

Bauphysikalische und ökologische Potenziale von Gebäuden in Holzbauweise

Aufgrund des hohen und zunehmenden Ressourcenverbrauchs von Gebäuden ist der Bausektor einer der Hauptverursacher von Umweltbelastungen. Als Folge dessen wächst die Aufmerksamkeit für ressourcenschonende und nachhaltige Werkstoffe, Konstruktionen und Lösungen. Holzbauweisen bieten hierbei zahlreiche ökologische und konstruktive Anknüpfungspunkte. Ihre spezifischen stofflichen, konstruktiven und fertigungstechnischen Merkmale sind bereits Gegenstand bauphysikalischer Untersuchungen, die sich aktuell mehr und mehr auf massive Holzbauteile sowie neue Impulse der Verarbeitungs- und Vorfertigungstechnik ausweiten. Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung werden in diesem Beitrag sowohl die wärme-, feuchte- und schalltechnischen als auch die ökologischen Eigenschaften von Flächenbauteilen in Holzrahmen- und Holzmassivbauweise gegenübergestellt. Im Vergleich mit Stahlbetonkonstruktionen wird gezeigt, dass die vorhandenen Daten und Methoden Planungsentscheidungen nach bauphysikalischen und ökologischen Kriterien unterstützen können. Zugleich werden Potenziale der Bauweisen erkennbar, die sich durch Weiterentwicklung einlösen lassen.

Stichworte Holzbau; Holzbauweisen; ressourcenschonendes Bauen; hygrothermische Bauteilsimulation; Schallschutz; Lebenszyklusanalyse; Energiebedarf

1 Motivation

Aufgrund des hohen Ressourcen- und Energieverbrauchs im Bauwesen wächst das Interesse an ressourcenschonendem und nachhaltigem Bauen [1]. Das Ziel ist es, Umweltbelastungen jeglicher Art im Bauwesen zu reduzieren und nach Möglichkeit die Prozesse mittels umweltschonender Szenarien weiterzuentwickeln. Der Fokus liegt nunmehr auf der Verwendung von sowohl natürlichen und nachwachsenden Rohstoffen als auch von nachhaltigen Konstruktionslösungen [2, 3]. Der Werkstoff Holz bietet vielversprechende Voraussetzungen hierfür und gewinnt zunehmend an Attraktivität. Holz punktet nicht nur durch seine Nachhaltigkeit, sondern ebenso durch seine architektonische Vielfalt, seine Struktur sowie seine Material- und bauphysikalischen Eigenschaften.

Um das Potenzial von Holzbauweisen abschätzen zu können, werden zunächst Holzbauelemente hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Performanz genauer betrachtet und Ausführungen in Stahlbetonbauweise gegenübergestellt und interpretiert. Die Untersuchungen beziehen

Building physical and ecological potentials of buildings in timber construction

Due to the high and increasing resource consumption of buildings, the construction sector is one of the major sources of environmental pollution. As a result, attention is growing for resource-saving and sustainable materials, constructions and solutions. Timber construction methods offer numerous ecological and constructive linking points. Their specific material, constructional and manufacturing characteristics are already the subject of investigations into building physics which are currently being extended more and more to solid timber components and new impulses in processing and prefabrication technology. Within the framework of a holistic approach, this article compares the thermal, moisture and sound properties as well as the environmental quality of timber-frame and solid timber construction elements. In comparison with reinforced concrete constructions, it is shown that the available data and methods can support planning decisions according to building physical and environmental criteria. At the same time, potentials of the construction methods become apparent, which can be realised through further development.

Keywords Timber construction; timber construction methods; resource-efficient construction; hygrothermal component simulation; sound insulation; life cycle analysis; energy demand

sich auf die Hygrothermik, den Schallschutz sowie den Energiebedarf zugelassener Beispielkonstruktionen. Des Weiteren stellt die Nachhaltigkeit im Sinne der Ökologie und der Ökonomie eine wichtige Grundlage zur ganzheitlichen Evaluation dar, weshalb die gewählten Systeme einer Lebenszyklusanalyse unterzogen werden [4]. Der Fokus liegt im Rahmen dieser Betrachtung auf Bürogebäuden.

2 Besonderheiten und Potenziale des Baustoffes Holz

Holz ist ein natürliches Material und erlaubt sowohl mit seiner Vielfalt als auch mit seinen ästhetischen und strukturellen Eigenschaften ein großes Anwendungsspektrum im Bauwesen. Als Baustoff hat Holz eine jahrhundertlange Tradition und wird mit positiven Empfindungen, wie beispielsweise Wärme, Natürlichkeit und Geborgenheit, assoziiert [5]. Durch seine guten Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften eignet sich der Baustoff zudem hervorragend als Bau- und Konstruktionsholz [2]. Daher stellt die Verbindung von seinem emotionalen Potenzial mit seinen bautechnischen Eigenschaften, wie Tragfähig-

keit und Beständigkeit, die Grundlage für die zunehmende Verwendung als Material zur Gestaltung unserer gebauten Umgebung dar [2, 6]. Einhergehend mit dem zunehmenden Bewusstsein für Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung gewinnt Holz als innovatives Material in der zeitgenössischen Architektur an Bedeutung. Aus diesem Grund hat sich die Verwendung des Werkstoffes Holz im Bauwesen in den letzten Jahrzehnten stetig entwickelt [6].

Verbunden mit dem anhaltenden Trend der Urbanisierung und dem steigenden Wohnflächenbedarf, erhöht sich die Notwendigkeit des kostengünstigen und sowohl material- als auch zeiteffizienten Bauens [7, 8]. Hierbei liegt das Potenzial des Holzbaus vor allem in den technischen Möglichkeiten der maschinellen Vorfertigung. Die technologische Entwicklung neuer Verfahren in der Werkstoffherstellung und -verarbeitung führten zu digitalisierten Fertigungsmethoden, verbunden mit dem flexiblen Einsatz von Maschinen wie Industrierobotern [9]. Computergestützte Werkzeugmaschinen eröffnen neue Bearbeitungsmethoden im Holzbau mit einem hohen Maß an Materialeffizienz und Potenzial zur Kostenreduzierung [8, 10]. Aufgrund dieses Fortschritts wird der Werkstoff Holz nun auch vermehrt in mehrgeschossigen Bauten eingesetzt, was sein Potenzial in Bezug auf das flächeneffiziente Bauen als eine Antwort auf die Urbanisierung darstellt [8]. Darüber hinaus bietet der Holzbau, aufgrund seines hohen Grades an Vorfertigung, den Vorteil die Bauzeit zu verkürzen. Kombiniert mit modularer Planung, welche sich mit geringem Aufwand an verschiedene Grundrisse und Nutzungen anpassen lässt, kann zudem die Planungszeit und somit die gesamte Projektlaufzeit reduziert werden.

3 Untersuchung verschiedener Fertigteilkonstruktionen

Anhand von Beispielkonstruktionen aus Holzrahmen-, Holzmassivbau und Betonfertigteilkonstruktion wurden bauphysikalische und ökologische Bewertungsmethoden quantifiziert. Die Wahl fiel auf typische Ausführungen, zu deren Bewertung die erforderlichen Daten und Modelle vorliegen. Die Bewertungskriterien berücksichtigen auch die Spezifik der Konstruktionen. So können Bauteile aus Holz hinsichtlich Feuchtigkeit anfälliger als andere im Bauwesen verwendete Materialien sein, was in Verbindung mit Fragen der Langlebigkeit steht. Die im Vergleich zu Beton geringere Rohdichte wirkt sich sowohl auf die akustische als auch auf die thermische Wirkung von Bauteilen und Räumen aus [1, 11]. Die flächenbezogene Masse, der Elastizitätsmodul und auch die Bauteilverbindungen beeinflussen die Schalldämmung, sodass Gebäude in Holzbauweise oftmals eine höhere Luft- und Körperschallübertragung aufweisen [11]. Durch die geringere Wärmespeicherfähigkeit von Holz kann der Innenbereich von Gebäuden größeren Temperaturschwankungen unterliegen, was sich besonders in der Kühlperiode auf den Energiebedarf auswirkt. Schließlich unterschei-

den sich Holz und Beton auch hinsichtlich der Umweltwirkungen.

3.1 Untersuchte Konstruktionen

Für die bauphysikalische Untersuchung wurden geprüfte Beispielkonstruktionen in Holzmassiv- sowie Holzrahmenbauweise aus dem Bauteilkatalog nach [12] gewählt. Durch verschiedene Konstruktionsdetails lassen sich beliebig viele Variationen einzelner Bauteile generieren, die jeweils unterschiedliche bauphysikalische und ökologische Kennwerte aufweisen. Je nach Bedarf können durch Änderungen der Bauteildicke und der verwendeten Materialien verschiedene Eigenschaften den Anforderungen angepasst werden. Der Rahmen dieser Untersuchung galt aber nicht der Vollständigkeit, sondern der Anwendbarkeit von Daten, Modellen und Methoden für eine integrale bauphysikalische und ökologische Bewertung.

