

Tilmann Jarmer, Anne Niemann und Laura Franke

# Einfach Bauen: Innovative Ansätze für nachhaltiges Bauen

## Ergebnisse durch das vierte Forschungshaus im Projekt »Einfach Bauen«

Über zwei Jahre wurden in den Forschungshäusern in Bad Aibling Raumklima und Verbrauch gemessen und die Bewohner befragt. Die Ergebnisse bestätigen die Strategie »Einfach bauen«, zeigten aber auch Schwachpunkte bei der Ökobilanz auf. Die Reihe wurde deshalb um ein viertes Haus erweitert, dass das Forschungsprojekt »Einfach Bauen« fortsetzt und Beton durch Lehm substituiert. Die Ergebnisse wurden in der Veröffentlichung »Einfach Bauen II, Erkenntnisse« veröffentlicht [ISBN: 978-3-0356-2743-5]. Es folgen Auszüge aus dieser Publikation.



© Sebastian Schels aus [7]

Abb. 1: Die drei Forschungshäuser in Bad Aibling

Die Standards im Wohnungsbau steigen stetig. Um die Klimaziele zu erreichen, werden energieeffiziente Neubauten mit einer gut gedämmten, dichten Gebäudehülle und Lüftungsanlagen konzipiert. Im Betrieb werden die errechneten Werte aber oftmals nicht erzielt. Neben dem Ausfall von technischen Systemen liegt dies vor allem an einem von der Planung abweichenden Verhalten der Bewohner [1]. In der Praxis kann es zu einem Reboundeffekt kommen, wenn die durch effizientere Technik eingesparte Energie durch die Nutzenden wieder verbraucht wird, beispielsweise durch hohe Raumtemperaturen [2].

Hohe Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz sollen die Nutzerzufriedenheit weiter erhöhen. Da auch die Ansprüche immer weiter steigen, stagniert die Zufriedenheit oder sie sinkt sogar [3]. Mehrere Akteure fordern daher ein Absenken der Standards im Wohnungsbau [4]. In den letzten Jahrzehnten wurde nach der Optimierung des Komforts gesucht. Doch sollten wir nicht eher die Mindestanforderungen an den Wohnkomfort definieren? Der Architekt Florian Nagler fand in einem Interview mit dem deutschen Architektenblatt über die Reduktion unserer Ansprüche an Gebäude sehr deutliche Worte:

»(...) man muss in einem Haus mit angemessenem Komfort leben können. Wir sollten aber über die Wege nachdenken, wie wir das erreichen. Unsere mitteleuropäischen Ansprüche sind allgemein einfach zu hoch. 90 Prozent der Weltbevölkerung müssen mit ganz anderen Dingen klarkommen. Aber andere orientieren sich an dem, was wir tun. Wenn wir die Ansprüche immer weiter nach oben schrauben, wollen uns verständlicherweise viele folgen. Aber das wird diese Welt nicht aushalten« [5].

### Forschungsprojekt Einfach Bauen

In dem von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Forschungsprojekt »Einfach Bauen« unter der Leitung von Prof. Florian Nagler wurde der Frage nachgegangen, wie die Architektur mit baulichen Mitteln so optimiert werden kann, dass es möglichst wenig Technik bedarf, um ein angenehmes Raumklima zu erzeugen. Einfach Bauen bedeutet, ein Gebäude bereits in den ersten Planungsschritten durch eine Vielzahl von Entscheidungen robust und langlebig zu gestalten. Die Ergebnisse finden sich im Forschungsbericht [6] und unter [www.einfach-bauen.net](http://www.einfach-bauen.net).

### Forschungshäuser

Parallel dazu hat die B&O Gruppe in Zusammenarbeit mit dem Forschungsteam die Strategie Einfach Bauen an drei

#### KERNAUSSAGEN

- Die Messungen zeigen, dass das Nutzerverhalten einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat.
- Trotz des Verzichts auf außen liegenden Sonnenschutz lagen die Raumtemperaturen in den Forschungshäusern im Hochsommer meist innerhalb der Komfortgrenzen.
- Der Einsatz von Holz und Lehm in einem vierten Forschungshaus hat die negativen Umweltwirkungen im Vergleich zu den vorherigen Häusern mit Beton signifikant reduziert.

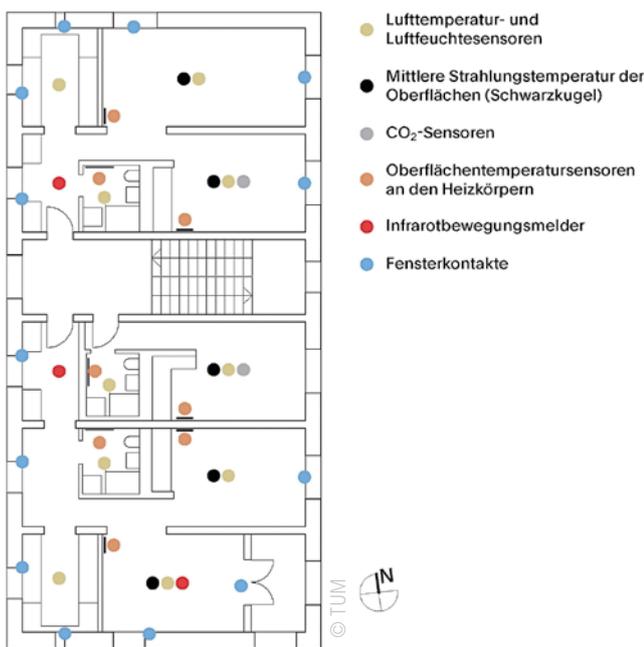


Abb. 2: Anordnung der Sensoren im Grundriss

Forschungshäusern in Holz-Hybrid, wärmedämmendem Mauerwerk und Leichtbeton umgesetzt. In Bad Aibling entstanden nicht unterkellerte Wohngebäude mit jeweils drei Geschossen und insgesamt 23 Wohnungen. (Abb. 1) Die material- und klimagerecht konstruierten Gebäude benötigen aus sich heraus wenig Heizenergie und überhitzen nicht im Sommer. Der Einsatz von einschichtigen Bauteilen aus natürlichen und nachwachsenden Rohstoffen schont die Umwelt über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes hinweg. Entstanden sind Wohngebäude, die einfach zu bauen und einfach zu betreiben sind. Das Buch »Einfach Bauen – ein Leitfaden« [7] stellt die im Forschungsprojekt entwickelten Strategien dar und dokumentiert die Forschungshäuser.

