauf lässt sich mit einer Hybridbauweise agiler und angepasster reagieren.

Zudem hat das bereits erwähnte, schon abgeschlossene Forschungsprojekt erarbeitet, dass die Hybrid- im Vergleich zur Massivbauweise einen 13% geringeren Primärenergiebedarf und 7% geringeren Treibhausgasausstoß für die Herstellung, Erneuerung und Entsorgung aufweist.

Es lässt sich somit festhalten, dass sich die Verwendung regenerativer Baustoffe positiv auf die lebenszyklusbasierte ökologische Bilanz von Gebäuden auswirken können. Somit muss der Fokus in Zukunft auf der Minimierung des Einsatzes an Primärrohstoffen und dem vorwiegenden Einsatz regenerativer Baustoffe (Holz als Konstruktionsmaterial) liegen. Denn zusätzlich zur positiven Wirkung dieser Baustoffe auf die ökologische Bilanz von Gebäuden stehen diese Konstruktionsarten in Hinblick auf bauphysikalische Parameter den Massivbauweisen in Ihrer Funktion nicht nach. Die Realisierung klima- und energetisch-neutraler sowie bezahlbarer Gebäude muss ein kollektives Ziel einer nachhaltigen Baubranche der Zukunft darstellen.

VI. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Abbildung 1 Ansicht von Haus D Foto: Krämmel Unternehmensgruppe by Alexander Bernhard | 8 |
| Abbildung 2 Lageplan | 9 |
| Abbildung 3 Verlauf der Lufttemperatur der Nordräume für den Sommerfall | 17 |
| Abbildung 4 Verlauf der Lufttemperatur der Südräume für den Sommerfall | 17 |
| Abbildung 5 Verlauf über eine spezifische Woche der Lufttemperatur der Nordräume für den Sommerfall | 18 |
| Abbildung 6 Verlauf über eine spezifische Woche der Lufttemperatur der Südräume für den Sommerfall | 18 |
| Abbildung 7 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Nordräume für den Sommerfall | 19 |
| Abbildung 8 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Südräume für den Sommerfall | 19 |
| Abbildung 9 Verlauf der Lufttemperatur der Nordräume für den Winterfall | 20 |
| Abbildung 10 Verlauf der Lufttemperatur der Südräume für den Winterfall | 20 |
| Abbildung 11 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Nordräume für den Winterfall | 21 |
| Abbildung 12 Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit der Südräume für den Winterfall | 22 |
| Abbildung 13 Wärmestromplatten | 24 |
| Abbildung 14 Wärmegewinne und -verluste Südfassade Hybridbauweise Winterfall 2017/18 | 26 |
| Abbildung 15 Wärmegewinne und -verluste Südfassade Massivbauweise Winterfall 2017/18 | 27 |

VII. TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|---|-------|
| Tabelle 1: Bauteilaufbauten | 10/11 |
| Tabelle 2: Außenklima Sommerfall 2018 | 16 |
| Tabelle 3: Raumklima Sommerfall 2018 | 16 |
| Tabelle 4: Außenklima Winterfall 2017/18 | 19 |
| Tabelle 5: Raumklima Winterfall 2017/18 | 20 |
| Tabelle 6: Transmissionswärmeverluste Winterfall 2017/18 | 25 |
| Tabelle 7: Transmissionswärmegewinne Sommerfall 2018 | 28 |

IMPRESSUM

Ansprechpartner bei der Technischen Universität München
und dem Bayerischen Bauindustrieverband:



Technische Universität München
Fakultät Architektur
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

AUTOREN

Michael Vollmer, M. Sc.
michael.vollmer@tum.de
Tel.: +49 89 289-25754

Hannes Harter, M. Sc.
hannes.harter@tum.de
Tel.: +49 89 289-23969

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
sekretariat.enpb.bgu@tum.de
Tel.: +49 89 289-23990

INDUSTRIEPARTNER

Krämmel Wohn- und Gewerbebau GmbH
Hans-Urmiller-Ring 46a
82515 Wolfratshausen
www.kraemmel.de

ABTEILUNG PROJEKTPLATTFORM ENERGIE + INNOVATION

Dipl.-Ing. Sandro Pfoh
s.pfoh@ppe.tum.de
+49 89 289-28153

ABTEILUNG HOCHBAU UND ENERGIE

Dipl.-Ing. (FH)/MBA & Eng. Werner Goller
w.goller@bauindustrie-bayern.de
+49 89 235003-41



DANK

Das Projekt wurde von der Bayerischen Bauwirtschaft gefördert.

Wir danken dem Architekturbüro Lang Hugger Rampp GmbH (München) für die Bereitstellung der benötigten gebäudebezogenen Daten, zur Durchführung der Analysen, Untersuchungen und Auswertungen; sowie für die Illustrationen und grafischen Ausarbeitungen der in diesem Bericht gezeigten Abbildungen des Gebäudes.

GESTALTUNG

Dipl.-Des. (FH) Daniel Schwaiger

HERAUSGEBER

Bayerischer Bauindustrieverband e.V. (BBIV)
Oberanger 32 | 80331 München
www.bauindustrie-bayern.de

VERLAG

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Arcisstr. 21 | 80333 München
www.ar.tum.de, verlag@ar.tum.de

ISBN 978-3-948278-11-3
© BBIV, 1. Auflage, Mai 2020