3.1.1 Außenwandkonstruktionen

Damit die Konstruktionen im Rahmen einer Gebäudesimulation sinnvoll gegenübergestellt werden können, liegen die U-Werte der Konstruktionen zwischen $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Außenwand in Holzrahmenkonstruktion besteht aus einem dreischaligen Aufbau und ist in Bild 1 schematisch skizziert. Außenseitig des mit Mineralwolle gefüllten Holzrahmens befindet sich eine Holzaußenwandverkleidung. Innenseitig befinden sich eine zusätzliche Dämmschicht aus Mineralwolle und eine Gipskartonbeplankung. Die Holzmassivbaukonstruktion weist einen ähnlichen Schichtenaufbau wie die Holzrahmenkonstruktion auf. Der Unterschied liegt darin, dass sich innenseitig eine circa 10 cm starke Massivholzplatte befindet und der Holzrahmen deutlich schlanker ausgeführt ist, da er nur der Befestigung der Außenwandverkleidung dient [12]. Bei der Betonfertigteilaußenwand handelt es sich um eine zweischalige Stahlbetonkonstruktion mit einer Mineralfaserkerndämmung inklusive einem Außen- und Innenputz [13]. Die untersuchten Konstruktionen sind in Bild 1 gegenübergestellt.

Zusätzlich wurde eine Holzmassivaußenwandkonstruktion mit einer 30 cm starken Holzplatte untersucht, um Rückschlüsse auf den Einfluss der Erhöhung der Masse im Holzbau zu ziehen. Damit der energetische Vergleich mit den anderen Konstruktionen vorgenommen werden kann, reduziert sich die Dämmebene entsprechend, damit derselbe U-Wert vorliegt. Auf eine detaillierte feuchte-technische Untersuchung dieser Konstruktion wurde verzichtet.

3.1.2 Innenwandkonstruktionen

Die Holzrahmeninnenwand weist eine Ausfachung aus Mineralwolle sowie eine beidseitige Doppelbeplankung

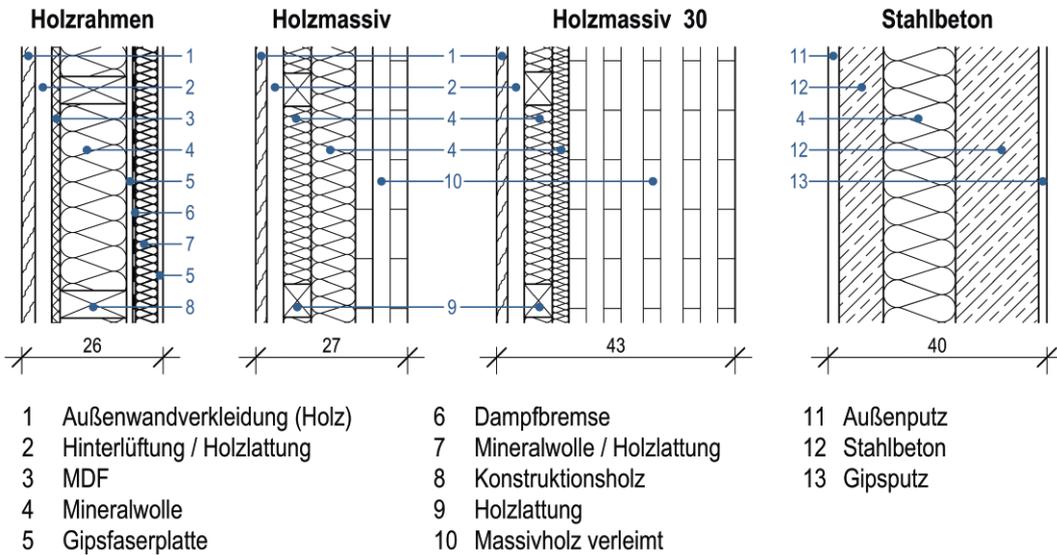


Bild 1 Schematische Zeichnung der untersuchten Außenwandkonstruktionen in Anlehnung an [12, 13]
Schematic drawing of the investigated exterior wall constructions based on [12, 13]

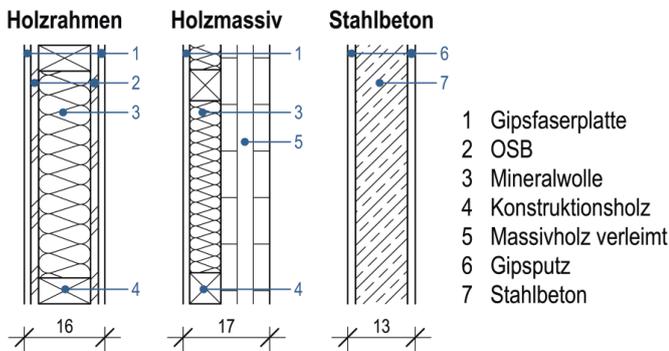


Bild 2 Schematische Zeichnung der untersuchten Innenwandkonstruktionen in Anlehnung an [12, 13]
Schematic drawing of the investigated interior wall constructions based on [12, 13]

aus Gipskarton auf (Bild 2). Die zweischalige Massivholzinne wand besteht aus einer circa 10 cm dicken Massivholzplatte (analog zur Außenwand) und einer Gipskartonbeplankung. Der Zwischenraum ist mit Mineralfaser befüllt. Die Stahlbetoninnenwand ist eine beidseitig verputzte Betonschicht gleicher Dicke wie die Massivholzplatte, ohne zusätzliche Beplankung oder Dämmung [12, 13].

3.1.3 Geschossdecken

Die untersuchten Geschossdeckenkonstruktionen sind in Bild 3 dargestellt. Der Zwischenraum der Holzbalkendecke ist zu einer Hälfte mit Zellulosefaser und zur anderen Hälfte mit Luft befüllt. Unterseitig ist die Konstruktion mit Gipskarton doppelt beplankt, oberseitig ist der Zwischenraum mit einer Spanplatte abgedeckt, auf der sich eine lose Schüttung mit hoher Rohdichte (1800 kg/m^3) befindet. Der Fußbodenaufbau besteht aus einer Trittschalldämmung und einem darauf schwimmenden Zementestrich sowie einem Eichenholzparkett. Die Massiv-

holzgeschosdecke besteht aus einer 14 cm starken Massivholzplatte, auf der sich eine elastisch gebundene Schüttung mit hoher Rohdichte (1500 kg/m^3), eine Trittschalldämmung mit schwimmendem Zementestrich sowie ebenfalls ein Eichenholzparkettboden befindet [12]. Die Stahlbetonfertigteildecke ist unterseitig verputzt, oberseitig liegt ein in der Trittschalldämmung schwimmender Zementestrich mit einem Eichenholzparkettboden vor.

Hinsichtlich der Veranschaulichung der akustischen Potenziale von Holzmassivkonstruktionen wurde zusätzlich eine Holzmassivdecke mit einer Schüttungsdicke von 5 cm (Fußbodenaufbau, sonst analog zur vorherigen) und einer Massivholzplatte mit einer Stärke von 30 cm untersucht.

3.2 Hygrothermische Gebäudesimulation

Mithilfe des Softwaretools WuFi Plus [14] wurden die in 3.1 beschriebenen Konstruktionen im Rahmen einer Gebäudesimulation im Kontext einer typischen Büronutzung gegenübergestellt. Das untersuchte Einraummodell weist eine für kleinere Mehrpersonnbüros typische Nutzfläche von rund 27 m^2 und eine Raumhöhe von 3 m auf. In der Ost-Süd-Fassade und der Süd-West-Fassade befindet sich jeweils ein $4,5 \text{ m}^2$ großes Fenster. Das Einschaltkriterium des Sonnenschutzes liegt bei 150 W/m^2 Gesamteinstrahlung [15, 16]. Das Nutzungsprofil für ein 4-Personenbüro entspricht den Vorgaben gemäß [17]. In den Sommermonaten wird eine Nachtlüftung mit einem Luftwechsel von 2/h angesetzt. Die zeitabhängigen internen Lasten durch Geräte und Personen lehnen sich [18, 19] an. Das Heiz- und Kühlsystem setzt sich aus einer Sole-Wasser-Wärmepumpe sowie einem Klimagerät (Direktverdampfer) mit einer Mischung der Kältemittel R32, R125 und R134a zusammen. Das System wurde als ideal angenommen und eine Nachtabsenkung um 4 K gewählt.