## Messungen

Durch Messungen in den bewohnten Häusern wurde überprüft, ob die Strategien des Einfachen Bauens in der Praxis funktionieren. Die Gestaltung der Forschungshäuser basiert auf den Erkenntnissen der Forschung an der TU München. Die gewonnenen Messdaten von Nutzerverhalten, Raumklima und Energieverbrauch können nun den Erkenntnissen aus der Forschung gegenübergestellt werden und diese ergänzen.

Der Einbau der Messtechnik erfolgte in den Monaten Dezember 2020 und Januar 2021. Im Februar 2021 wurde die Dateninfrastruktur installiert und programmiert – insgesamt entstand ein Netz aus mehr als 300 Sensoren. Von März bis August 2021 wurden die Häuser bezo-

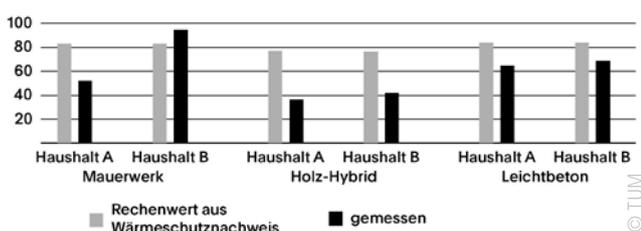


Abb. 3: Vergleich berechneter Bedarf (Kalenderjahr) mit gemessenem Verbrauch (Messjahr 2021/2022) für Raumheizung

gen. Diese Zeitspanne wurde genutzt, um die Messung zu testen, die Datenübertragung zu verbessern, das Energiemonitoring einzubauen und die Sensoren zu kalibrieren. Nach der Datennachbereitung ergab sich ein Jahr mit konstanten Messdaten – von September 2021 bis August 2022. Auf dieses Messjahr beziehen sich die gezeigten Auswertungen der Messdaten.

## Messkonzept

In jedem Forschungshaus wurden jeweils drei Wohnungen mit Messtechnik ausgestattet. Die Entscheidung fiel auf das zweite Obergeschoss jedes Gebäudes, da hier der Wärmeeintrag über die Fenster am größten und somit das Risiko einer Überhitzung im Sommer am höchsten ist. Die Forschungshäuser sind ohne beweglichen Sonnenschutz gebaut. Das Raumklima wird durch die Mittel der Architektur stabil gehalten: massive, den Raum umschließende Bauteile, die eine thermische Trägheit des Innenkomforts bewirken; angemessen große Fenster, die in Kombination mit einer hohen Raumhöhe die Tageslichtnutzung im Raum optimieren. Die Möglichkeit der natürlichen Nacht- und Querlüftung leistet einen zusätzlichen Beitrag für ein stabiles Raumklima.

Durch Messungen wurde überprüft, ob diese Strategie aufgeht. Neben der Raumlufttemperatur und -feuchte wurde in den Schlaf- und Wohnzimmer auch die mittlere Strahlungstemperatur der Boden-, Decken- und Wandflächen gemessen. In den Schlafzimmern wurde außerdem der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft gemessen. Über Sensoren an Fenstern und Heizkörpern konnte erfasst werden, wie die Personen in den Wohnungen heizen und lüften. Abb. 2 zeigt die Art und Lage der Sensoren im zweiten Obergeschoss je Gebäude.

## Energieverbrauch

Der gemessene Energieverbrauch zur Beheizung der Wohnungen ist den Rechenwerten aus dem Wärmeschutznachweis in Abb. 3 gegenübergestellt. Die Verbrauchswerte der einzelnen Wohnungen liegen meist unter den Berechnungswerten. Besonders niedrig liegen die Werte bei beiden gemessenen Haushalten des Holz-Hybridhauses. Die Nutzerumfrage ergab, dass es sich in beiden Wohnungen um sparsame Menschen handelte, die im Winter die Raumtemperaturen unter 20 °C regelten und im Vergleich weniger lüfteten. Bei einem Haushalt im Haus Mauerwerk liegt der gemessene Wert über dem Rechenwert des Wärmeschutznachweises. In dieser Wohnung wurde im Winter auf hohe Raumtemperaturen geheizt und die Fenster wurden über lange Zeiträume auf Kippstellung belassen.

Das Monitoring der Forschungshäuser zeigt: Das Nutzerverhalten hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch zur Raumerwärmung. Die Bewohnerschaft verhält sich unterschiedlich. Im Durchschnitt verhalten sie sich sparsamer als in den Berechnungen des Wärmeschutznachweises angenommen.

## Thermischer Komfort

In Abb. 4 sind für die drei Häuser jeweils eine repräsentative Sommerwoche (August) und eine repräsentative Winter-