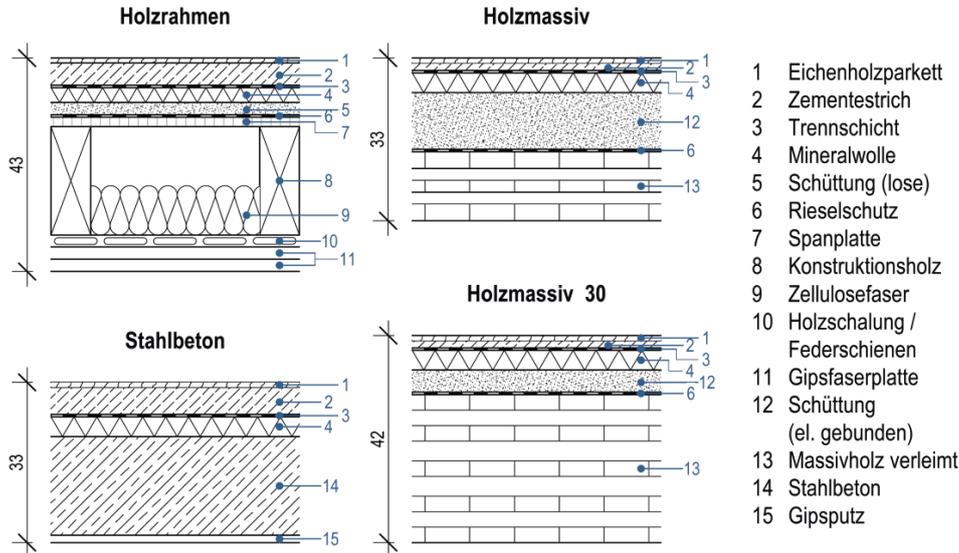


Bild 3 Schematische Zeichnung der untersuchten Geschossdeckenkonstruktionen in Anlehnung an [12, 13]
Schematic drawing of the investigated interior wall constructions based on [12, 13]

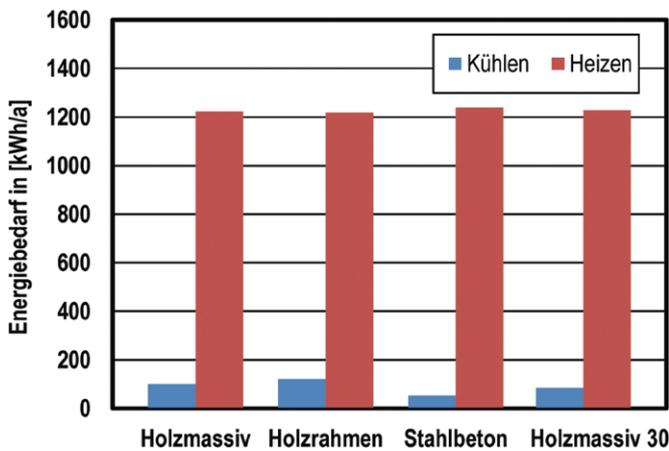


Bild 4 Energiebedarf in kWh/a der Konstruktionen für Heizen und Kühlen
Energy demand in kWh/a of the constructions for heating and cooling

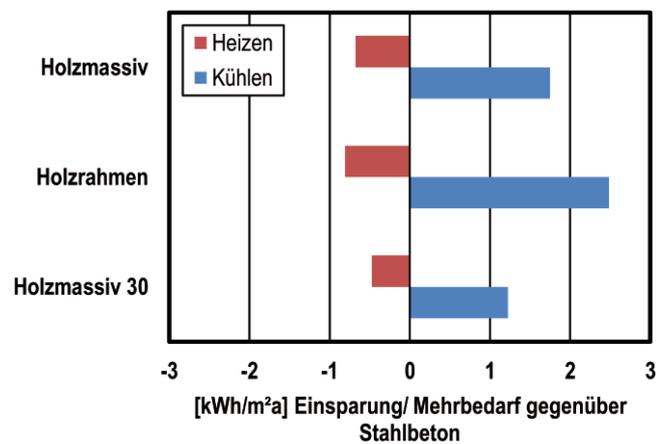


Bild 5 Einsparungen und Mehrbedarf der Holzkonstruktionen gegenüber der Stahlbetonfertigteilkonstruktion in kWh/m²a hinsichtlich des jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarfs pro Quadratmeter Nutzfläche
Savings and additional demand of the wood structures compared to the precast reinforced concrete structure in kWh/m²a in terms of annual heating and cooling energy demand per square meter of floor space

Den Simulationen liegen die Klimadaten für den Standort Holzkirchen für das Jahr 2020 zugrunde.

Die Ergebnisse der Gebäudesimulation zeigen in Bild 4 erwartungsgemäß, dass der Kühlenergiebedarf sowohl bei der Holzrahmen- als auch bei der Holzmassivbauweise höher ist, als bei der Betonfertigteilbauweise. Hinsichtlich des Heizenergiebedarfs weisen beide Holzbauweisen gegenüber der Betonfertigteilbauweise geringere Werte auf, was in Anbetracht der nahezu identischen U-Werte plausibel ist.

Die entsprechenden Relationen (Einsparung, Mehrbedarf) verdeutlicht Bild 5. Bei den Holzkonstruktionen sind die Einsparungen der Heizenergie im Winter im Vergleich zu Stahlbeton geringer als der Mehrbedarf an Kühlenergie im Sommer. Bei der Holzmassivbauweise zeigt sich der Einfluss der höheren Masse und damit größeren Wärmespeicherfähigkeit. In diesem Zusammenhang stellt eine Erhöhung des Holzmassivanteils auf eine Stärke von

30 cm einen geringeren Mehrbedarf an Kühlenergie gegenüber Stahlbeton dar.

3.3 Hygrothermische Bauteilsimulation der Außenwandkonstruktionen

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 3.2 erfolgte mithilfe des Softwaretools WuFi Pro [20] eine hygrothermische Untersuchung der Außenwandkonstruktionen über einen Zeitraum von 5 Jahren. Dazu wurden die zuvor simulierten Innenklimabedingungen aus WuFi Plus importiert, um die Konstruktionen unter möglichst realen Nutzungsbedingungen bewerten zu können und die im Programm hinterlegten Klimadaten für den Standort Holzkirchen als Außenklimabedingungen verwendet. Alle Konstruktionen wurden in den beiden maßgebenden

Orientierungen – Nord und West – und in den beiden Szenarien – konventionelle Bauweise (typische Baufeuchten) und Fertigteilbauweise (niedrige Baufeuchten) – hinsichtlich des Trocknungsverhaltens, des Schichtwassergehalts in der Wärmedämmschicht, des Frostrisikos [21], des Tauwasserausfalls [22] und des Schimmelpilzrisikos [23] an den Oberflächen sowie im Bauteil, der Holzfeuchte [24] und des Holzfäulerisikos [25] analysiert und bewertet.

Sämtliche Konstruktionen befinden sich bei der konventionellen Bauweise nach spätestens 5 Jahren im dynamischen Gleichgewicht des Gesamtwassergehalts, wobei sich die Trocknungsdauer bei der Holzfertigteilbauweise um ein bis zwei Jahre verkürzt. Bei der Stahlbetonfertigteilkonstruktion kann keine verkürzte Trocknungsdauer bezüglich des Gesamtwassergehalts festgestellt werden. Des Weiteren findet in keiner der Schichten der Konstruktionen bei keinem der Szenarien eine Feuchteakkumulation statt. Darüber hinaus liegt in allen betrachteten Fällen der Wassergehalt der Dämmschicht(en) dauerhaft unterhalb des im Simulationsprogramm hinterlegten Grenzwerts, ab dem sich die Wärmeleitfähigkeit feuchteabhängig erhöht.

Die Frostgefahr kann bei den Holzkonstruktionen in allen Szenarien als nicht vorhanden beurteilt werden, da sich an den kritischen Stellen der nicht frostbeständigen Holz-Materialien zu keinem Zeitpunkt ein Durchfeuchtungsgrad über 30% des maximalen Wassergehalts bzw. eine relative Porenluftfeuchte von mehr als 95% einstellt [21]. Bei der Stahlbetonkonstruktion können Frostschäden in der Regel aufgrund der verwendeten frostbeständigen Materialien ausgeschlossen werden.

Hinsichtlich des Tauwasserausfalls und Schimmelpilzwachstums an Innenoberflächen weist keine der Konstruktionen ein Risiko auf. Schimmelpilzwachstum innerhalb der Bauteile kann ebenfalls für alle Konstruktionen ausgeschlossen werden. Innerhalb der Stahlbetonkonstruktion fällt bei der konventionellen Bauweise an der Trennschicht zwischen der Stahlbeton-Außenschale und der Kerndämmung Tauwasser aus. Dies geschieht jedoch nur in den ersten beiden Tauperioden und unterschreitet dabei den Grenzwert von 200 g/m² [22]. Bei den Holzkonstruktionen hingegen ist das nicht der Fall. Innerhalb dieser fällt in keinem der Szenarien Tauwasser aus.

Der bereits erwähnten Problematik der Feuchteanfälligkeit von Holz kann mithilfe hygrothermisch optimierter Konstruktionen entgegengewirkt werden. Die Holzelemente in den untersuchten Konstruktionen weisen in allen Szenarien zu keinem Zeitpunkt innerhalb des simulierten Zeitraums Feuchtegehalte oberhalb der geforderten Grenzwerte zur Gewährleistung der Tragfähigkeit auf [24]. Ebenso kann das Holzfäulerisiko als ausgeschlossen bewertet werden [25]. Unterschiede zwischen der konventionellen Bauweise und der Holzfertigteilbauweise sind hierbei sehr gering und daher von untergeordneter Bedeutung. Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich,

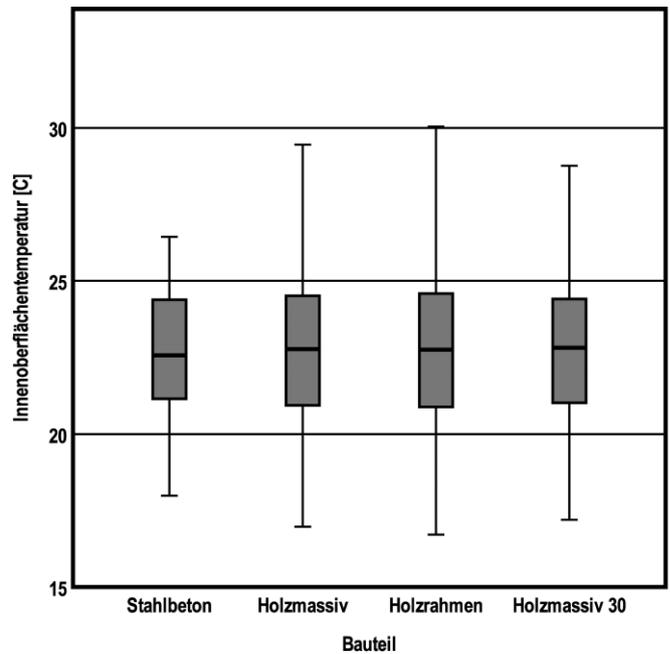


Bild 6 Box-Plots der jeweiligen Innenoberflächentemperaturen bei niedriger Anfangsfeuchte im Sommer
Box plots of respective indoor surface temperatures at low initial humidity in summer

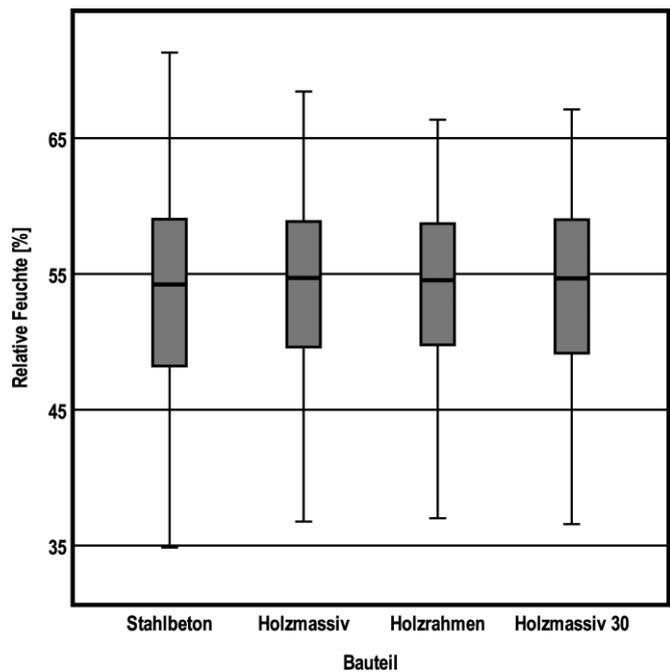


Bild 7 Box-Plots der jeweiligen relativen Luftfeuchten an der inneren Bauteiloberfläche bei niedriger Anfangsfeuchte im Sommer
Box plots of the respective relative humidities at the inner component surface at low initial humidity in summer

dass die untersuchten Außenwandkonstruktionen die Anforderungen in Bezug auf das hygrothermische Verhalten einhalten.

Da die Holzkonstruktionen gemäß Abschnitt 3.2 in der Kühlperiode (Juli bis August) einen Nachteil gegenüber der Stahlbetonkonstruktion aufweisen können, werden im Folgenden die an der Innenoberfläche resultierenden Temperaturen und relativen Feuchten analysiert und ver-

glichen. Bild 6 zeigt die Box-Plots der Innenoberflächentemperaturen an den untersuchten Konstruktionen im Zeitraum vom 01.06. bis 31.08. Obwohl der Median bei allen Konstruktionen annähernd identisch ist, zeigt sich beim Stahlbetonfertigteile aufgrund der großen Wärmespeichermasse eine deutlich geringere Spannweite als bei den Holzkonstruktionen. Die Holzmassivbaukonstruktionen weisen gegenüber der Holzrahmenbauweise eine etwas kleinere Amplitude auf.

Hinsichtlich der relativen Luftfeuchte, siehe Bild 7, welche sich an der Innenoberfläche der Bauteile einstellt, zeigt sich ein anderes Bild. Hier weist die Stahlbetonkonstruktion die größte und die Holzrahmenkonstruktion die kleinste Spannweite auf. Den Holzkonstruktionen kann somit eine etwas höhere Feuchteausgleichsfähigkeit zugeschrieben werden.

3.4 Akustische Untersuchung

Die Akustik ist im Holzbau ein sehr relevanter Aspekt und der Schutz vor Lärm spielt dabei eine wichtige Rolle. Insbesondere die Vermeidung tieffrequenter Schallübertragung bei Verkehrslärm gilt je nach Standort als Herausforderung für Fassadenelemente aus Holz. Außerdem weist die Übertragung von Trittschall ein besonders hohes Störpotenzial auf, was den Nutzerkomfort beeinträchtigen kann. Die Schalldämmung von Wänden und Decken ist dabei von bestimmten Nutzungs-, Einfluss- und Umgebungsparametern abhängig. Die Ansprüche an Bürogebäude sind zwar teilweise geringer als für Wohngebäude [26], erfordern aber dennoch besondere Aufmerksamkeit. Ein weiterer Unterschied zwischen Büro- und Wohngebäuden resultiert aus den Anforderungen an die Raumakustik. Die für Bürogebäude meist genutzten Bauteile sollten daher als Gesamtkonstruktion auf alle akustisch bedeutsamen Einflussgrößen hin optimiert werden [27, 11].

Die Kennwerte der flächenbezogenen Masse, des bewerteten Schalldämm-Maßes und des Trittschallpegels in Bild 8, Bild 9 sowie Bild 10 für die Holzmassiv- und für die Holzrahmenkonstruktion basieren auf Angaben aus [12]. Die Werte für die Stahlbetonfertigteilekonstruktion wurden gemäß [26] berechnet, ebenso wie für die Holzmassivbaukonstruktionen mit der 30 cm starken Brettsperrholzplatte. Bild 8 zeigt die flächenbezogenen Massen, wobei die Stahlbetonkonstruktionen erwartungsgemäß den höchsten Wert aufweisen. Deutlich wird der Zusammenhang der flächenbezogenen Masse mit dem akustischen Dämmverhalten anhand der bewerteten Schalldämm-Maße in Bild 9. Hier weisen die massiven Ausführungen der Außenwände sowohl aus Stahlbeton als auch aus 30 cm starkem Brettsperrholz einen höheren Schallschutz gegenüber den anderen Holzkonstruktionen auf. Die geringen Unterschiede der bewerteten Schalldämm-Maße sollten jedoch detaillierter im Bereich der tieffrequenten Schallübertragung betrachtet werden. Der Einfluss der Elementdicke der Brettsperrholzplatte wird