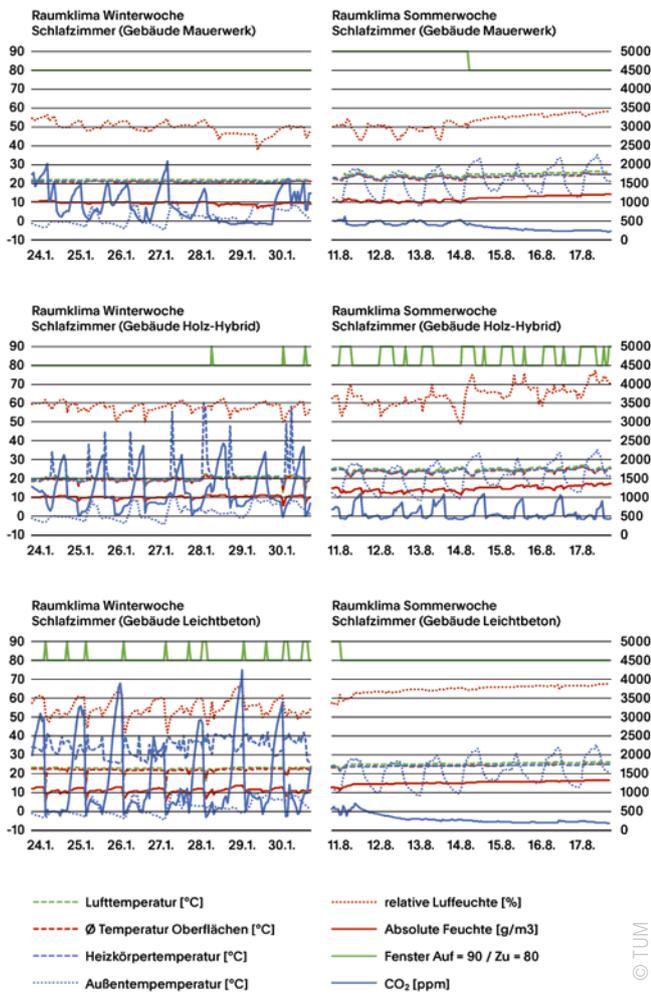


Abb. 4: Typische Sommer- und Winterwoche auf Raumebene

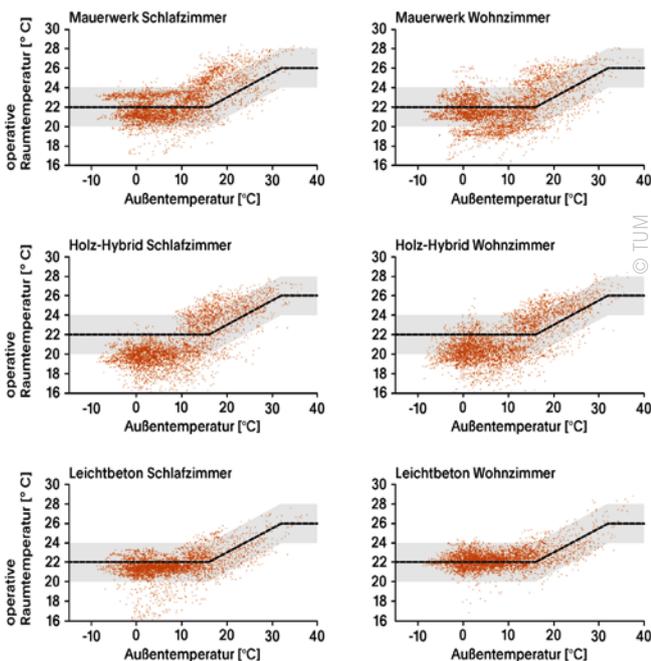


Abb. 5: Thermischer Komfort – operative Raumlufttemperatur

woche (Januar) auf Raumebene gegenübergestellt. Dadurch lassen sich verschiedene Einblicke gewinnen:

- Heizverhalten: Im Haus Mauerwerk wurde der Heizkörper im Schlafzimmer in der Januarwoche nicht benutzt. Der Heizkörper im Haus Holz-Hybrid wird hingegen ein bis zwei Mal täglich kurz aufgedreht. Im Haus Leichtbeton wird durchgängig geheizt. Die Wärmeabgabe wird durch den Thermostat geregelt.
- Lüftungsverhalten: Im Winter bleibt das Fenster meist geschlossen und wird unterschiedlich häufig kurz geöffnet. Im Sommer bleibt das Fenster entweder konstant geöffnet oder wird nachts verschlossen.
- Raumluftqualität: Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft ist ein Messwert, der den Anteil an veratmeter Luft in der Raumluft anzeigt. Dieser Wert steigt in den Räumen je nach Anwesenheit und Lüftungsverhalten an und ist im Winter höher als im Sommer. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Außenluft lag vor Ort während der Messphase bei durchschnittlich 400 ppm.

### Jahresüberblick

Abb. 5 gibt einen Überblick über den thermischen Komfort des gesamten Messjahres. Für jedes Haus ist die Raumlufttemperatur der Schlafzimmer der Nord- und Südwohnungen dargestellt. Jeder rote Punkt steht für einen Temperaturmesswert, während sich Personen im Raum aufhielten. Die x-Achse repräsentiert die Außenlufttemperatur, die y-Achse die operative Raumlufttemperatur. Die operative Raumlufttemperatur wird auch gefühlte Raumlufttemperatur genannt und stellt den Mittelwert der Raumlufttemperatur und der Oberflächentemperatur der raumumschließenden Bauteile (Decke, Boden und Wände) dar.

Das graue Band im Diagramm gibt den Komfortbereich in Wohnräumen nach deutscher Norm an, der im Winter zwischen 20°C und 24°C liegt. Wenn die Außentemperaturen über 16°C steigen, wird eine Anpassung der Bewohnerschaft durch Bekleidung und Fensterlüftung angenommen. Ab Außentemperaturen von 32°C und darüber hinaus wird eine operative Raumlufttemperatur zwischen 24°C und 28°C als komfortabel definiert.

Bei der folgenden Bewertung der Ergebnisse muss beachtet werden, dass das graue Komfortband nach DIN einen Zielbereich für die Planung von Gebäuden definiert und nicht die Realität abbildet. Messpunkte außerhalb des Komfortbandes sind deshalb nicht automatisch unkomfortabel, sondern stellen vielmehr die Präferenzen der Bewohnerschaft dar. Die Herausforderung für die Forschenden bestand darin, anhand der Messwerte und Informationen über den Gebäudebetrieb zwischen Nutzerpräferenzen und Fehlfunktionen zu unterscheiden.

### Fazit

Der gemessene Verbrauch lag im Mittel ca. 30 bis 50 Prozent unter dem berechneten Bedarf. Die Messungen in den Wohnungen zeigten unterschiedliche Verhalten je nach Jahreszeit und auch individueller Vorlieben. Die Messungen zum Raumklima belegen, dass die Raumtemperaturen im Hochsommer trotz des Verzichts auf außen liegenden Sonnenschutz meist innerhalb der Komfortgrenzen liegen.



Abb. 6: Der Vergleich der Grundrisse zeigt: Die Menschen richten ihre Wohnungen anders ein, als es sich der Architekt vorgestellt hat. Die erste Variante (grau) stellt den Möblierungsvorschlag des Architekturbüros dar. Die Varianten entsprechen den Angaben der Befragten (farbig).