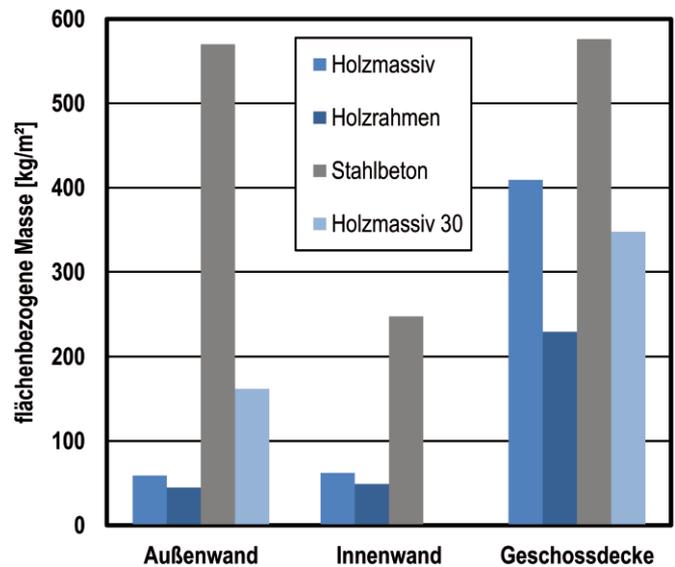


Bild 8 Flächenbezogene Masse der untersuchten Konstruktionen
Area-related mass of the examined constructions

deutlich, wenn die Schüttung auf eine Schichtdicke von 5 cm reduziert wird. Dann liegt diese Variante um 2 dB unterhalb des Schalldämm-Maßes der Stahlbeton- und Holzrahmenkonstruktion.

Die Anforderungen an Außenwände richten sich nach der äußeren Lärmsituation und variieren je nach Standort. Die Grenzwerte für Außenbauteile sind daher bauordnungsrechtlich nicht einheitlich festgelegt, sondern werden in Abhängigkeit des Außenlärmpegels situationsbedingt ermittelt [26]. Im Innenbereich von Bürogebäuden gelten im Vergleich zu Wohnungstrennwänden geringere Schallschutzanforderungen [26], die auch von Holzkonstruktionen erreicht werden können.

Wie unter Abschnitt 3.1 erwähnt, können durch Variationen der Materialien und Schichtdicken sowie durch konstruktive Maßnahmen, wie das Anbringen zusätzlicher Schichten, einzelne bauphysikalische Kenngrößen optimiert werden [28]. Im akustischen Kontext kann das bewertete Schalldämm-Maß der massiven Holzinnenwand beispielsweise durch eine beidseitige Doppelbeplankung aus Gipskartonplatten um bis zu 6 dB verbessert werden [12]. Bei der Holzrahmeninnenwand ist durch Anbringen einer zusätzlichen Dämmschicht inklusive Beplankung als freistehende Vorsatzschale oder durch die Vergrößerung der Schichtdicken eine Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes um bis zu 13 dB möglich [12].

Anhand der Einzahlwerte des bewerteten Schalldämm-Maßes in Bild 9 wird jedoch der frequenzabhängige Unterschied zwischen den verschiedenen Bauweisen nicht direkt ersichtlich. Gerade im Frequenzbereich unter 250 Hz weisen massive Betonkonstruktionen typischerweise eine höhere Schalldämmung auf als Holzkonstruktionen [29]. Die Problematik der tieffrequenten Schallübertragung zeigt sich ansatzweise beim Trittschall. Der bewertete Trittschallpegel der betrachteten Deckenkonst-

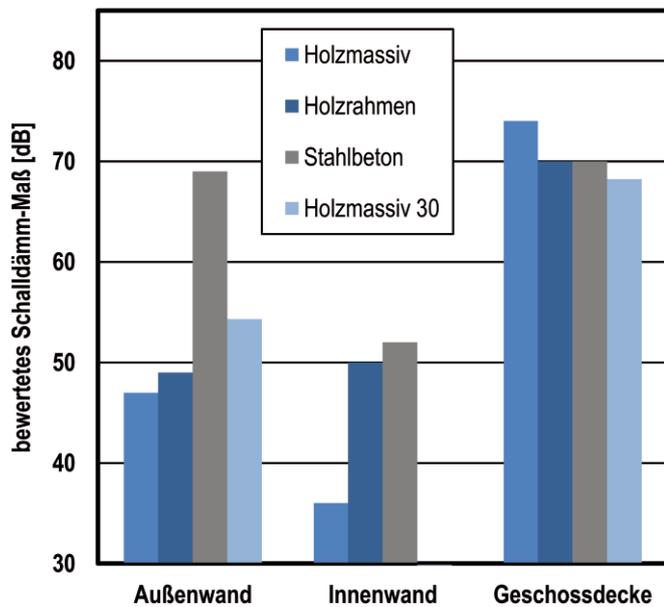


Bild 9 Bewertetes Schalldämm-Maß der untersuchten Konstruktionen
Evaluated sound reduction index of the investigated constructions

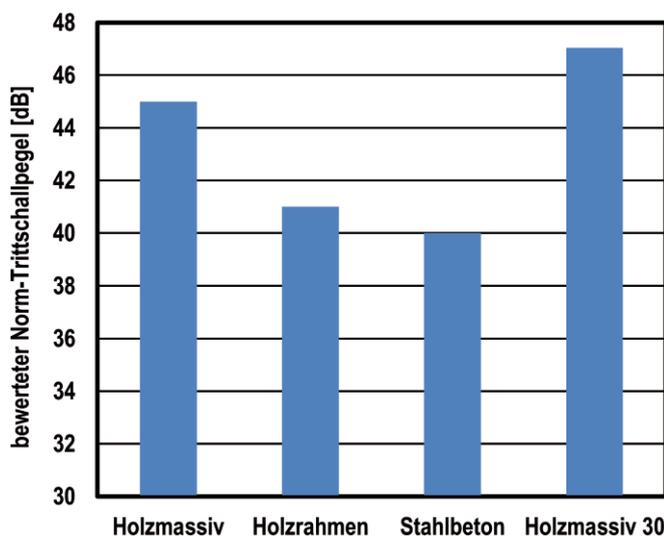


Bild 10 Bewerteter Norm-Trittschallpegel der untersuchten Deckenkonstruktionen
Weighted standard impact sound level of the examined ceiling constructions

raktionen nach [12] und [26] ist in Bild 10 dargestellt. Auch hier ist die größere flächenbezogene Masse der Stahlbetonkonstruktion akustisch von Vorteil. Dabei sei auf die unvermeidlichen Deckenauflagen verwiesen, ohne die keine der Anforderungen eingehalten werden können. Grundsätzlich bestehen Verbesserungsbedarf und -potenzial im tieffrequenten Bereich zwischen 50 und 100 Hz [29].

Dabei können Holzmassivkonstruktionen Vorteile gegenüber Holzrahmenkonstruktionen aufweisen, einerseits wegen der höheren flächenbezogenen Masse (siehe Holzmassivgeschossdecke, Bild 8) und andererseits wegen des homogenen Schichtaufbaus mit weniger Schall- und Wärmebrücken. Im Rahmen des Teilprojektes RP3 des Exzellenzclusters IntCDC [30] werden daher Holzmassiv-

geschossdecken hinsichtlich ihres akustischen Verhaltens untersucht und optimiert, um insbesondere auch die Anschlussproblematik zu verändern und die damit einhergehende Flankenübertragung zu reduzieren.

3.5 Umweltwirkungen

Die Erweiterung der bauphysikalischen Bewertung um ökologische Merkmale ist eine zentrale Aufgabe einer künftig nachhaltigen Planung und Gestaltung von Gebäuden. Mit der Methodik der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA, nach [31, 32]) können in detaillierter und transparenter Weise lebenszyklusbasierte Informationen generiert und potenzielle Umweltwirkungen quantifiziert werden. Die Ganzheitliche Bilanzierung kann zur Entwicklung und Verbesserung von Produkten, für strategische Planungsprozesse, zur politischen Entscheidungsfindung und zum Marketing angewendet werden. Im Bausektor gelten zusätzlich zu den ISO Standards weitere Normen, die bestimmte Umweltproduktdeklarationen [33], Berechnungsmethoden [34] und Nachhaltigkeitsbewertungen von Gebäuden [35] regeln. Eine Ökobilanz ist in vier Schritte gegliedert. Im ersten Schritt werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen auf Basis relevanter Stoff- und Energieflüsse sowie der funktionellen Einheit festgelegt. Das abgebildete System und seine entsprechenden Informationen werden im zweiten Schritt in der Sachbilanz zusammengefasst, um dann im dritten Schritt die betrachteten (potenziellen) Umweltwirkungen abzuschätzen. Diese sind definierten Wirkungskategorien zugeordnet und je nach Ausprägung mittels Umweltindikatoren zusammengefasst. Im vierten Schritt erfolgt eine Auswertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des gesetzten Zieles sowie des Untersuchungsrahmens [31, 32].