## Befragungen

### Nutzerempfinden

Was benötigt der Mensch, um sich in einem Gebäude wohlfühlen? Es gibt keine allgemeingültige Studie zur Mieterzufriedenheit, da sie von verschiedenen Faktoren abhängt, wie beispielsweise der individuellen Wohnsituation, dem Standort, den persönlichen Vorlieben und den Erwartungen der Mieterschaft. Untersuchungen zeigen, dass der thermische Komfort die größte Bedeutung für Zufriedenheit mit dem Raumkomfort hat [14]. Personen, die mit der Innenraumtemperatur zufrieden sind, bewerten auch andere Kriterien wie Luftqualität und Luftfeuchtigkeit besser [15]. Licht, Akustik oder Schallschutz spielen ebenfalls eine Rolle bei der Bewertung des Raumkomforts, wenn auch eine geringere. Zum Einsatz kam ein Mixed-Methods-Ansatz mit halbstrukturierten Fragebögen, leitfadengeführten Interviews, Messungen und Beobachtungen vor Ort.

### Akzeptanz

Durch das reduzierte Konzept und die materialgerechte Konstruktion ergibt sich eine eigene Ästhetik, z. B. durch die Form der Fenster und die unverkleideten Oberflächen. Obwohl die Wahrnehmung von Architektur sehr individuell ist und von vielen persönlichen Faktoren beeinflusst, spielt die Akzeptanz des Designs eine wichtige Rolle für die Nachhaltigkeit und Langlebigkeit der Gebäude – was nicht gefällt, wird irgendwann abgerissen. Um ein Stimmungsbild zu erhalten, wurden im Forschungsprojekt Einfach Bauen

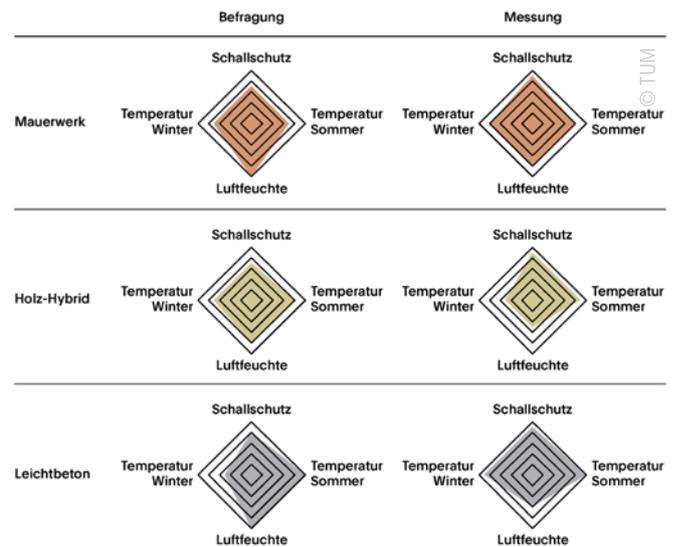


Abb. 7: Links: Nutzerempfinden – persönliches Empfinden der Temperatur im Winter und Sommer, der Luftfeuchte und des Lärmempfindens im Innenraum. Rechts: Auswertung der Messergebnisse der operativen Temperaturen im Winter und Sommer, der Luftfeuchte und des Schallschutzes

2 [16] die am Bau Beteiligten gefragt, wie sie ganz persönlich die Architektur der Häuser einschätzten.

Insgesamt war die Bewohnerschaft mit ihren Wohnungen und den räumlichen Bedingungen zufrieden. Die mit 3,10m ungewöhnlich hohen Räume wurden als sehr angenehm empfunden. Viele Befragte finden die Höhe optisch ansprechend, sie lässt den Raum größer wirken und vermittelt ein angenehmes Gefühl. Von mehreren Personen wurde angemerkt, dass die Raumhöhe zu einer besseren Luftqualität beim Kochen führe, da sich der Dampf im Raum verteile. In der Folge musste weniger gelüftet werden. Auch im Sommer mache sich die Raumhöhe durch bessere Luftverteilung bemerkbar. Im Winter hingegen müsse aufgrund des größeren Raumvolumens mehr geheizt werden.

Der Wunsch nach einem Balkon war unter den Mietern sehr verbreitet. Allerdings verfügen nur die Südwohnungen im 2. OG über einen eigenen Außenbereich. Diese Loggien wurden intensiv genutzt. Die Bewohner der Wohnungen ohne Balkon kompensierten dies durch die Benutzung der Außenanlagen oder der tiefen Fensterlaibung.

Die Räume wurden als gut nutzbar und ausreichend groß eingestuft. Viele waren zufrieden mit der Raumaufteilung und die Proportionen kamen gut an. Die Mehrzahl konnte die Wohnung so möblieren wie gewünscht. Einige Befragte gaben an, dass sie bei der Möblierung aufgrund des Grundrisses umdenken mussten. Eine Person gab sogar an, dass sie gezwungen war, die Wohnung so zu nutzen, wie der Architekt sie geplant hatte. Die Dokumentation der Möblierung zeigt allerdings, wie vielfältig die Einrichtungsmöglichkeiten sind. (Abb. 6).

Die Grundrisse, Außenanlagen und das Gebäudekonzept sind bei allen Häusern identisch, Unterschiede bestehen lediglich in der Materialität. Die Grafiken zeigen in der oberen Hälfte die empfundene Temperatur im Winter und Sommer, die empfundene Luftfeuchte und das Lärmempfinden der befragten Personen. Die Größe der farbigen Fläche gibt Auskunft über die Zufriedenheit der Befragten: Je größer die Fläche, desto positiver waren die Antworten. Die untere Hälfte der Grafik zeigt für die gleichen Kategorien die Auswertung der Messdaten. Hierzu wurden die in Abb. 5

vorgestellten Punktwolken für die operative Temperatur im Winter und im Sommer herangezogen. Die Bewertung des Schallschutzes basiert auf dem für die Forschungshäuser durchgeführten Schallmessungen der TH Rosenheim.

## Temperatur im Winter

Im Betonhaus konnten die Wohnungen nach den Messergebnissen ausreichend beheizt werden. Die Temperaturen liegen größtenteils im Komfortbereich, dennoch wurde das Haus als zu kühl empfunden. Die Messungen bestätigen auch die niedrigen Temperaturen im Holzhaus. Die Mieterschaft empfanden die Wohnungen als kühl, hatten sich aber aus persönlichen Gründen dafür entschieden, nicht mehr zu heizen. Im Mauerwerkshaus liegen Messungen und Empfinden im komfortablen Bereich.