Die LCA-Analyse im Rahmen dieser Arbeit basiert auf der Modell- und Konstruktionsgrundlage aus den Abschnitten 3.1 und 3.2 zur Modellierung der vier Phasen Herstellung (Module A1–A3, nach [34]), Lebensende (Module C3–C4), Gutschriften (Modul D) und Gebäudebetrieb aus den Ergebnissen (Modul B6) nach Bild 11. Die funktionelle Einheit der Gebäudeökobilanz bezieht sich auf 1 m² Nettoraumfläche pro Jahr. Die hier zugrunde gelegte Nettoraumfläche beträgt 27 m² mit einer Lebensdauer von 25 Jahren.

Die Umweltwirkungen werden hier anhand des Treibhauspotenzials (GWP, engl.: Global Warming Potential, Umweltindikator kg CO₂ Äq.) und des Gesamteinsatzes primärer Energie sowohl aus erneuerbaren (PERT, Indikator MJ) als auch aus nicht erneuerbaren Ressourcen (PENRT, Indikator MJ) untersucht. Die bilanzierten Umweltwirkungen lehnen sich den Konstruktionsdetails in [12, 13] an und basieren auf der Datenbank ÖKOBAUDAT [36]. Für holzbasierte Produkte werden gemäß den generischen Datenbanken die thermische Verwertung und die Zerkleinerung der stofflichen Wiederverwertung als Lebensende-Szenarien präsentiert.

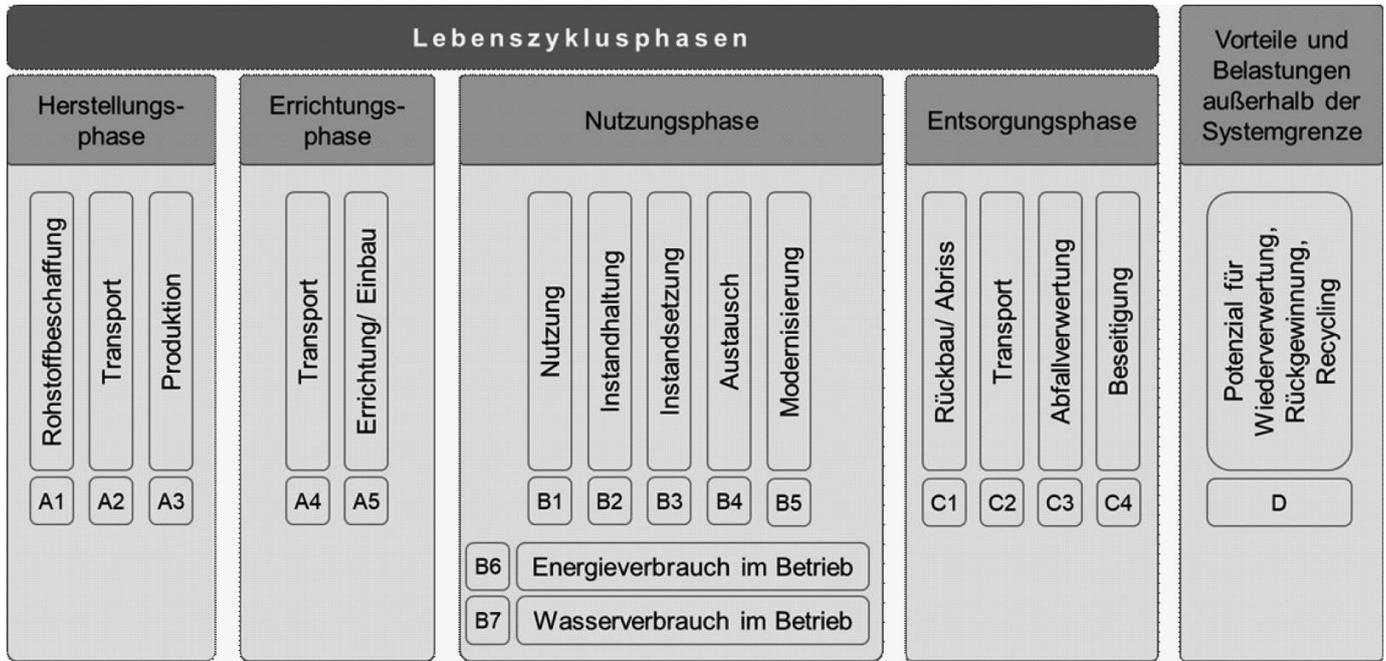


Bild 11 Schematische Darstellung der Lebenszyklusmodule eines Gebäudes [34]
Schematic representation of the life cycle modules of a building [34]

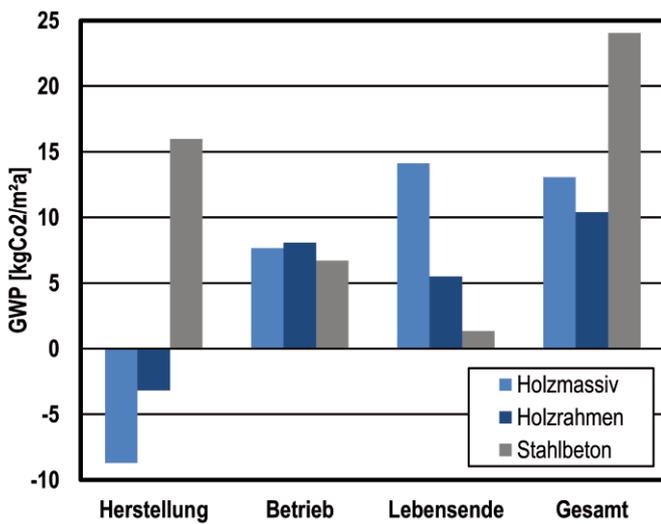


Bild 12 Treibhauspotenziale der untersuchten Bauweisen
Global Warming Potentials of the investigated construction methods

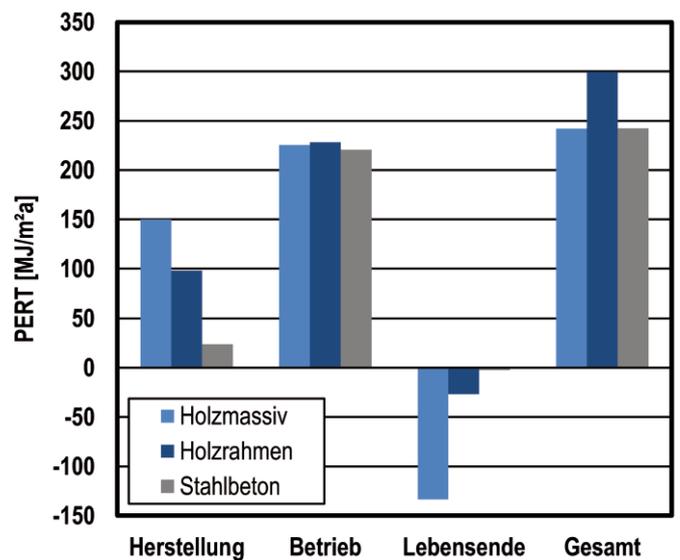


Bild 13 Umweltprofile der balanzierten Bauweisen hinsichtlich des erneuerbaren Primärenergiebedarfs
Environmental profiles of the balanced construction methods with regard to renewable Primary Energy Demand

Gemäß [36] wurde die thermische Verwertung als Standardszenario gewählt.

Im Vergleich zu Betonfertigteilen sind die Holzkonstruktionen hinsichtlich des Treibhauspotenzials insgesamt vorteilhafter (Bild 12). Hier besitzt die Betonfertigteilbauweise doppelt so hohe CO₂-Emissionen wie die Holzrahmenbauweise. Ausschlaggebend ist dabei der Einfluss des aufwändigen Herstellungsprozesses von Beton. Die Holzrahmenbauweise weist gegenüber Holzmassivbauweisen eine Einsparung an Holzrohstoffen auf, was sowohl ein niedrigeres CO₂-Speicherpotenzial als auch eine geringere CO₂-Freisetzung am Lebensende zur Folge hat.

Hinsichtlich des notwendigen Energieeinsatzes scheinen Holzrahmensysteme insgesamt vorteilhafter zu sein. Bei

Betrachtung des Einsatzes von erneuerbarer Energie (PERT) gemäß Bild 13, weist die Holzmassivbauweise insgesamt ähnliche Umweltprofile auf wie die Stahlbetonfertigteilbauweise, die Holzrahmenkonstruktionen hingegen einen deutlich höheren Wert. Allerdings werden in der Lebensende-Phase die Potenziale der Wiederverwendung von Holzrohstoffen hervorgehoben, indem diese durch Gutschriften (Modul D) an erneuerbarem Primärenergiebedarf (PERT) aufgezeigt werden. Beim nicht-erneuerbaren Energieeinsatz (PENRT), siehe Bild 14, zeigt die Stahlbetonfertigteilbauweise ein schlechteres Umweltprofil, was ebenfalls dem Herstellungsprozess geschuldet ist. In der Bilanzierung ist dieser von großer Relevanz, was hiermit hervorgehoben wird.