## Temperatur im Sommer

Im Sommer punktet das Betonhaus mit seiner Speichermasse und der Verschattung durch die Bäume. Die Innentemperaturen sind angenehm kühl, was auch von der Bewohnerschaft so empfunden wurde. Im Holzhaus liegen die Temperaturen leicht über dem Komfortband. Die Zufriedenheit ist dennoch hoch. Im Mauerwerkshaus zeigen die Messungen im Durchschnitt angenehme Temperaturen im Sommer. Die Zufriedenheit der Bewohner ist trotzdem etwas geringer als beim Betonhaus.

## Schallschutz

Lärm im Wohnbereich kann zu Schlafstörungen und Belästigungen führen, während Verkehrslärm nachweislich Gesundheitsprobleme verursacht [12]. Die Einhaltung der Anforderungen an den Mindestschallschutz ist daher wichtig. Allerdings ist die Wahrnehmung von Schallschutz subjektiv und wird von verschiedenen Faktoren wie Alter und individuellen Empfindlichkeiten beeinflusst. Der Schallschutz in den drei Forschungshäusern entspricht den Mindestanforderungen. Schallmessungen in den Wohnungen konnten belegen [13], dass der Schallschutz die geforderten Werte

sogar übertrifft. Doch die Bewertung des Schallschutzes weicht in allen Häusern von den Messwerten ab und wird schlechter eingestuft. Die Untersuchung der Bewohnerzufriedenheit in diesen Häusern zeigt, dass Schallschutzanforderungen oft nicht dem individuellen Lärmempfinden gerecht werden. Für sehr empfindsame Menschen erweisen sie sich als unzureichend. Die Zufriedenheit wird durch die Kommunikation mit den Nachbarn beeinflusst. Oft ist nicht klar, dass auch bei Einhaltung der Schallschutzanforderungen Geräusche aus den Nachbarwohnungen wahrnehmbar bleiben. Es ist daher wichtig, dass die Bewohnerschaft über den zu erwartenden Schallschutz informiert wird, um ein harmonisches Zusammenleben zu ermöglichen.

## Fazit

Einfach Bauen beweist, dass es möglich ist, ressourceneffiziente und technikarme Häuser zu bauen, die zugleich ausreichende Nutzerzufriedenheit in allen untersuchten Kategorien bieten. Die Strategie der Reduktion ist somit erfolgreich.

## Ökobilanz

Ein Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten im Bereich Einfaches Bauen liegt in der Betrachtung der Umweltwirkung. Dabei werden die Prozesse der Gewinnung, Produktion und Entsorgung von Bauwerk und Gebäudetechnik sowie der Austausch seiner Einzelteile, also der gesamte Lebenszyklus eines Hauses, betrachtet. Diese Methode der Ökobilanz heißt LCA (engl. Life Cycle Assessment). Anhand der LCA-Ergebnisse sollen die Umweltwirkungen von Baustoffen und Technikkomponenten verglichen und Ansätze für eine Reduktion der Umweltwirkung aufgezeigt werden.

Die Untersuchung konzentriert sich auf den Klimawandel. Als Maß für die Klimaerwärmung wird das globale Erwärmungspotenzial, ausgedrückt in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent, untersucht. Dafür werden alle Treibhausgase, in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet und können so zu einem Wert aufaddiert werden. So beträgt zum Beispiel das CO<sub>2</sub>-Äquivalent für Methan 28: Das bedeutet, dass ein Gramm

Tab. 1: Übersicht der betrachteten Module

Lebenszyklusphasen	Modulgruppen	Module	hier zu berechnen	
Herstellung	A1-A3	Rohstoffbeschaffung	A1	X
		Transport	A2	X
		Produktion	A3	X
Errichtung	A4, A5	Transport	A4	
		Errichtung / Einbau	A5	
Betrieb und Nutzung	B1-B7	Nutzung	B1	
		Instandhaltung	B2	
		Instandsetzung/Reparaturen	B3	
		Austausch	B4	X
		Modernisierung	B5	
		Energieverbrauch im Betrieb	B6	
		Wasserverbrauch im Betrieb	B7	
Rückbau, Abfallbehandlung und Entsorgung	C1-C4	Rückbau/Abriss	C1	
		Transport	C2	
		Abfallbehandlung	C3	X
		Entsorgung	C4	X
Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze		Recyclingpotenzial	D1	separat darstellen

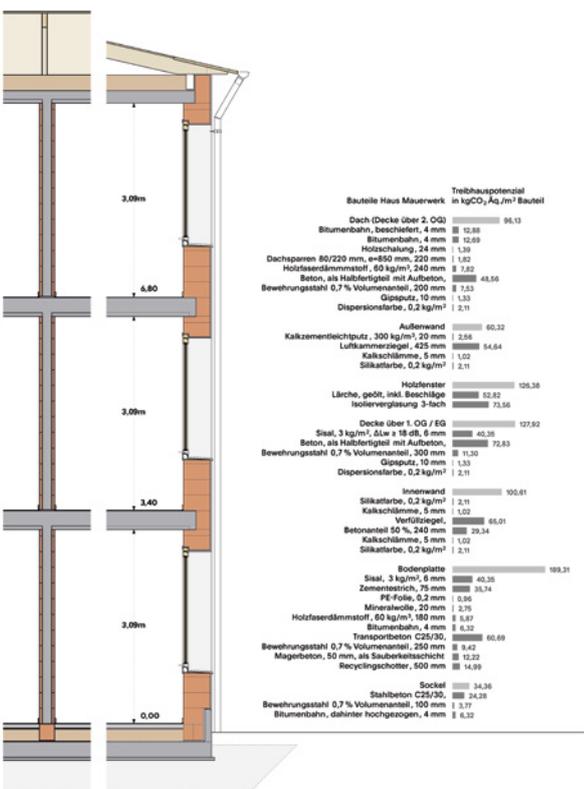


Abb. 8: Haus Mauerwerk: Detailschnitt und Treibhauspotential der Bauteile

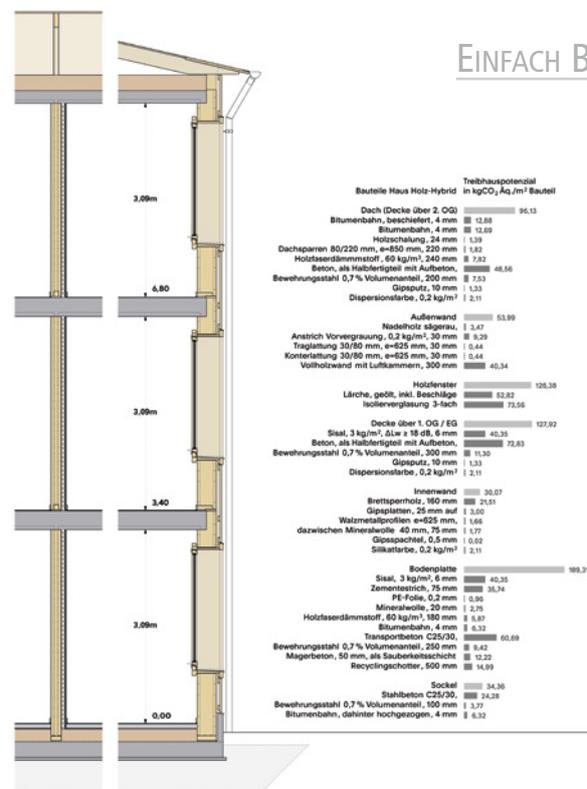


Abb. 9: Haus Holz-Hybrid: Detailschnitt und Treibhauspotential der Bauteile

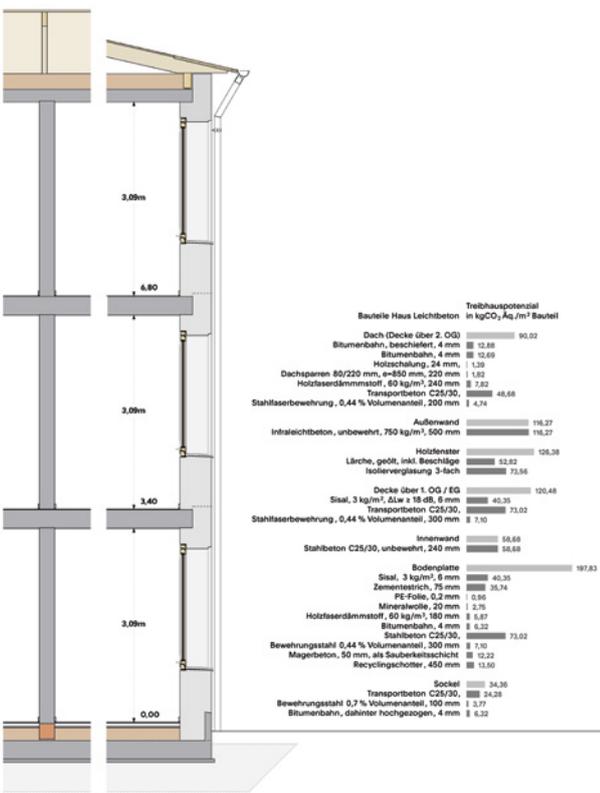


Abb. 10: Haus Leichtbeton: Detailschnitt und Treibhauspotential der Bauteile

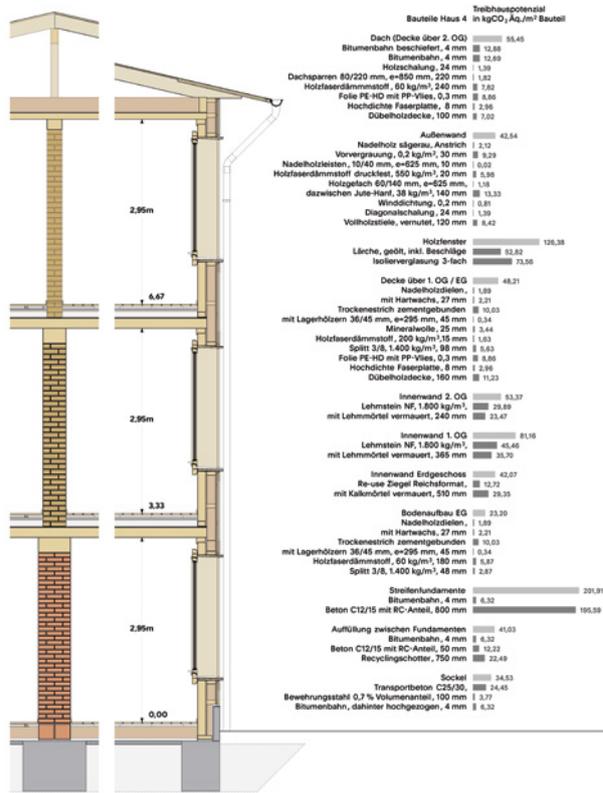


Abb. 11: Haus 4: Detailschnitt und Treibhauspotential der Bauteile

Methan in 100 Jahren 28-mal so stark zum Treibhauseffekt beiträgt wie ein Gramm Kohlendioxid.

Die Tabelle 1 zeigt die Gliederung des Lebenszyklus in Phasen und Module. Nicht alle Teile des Lebenszyklus wurden betrachtet, was darauf beruht, dass die Errichtungsphase (Module A4–A5) und die ersten Schritte der Entsorgungsphase (Module C1–C2) stark von den individuellen Projektanforderungen abhängen. Allgemeine, zuverlässige Daten hierzu sind nicht ausreichend verfügbar.

Das zusätzliche Modul D beschreibt potenzielle Vor- und Nachteile außerhalb des Lebenszyklus, wenn bestimmte Teile des Gebäudes nach dem Abriss weiterverwendet werden können. Für Holzwerkstoffe z. B. wird in den verwendeten Datensätzen eine hundertprozentige Verbrennung des Altholzes in einem Biomasseheizkraftwerk angenommen. Es wird weiter angenommen, dass dadurch exportierte Energie, thermische Energie aus Erdgas, substituiert [8]. Das Ergebnis dieses Moduls wird separat

ausgewiesen, da die positiven Effekte der Nachfolgenutzung von Material zum Teil bereits in der Herstellungsphase berücksichtigt werden – z. B. bei der Wärmeerzeugung in der Baustoffproduktion – und bei einer Addition mehrfach gezählt würden. In der Untersuchung wird entsprechend den Konventionen der Norm angenommen, dass Gebäude eine Lebensdauer von 50 Jahren haben und danach abgerissen werden. Die Bewertung erfolgt nach der Methode »Heute gebaut, morgen zurückgebaut«. Für die Bilanzierung des vollständigen Abrisses nach 50 Jahren werden Datensätze verwendet, die die heutige Situation widerspiegeln.