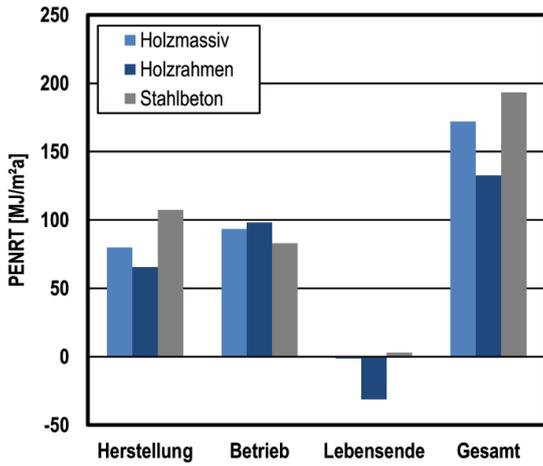


Bild 14 Umweltprofile der balanzierten Bauweisen hinsichtlich des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs
Environmental profiles of the balanced construction methods with regard to non-renewable Primary Energy Demand

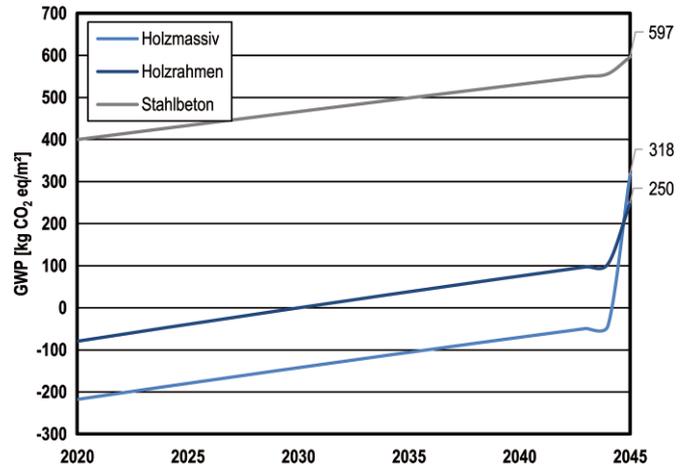


Bild 15 Treibhauspotenziale der balanzierten Bauweisen in Abhängigkeit der Betrachtungszeit
Global Warming Potentials of the balanced construction methods over the considered lifespan

Während Holzbauweisen vorteilhaftere Umweltprofile in Bezug auf die Herstellungsphase zeigen, weist die Stahlbetonfertigteilbauweise Vorteile hinsichtlich des gesamten Energieeinsatzes während des Betriebes auf. Dieser Aspekt ist mit dem höheren Kühlungsbedarf bei Holzbauweisen verbunden. In Bild 15 sind die gesamten Umweltwirkungen hinsichtlich des Treibhauspotenzials (GWP) in Abhängigkeit der Gebäudelebensdauer dargestellt. Dies unterstreicht die zunehmende Relevanz sowie die Problematik der grauen Energie und des gebundenen Kohlenstoffdioxids im Bausektor. Die verschiedenen Bauweisen zeigen während des Betriebs lineare Verläufe, welche vom zugrunde gelegten Strom-Mix-Szenario [36] abhängig sind. Dem erhöhten Kühlbedarf bei den Holzbauweisen stehen negative CO₂-Emissionen aus der Herstellungsphase gegenüber. Durch das hohe CO₂-Speicherpotenzial von Holzmassivbauweisen können diese eine höhere Umweltqualität aufweisen, wenn künftig alternative Lösungen gefunden werden, die eine Wiederverwertung des Baumaterials ermöglichen und eine CO₂-Freisetzung beim Lebensende vermeiden.

Aktuell widmen sich Studien der Berücksichtigung der ökologischen Vorteile durch die technischen Fortschritte in der Vorfertigung von Holzbauweisen [37, 38]. Im Zusammenhang mit dem Holzmassivbau eröffnen sich die Potenziale in der Wiederverwendbarkeit von erheblichen Anteilen verbauter Konstruktionen. Dies wird sich in der Bewertung der Lebensende-Phase von Gebäuden bemerkbar machen und kann zu einer noch besseren Bilanz von CO₂-Fußabdruck und Ressourceneinsparung führen.

4 Zusammenfassung

Aus der bauphysikalischen und ökologischen Betrachtung der untersuchten Konstruktionen in diesem Aufsatz ergeben sich sowohl Planungshinweise als auch Potenziale für die unterschiedlichen Bauweisen in Gebäuden. Der sommerliche und winterliche Wärmeschutz kann mit

beiden Bauweisen realisiert werden. Bei Gebäuden in Holzbauweise ist im Vergleich zur Betonbauweise ein höherer Kühlenergiebedarf zu erwarten. Allerdings ergeben sich mit der Holzbauweise Einsparungen hinsichtlich des jährlichen Heizenergiebedarfs. Dabei hängt die Effizienz von Heiz-Kühlsystemen von der angemessenen Auslegung unter Berücksichtigung der Nutzung ab. Die hygrothermische Bauteilsimulation hat gezeigt, dass bei Holzkonstruktionen mit konstruktiven Maßnahmen der Feuchteanfälligkeit des Materials entgegengewirkt werden kann. Durch das Einhalten der hygrothermischen Anforderungen kann die Holzbauweise daher im Allgemeinen als unproblematisch bewertet werden. Zudem zeigt Holz gegenüber Beton eine höhere Feuchteausgleichsfähigkeit, was sich positiv auf das Innenraumklima auswirkt.

Für hohe schallschutztechnische Anforderungen ist die Stahlbetonbauweise aufgrund ihrer großen Masse gut geeignet. Je nach Art und Nutzung des Gebäudes variieren jedoch die Anforderungen an den Schallschutz, weshalb auch leichtere Holzkonstruktionen Anwendungspotenziale bieten und mittels konstruktiver Maßnahmen ebenfalls gute schalltechnische Eigenschaften ermöglichen.

Die ökologische Betrachtung der verschiedenen Konstruktionen unterstreicht die anfangs erwähnte Problematik des hohen Ressourcen- und Energieverbrauchs im Bausektor. Eine Quantifizierung der ökologischen Vorteile im Rahmen einer LCA-Analyse von vorgefertigten Holzbauteilen war auch Gegenstand der Untersuchung in anderen Studien. In [37] werden die Vorteile vorgefertigter Systeme identifiziert, die sich durch Wiederverwendung eines erheblichen Anteils der Gebäudestruktur am Ende der Lebensdauer ergeben können. Nach [38] lassen sich durch Vorfertigung CO₂-Emissionen um bis zu 15% im Vergleich zu konventionellen in-situ Bauweisen reduzieren. Die valide Bewertungsmethodik bietet demnach auch hier die Möglichkeit der differenzierten Planung.

5 Ausblick

Damit Holzbaukonstruktionen auch in Bürogebäuden mehr Anwendung finden können, müssen sie unter anderem den bauphysikalischen Anforderungen entsprechen. Einige mitunter diskutierte Risiken wurden im Rahmen dieser Arbeit betrachtet und gänzlich ausgeschlossen. Im Allgemeinen kann die Holzbauweise in Bezug auf die hygrothermischen Anforderungen als unproblematisch bewertet werden. Auch hinsichtlich der energetischen und akustischen Eigenschaften ist ein konkreter, differenzierter Vergleich sinnvoll.

Die Potenziale von Massivholzkonstruktionen, bedingt durch seine kompakte Beschaffenheit hinsichtlich seines Feuchte- und Wärmeverhaltens, sind bereits Bestandteil Untersuchungen im Rahmen von [39]. Dazu zählt auch der Verzicht auf Rahmenkonstruktionen und Verbindungen. Ebenso aktuell sind Fragestellungen, die sich alternativen Materialien für Dämmungen widmen, wie beispielsweise Konstruktionen mit naturbasierten Dämmstoffen. Weitere Ansätze zielen auf schlitzartige Fräsungen in Massivholzkonstruktionen. Durch die Lufteinschlüsse in der massiven Schicht wird deren Wärmeleitfähigkeit reduziert, weshalb auf eine zusätzliche Dämmschicht verzichtet werden kann. Damit sind vergleichbare U-Werte zu konventionellen Konstruktionen möglich [39]. In diesem Sinne gilt es, die Anwendbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen weiter zu entwickeln oder eine Veränderung der Materialeigenschaften durch innovative Bearbeitungsmethoden herbeizuführen, um letztlich die Entwicklung nachhaltiger Konstruktionen weiter voran zu bringen. Hier muss aber immer der konkret belegbare

Nachweis im Vordergrund stehen. Die Zielvorgabe lautet also, unter Verwendung erneuerbarer Ressourcen bestmögliche Eigenschaften in bauphysikalischer Sicht zu erreichen.