Der Austausch von Gebäudeteilen in diesen 50 Jahren erfolgt entsprechend der technischen Lebensdauer. Die Datengrundlage für die Anzahl der Austauschzyklen stammt aus der Tabelle »Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)« mit Stand vom 24.02.2017 [9]. Die Austauschzyklen für Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung werden durch Bilanzierungsregeln des QNG vorgegeben [10].

Die Einhaltung dieser standardisierten Rechenregeln macht es möglich, die Ergebnisse von Ökobilanzen miteinander zu vergleichen. Die bei dieser Methode getroffenen Festlegungen illustrieren natürlich auch, dass die Ergebnisse einer Ökobilanz nur eine Abschätzung der untersuchten Umweltwirkung ermöglichen. Als Werkzeug zum Vergleich von verschiedenen Optionen und Unterstützung von Entscheidungsprozessen ist diese Abschätzung trotzdem wertvoll.

## Ergebnisse und Optimierung

Bei der Auswertung der Ökobilanz der drei Forschungshäuser zeigte sich, dass v. a. der Einsatz von Beton diese negativ beeinflusst. Gleichzeitig schützt die thermische Trägheit des Materials vor Überhitzung der Häuser im Sommer. Aus dieser Überlegung heraus wurde ein viertes Forschungshaus gebaut. Hier bestehen die Decken und Außenwände aus Holz und die tragenden Innenwände aus Lehmstein, welche die thermische Trägheit absichern.

Die Abb. 8 bis 11 zeigen nacheinander alle vier Forschungshäuser als Fassadenschnitt, daneben sind die Bauteilaufbauten und das Treibhauspotenzial dargestellt.

Das Haus Leichtbeton weist die geringste Anzahl an Schichten auf. Innen- und Außenwände bestehen lediglich aus einem Material. Bei den Häusern Mauerwerk und Holz-Hybrid sind noch zusätzliche Schichten als Witterungsschutz bei den Außenwänden oder als Schallschutz bei den Innenwänden verbaut, wodurch die Bauteilliste entsprechend länger ist.

Die Außenwände von Haus 4 sind recht vielschichtig: Nicht verleimte, vertikale Holzprofile tragen die Lasten ab. Darauf folgt eine vernagelte Diagonalschalung aus sägerauen Brettern, die das Bauteil aussteift. Eine Unterspannbahn dient als Winddichtung, gefolgt von einer Dämmung aus Jute-Hanf zwischen Holzprofilen, gehalten von einer druckfesten Holzfaserplatte. Eine auf Abstand montierte senkrechte Schalung aus Fichte dient als Witterungsschutz.

Auch die Geschossdecken haben eine nach Funktionen gegliederte Schichtenabfolge: Mit Holzdübeln verbundene gehobelte Holzprofile tragen die Lasten zu den Innen- und

Tab. 2: Treibhauspotenzial der Forschungshäuser im Vergleich in  $\text{CO}_2 \text{ Äq./m}^2_{\text{NRF}} \cdot \text{a}$

	Mauerwerk	Holz-Hybrid	Leichtbeton	Haus 4
Gründung	1,09	1,07	1,38	1,11
Dach	0,95	0,93	1,01	0,74
Außenwände	1,78	1,57	3,31	1,18
Fenster und Außen-türen	0,49	0,49	0,49	0,54
Decken	2,37	2,32	2,55	1,01
Innenwände	1,96	0,72	1,30	0,98
Technik	1,33	1,32	1,33	1,31
<b>Summe</b>	<b>9,97</b>	<b>8,43</b>	<b>11,38</b>	<b>6,87</b>

Tab. 3: Recyclingpotenzial der Forschungshäuser im Vergleich in  $\text{CO}_2 \text{ Äq./m}^2_{\text{NRF}} \cdot \text{a}$

	Mauerwerk	Holz-Hybrid	Leichtbeton	Haus 4
Gründung	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04
Dach	-0,37	-0,36	-0,37	-0,82
Außenwände	-0,11	-3,05	-0,05	-2,20
Fenster und Außen-türen	-0,10	-0,13	-0,10	-0,13
Decken	-0,16	-0,15	-0,16	-1,49
Innenwände	-0,11	-0,88	-0,12	-0,59
Technik	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56
<b>Summe</b>	<b>-1,44</b>	<b>-5,17</b>	<b>-1,40</b>	<b>-5,82</b>

Außenwänden hin ab. Darauf ist eine genagelte Hartfaserplatte, die die Decke aussteift.

Eine Folie darüber erfüllt eine Doppelfunktion als Witterungsschutz während der Bauphase und Rieselschutz für die darauffolgende Schüttung aus Splitt, die zur Schalldämpfung notwendig ist. Auf dem Splitt wurde eine druckfeste Holzfaserplatte verlegt, um die Decke für weitere Arbeitsschritte begehbar zu machen. Es folgt eine Trittschalldämmung aus Mineralwolle und die Traglattung der Nadelholzdiele. Zwischen der Traglattung sind Elemente aus zementgebundenem Basaltsplitt als Trockenestrich verlegt. Dieser hat eine Flächenlast von  $75 \text{ kg/m}^2$  und reduziert dadurch die Übertragung von Trittschall.

Trotz der vielschichtigen Konstruktionen bei den Decken und Außenwänden konnte beim Haus 4 die Treibhausgase, die bei Herstellung, Austausch und Entsorgung der Bauteile entstehen, im Vergleich reduziert werden. In Tabelle 2 ist das Treibhauspotenzial der vier Forschungshäuser gegenübergestellt. Die Werte beziehen sich auf einen Quadratmeter Nettoraumfläche und ein Jahr.

Das Haus Leichtbeton hat mit  $11,38 \text{ CO}_2 \text{ Äq./m}^2_{\text{NRF}} \cdot \text{a}$  den höchsten Wert. Dreigeschossige Mehrfamilienhäuser weisen üblicherweise Werte von 16 bis  $18 \text{ kg CO}_2 \text{ Äq./m}^2_{\text{NRF}} \cdot \text{a}$  auf [11]. Den niedrigsten Wert hat das Haus 4 mit  $6,87 \text{ CO}_2 \text{ Äq./m}^2_{\text{NRF}} \cdot \text{a}$  und unterbietet das Holz-Hybrid-Haus vor allem bei den Decken, die im Holz-Hybrid-Haus aus Stahlbeton bestehen und bei Haus 4 mit Dübelschichten ausgeführt wurden.

In Tabelle 3 ist das Recyclingpotenzial der Häuser gegenübergestellt. Das größte Potenzial liegt bei den Gebäuden mit einem hohen Anteil an nachwachsenden Materialien. In den zugrunde liegenden Datensätzen wird bei Holzwerkstoffen davon ausgegangen, dass diese nach der Abfallbehandlung zur Energiegewinnung genutzt werden. Der dadurch vermiedene Einsatz von fossilen Quellen wird der Bilanz zugeschrieben.

## Fazit

Durch die Untersuchung der Umweltwirkungen von Baustoffen und Technikkomponenten mithilfe einer Ökobilanz konnten Ansätze für eine Reduktion der Umweltwirkung erschlossen werden. Durch die Substitution von Zement und Beton durch Holz und Lehm ist es möglich, einfach und klimarobuste Gebäude zu erstellen und die negativen Umweltwirkungen, die durch Gebäude und Gebäudetechnik entstehen, zu reduzieren.

Sicherlich wird es auf absehbare Zeit – vor allem im Tiefbau – keinen adäquaten Ersatz für das Material Beton geben. Umso wichtiger ist es, in Bereichen, in denen es Alternativen zum Beton gibt, diese auch einzusetzen und deren Entwicklung voranzutreiben. Das Forschungshaus 4 zeigt zudem, dass sich Holz und Lehm nicht nur konstruktiv sehr gut ergänzen, sondern dass die beiden Baustoffe auch ästhetisch sehr gut harmonieren.

## Literatur

- [1] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen. BBSR-Online-Publikation 04/2019. Bonn, März 2019
- [2] Santarius, Tilman: Die Folgen technikzentrierter Effizienzstrategien – Wirtschaftswachstum, Umweltverbrauch und die vielen Gesichter des Rebound-Effekts. In: BBSR (Hrsg.): Lowtech im Gebäudebereich. Fachsymposium TU Berlin vom 17.05.2019. Bonn: Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (Schriftenreihe Zukunft Bauen, Band 21), 2020, S. 12–23
- [3] Luo, Maohui et al.: The dynamics of thermal comfort expectations: The problem, challenge and implication. *Building and Environment* 95 (2016), p. 322-329
- [4] Bund Deutscher Architekten (Hrsg.): Standards im Wohnungsbau – Kontroverse zur aktuellen Rechtslage. URL: <https://www.bda-bund.de/wp-content/uploads/2016/08/BDA-Standards-im-Wohnungsbau.pdf> [Abruf: 26.11.2019]
- [5] DAB Deutsches Architektenblatt: Florian Nagler: wie man einfach und nachhaltig baut. Interview URL: <https://www.dabonline.de/architektur/florian-nagler-einfach-bauen-bad-aibling-holz-leichtbeton-daemmziegel-versuchsbauten/> [Abruf: 27.11.2024]
- [6] Nagler, Florian et al.: Einfach Bauen: Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion. Forschungsinitiative Zukunft Bau: F 3151. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019
- [7] Nagler, Florian (Hrsg.): Einfach Bauen: Ein Leitfaden. Basel: Birkhäuser, 2021
- [8] Rüter, Sebastian et al.: Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Universität Hamburg. URL: [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn050490.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn050490.pdf) [Abruf: 02.05.2024]
- [9] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) URL: [https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer\\_Bauteile/BNB\\_Nutzungsdauern\\_von\\_Bauteilen\\_2017-02-24.pdf](https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf) [Abruf: 02.05.2024]
- [10] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3, Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude URL: [https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG\\_Handbuch\\_Anlage-3\\_Anhang-311\\_LCA\\_Bilanzregeln-WNG\\_v1-3.pdf](https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-311_LCA_Bilanzregeln-WNG_v1-3.pdf) [Abruf: 04.11.2024]
- [11] Lennerts, Kunibert et al.: Verantwortung übernehmen – Der Gebäudebereich auf dem Weg zur Klimaneutralität. URL: <https://www.initiative-co2.de/wp-content/uploads/2022/06/Extended-Executive-Summary-08122021-SIZ-KIT-finale-V2.pdf> [Abruf: 19.09.2024]
- [12] Laussmann, Detlef et al.: Soziale Ungleichheit von Lärmbelastung und Straßenverkehrsbelastung: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 56 (2013), Nr. 5/6, S. 822–831. doi: 10.1007/s00103-013-1668-7
- [13] TH Rosenheim: Bauakustische Messungen der bewerteten Bau-Schalldämmmaße und der bewerteten Norm-Trittschallpegel in ausgewählten Übertragungssituationen. Messbericht MB\_2020\_1B. Rosenheim: 2020
- [14] Forgiarini Rupp, Ricardo; Giraldo Vásquez, Natalia; Lamberts, Roberto: A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and buildings* 105 (2015), S. 178–205
- [15] Nicol, J. Fergus; Humphreys, Michael A.: Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings* 34.6 (2002): S. 563–572
- [16] Jarmer, Tilmann et al.: Einfach bauen 2 – Planen, Bauen, Messen. Schlussbericht. München: 2021
- [17] Jarmer, Tilmann; Niemann, Anne: Nicht simpel, sondern durchdacht: Forschungsprojekt »Einfach Bauen«. *Klimagerechtes Forschungshaus aus Leichtbeton zeigt, dass es einfach geht. Bauen+ 7* (2021), Nr. 2, S. 34–39
- [18] Niemann, Anne: Das Forschungsprojekt »Einfach Bauen«. *Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk. Bauen+ 6* (2020), Nr. 5, S. 27–32

## DIE AUTOREN

**Dr.-Ing. Architekt Tilmann Jarmer**  
tilmann.jarmer@tum.de

Tilmann Jarmer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TUM und parallel als Projektleiter bei Florian Nagler Architekten tätig.

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren  
Arcisstraße 21  
80333 München



**Dr.-Ing. Architektin Anne Niemann**  
anne.niemann@th-rosenheim.de

Anne Niemann lehrt als Vertretungsprofessorin für Entwerfen und Holzbau an der Fakultät für Architektur an der TH Rosenheim.

Technische Hochschule Rosenheim  
Hochschulstraße 1  
83024 Rosenheim



**Laura Franke, M.Sc. Umwelting. (TUM)**

Laura Franke war von 2016 bis 2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen mit dem Forschungsschwerpunkt der robusten Optimierung und betreute die Simulationen und die späteren Messungen in den Forschungslabors.

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren  
Arcisstraße 21  
80333 München