Die Leistungsfähigkeit und die Wirksamkeit von digitalen Instrumenten hinsichtlich der Optimierung des integralen Planungsprozesses und der damit frühzeitigen Ermittlung von CO₂-Emissionen zeigt sich auch im Rahmen von ökologischen Betrachtungen. Diese Instrumente, zusammen mit weiteren Innovationen, wie beispielsweise der robotergestützten Fertigung, eröffnen neue interessante Ansätze für den Holzbau. Die Potenziale liegen dabei in der Kombination mit dem computergestützten Entwurf, wodurch innovative und vielversprechende Lösungen für verschiedene Gebäudetypologien und ressourcenschonende bzw. -effizientere Konstruktionen realisiert werden können [40, 41]. Dazu zeigt dieser Aufsatz, dass mittels der vorhandenen Daten und verwendeten Methoden die bauphysikalischen und ökologischen Kriterien bereits bei frühen Planungs- und Entwurfsentscheidungen sowie bei der Weiterentwicklung von Konstruktionen berücksichtigt werden können.

6 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Exzellenzclusters EXC2120 „Integrative Computational Design and Construction for Architecture“ (IntCDC), gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG, in den Teilprojekten RP3 und RP18 durchgeführt.

Literatur

- [1] Harder, N. et al. (2018) *Bauphysikalische und ökologische Potenziale von adaptiven Leichtbaukonstruktionen* in: *Bauphysik* 40, 5, S. 307–318.
- [2] Holzabsatzfonds (2020) *Holz als konstruktiver Baustoff: Holzabsatzfonds* [online]. https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2_Holzbau_Handbuch/R04_T01_F01_Holz_als_konstruktiver_Baustoff.pdf [Zugriff am: 07.Okt. 2020]
- [3] Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S. (2017) *Atlas mehrgeschossiger Holzbau – Detail Atlas*. 1. Auflage. München: Detail Business Information GmbH.
- [4] Schmid, F. et al. (2014) *Schallschutz und akustische Wirkweise bei mehrlagigen textilen Fassadensystemen* in: *Bauphysik* 36, 1, S. 1–10.
- [5] Rice, J. et al. (2006) *Appearance wood products and psychological well-being* in: *Wood Fiber Sci* 38 (2006), p. 644–659.
- [6] Schnabel, T. (2009) *Holzoberflächen – Klassifizierung, Modellbildung und Umweltsimulation von optischen Eigenschaften* [Dissertation]. Technische Universität München.
- [7] Green, M.; Taggart, J. (2020) *Tall Wood Buildings – Design, Construction and Performance*. 2. Aufl. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- [8] Huss, W.; Kaufmann, M.; Merz, K. (2018) *Holzbau – Raummodule*. 1. Aufl. München: Detail Business Information GmbH.
- [9] Bechthold, M. (2010) *The Return of the Future – A Second Go at Robotic Construction* in: *Archit Design*, 80, S. 116–121.
- [10] Krieg, O.; Schwinn, T.; Menges, A. (2015) *Neue Holztechnologien: Robotisch gefertigter Leichtbau* in: *holztechnologie* 56, S. 20–26.
- [11] Leistner, P.; Schröder, H.; Richter, B. (2003) *Gehgeräusche bei Massiv- und Holzbalkendecken* in: *Bauphysik* 25, 4, S. 187–196.
- [12] Holzforschung Austria (2020) *Bauteildatenblätter geprüfter Konstruktionen*. <https://dataholz.eu> [Zugriff am: 01.Feb. 2021]
- [13] InformationsZentrum Beton GmbH Wände aus Beton: *InformationsZentrum Beton GmbH*. <https://www.beton.org/wissen/wohnungsbau/wand/> [Zugriff am: 25.Jan. 2021]
- [14] Fraunhofer Institut für Bauphysik (2018) *WuFi Plus (Version 3.1.1) – Software zur Berechnung des Raumklimas*. [Software].
- [15] Boer, J. d. (2006) *Lichttechnisches und energetisches Verhalten von Fassaden moderner Verwaltungsbauten – Teil 1: Lichttechnisches Verhalten* in: *Bauphysik* 28, 1, S. 27–44.
- [16] Boer, J. d. (2006) *Lichttechnisches und energetisches Verhalten von Fassaden moderner Verwaltungsbauten – Teil 2: Energetisches Verhalten* in: *Bauphysik* 28, 2, S. 103–110.

- [17] DIN V 18599-10:2018-09 (2018) *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Beuth, Berlin.
- [18] Ax, L.; Dietrich, U. (2010) *Auswirkungen der Bewertung des thermischen Komforts im Sommer nach EN 15251 auf die bekannten Regeln zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes* in: BauSIM 2010. Building performance simulation in a changing environment. Proceedings of the third German-Austrian IBPSA Conference.
- [19] Tang, Q. (2012) *Gebäudestandards und Nutzungsprofile für thermische Gebäudesimulationen – Entwicklung einer Datenbank*. Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik. Internes Dokument.
- [20] Fraunhofer Institut für Bauphysik (2018) *WuFi Pro (Version 6.1) – Software zur Berechnung von Wärme und Feuchte instationär* [Software].
- [21] WTA Merkblatt 6-5-14/D (2014) *WTA Merkblatt 6-5 (04.2014/D): Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren*. Beuth, Berlin.
- [22] DIN EN ISO 13788:2013-05 (2013) *Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13788:2012 (Mai 2013)*. Beuth, Berlin.
- [23] Fraunhofer Institut für Bauphysik (2017) *WuFi Bio (Version 4.0) – Software zur Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos* [Software].
- [24] DIN 68800-2:2012-02 (2012) *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Beuth, Berlin.
- [25] WTA Merkblatt 6-8:2016-08 (2016) *Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation*. Beuth, Berlin.
- [26] DIN 4109-1:2018-01 (2018) *Schallschutz im Hochbau – Mindestanforderungen*. Beuth, Berlin.
- [27] Blödt, A.; Rabold, A. (2019) *Schallschutz im Holzbau – Grundlagen und Vorbemessung*. holzbau handbuch: Holzbau Deutschland-Institut e.V. https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2_Holzbau_Handbuch/R03_T03_F01_Schallschutz_Grundlagen_Vorbemessung_2019.pdf [Zugriff am: 25.Jan. 2021]
- [28] Rabold, A.; Châteauvieux-Hellwig, C.; Mecking, S. *Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109*. https://www.forum-holzbau.com/pdf/15_EBH2017_Rabold.pdf [Zugriff am: 20.März 2020]
- [29] Späh, M.; Liebl, A.; Leistner, P. (2014) *Acoustics in wooden buildings – Measurements in the Laboratory and in Single Family Houses*. Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik. Internes Dokument.
- [30] Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture Multi-Storey Wood Building System – Research Project 3 (RP3): *Computational Design, Engineering and Development of digitally fabricated multi-storey wood building system*. <https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/research/research-projects/rp-3/> [Zugriff am: 04.Feb. 2021].
- [31] DIN EN ISO 14040:2009-11 (2009) *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006*. Beuth, Berlin.
- [32] DIN EN ISO 14044:2021-02 (2021) *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006+Amd 1:2017+Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006+A1:2018+A2:2020*. Beuth, Berlin.
- [33] DIN EN 15804:2020-03 (2020) *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019*. Beuth, Berlin.
- [34] DIN EN 15978:2012-10 (2012) *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011*. Beuth, Berlin.
- [35] DIN EN 15643-5:2018-05 (2018) *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken – Teil 5: Leitfaden zu den Grundsätzen für und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke; Deutsche Fassung EN 15643-5:2017*. Beuth, Berlin.
- [36] Deutsches Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2021) *Baustoffdatenbank ÖKOBAUDAT (Version 2021-I)* [Datenbank]. <https://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html>.
- [37] Aye, L. et al. (2012) *Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules* in: Energy and Buildings 47, S. 159–168.
- [38] Hao, J. L. et al. (2020) *Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: A BIM-based life-cycle assessment approach* in: The Science of the total environment 723, S. 137870.
- [39] Joscak, M.; Sonderegger, W.; Niemz, P. (2011) *Vergleichende Untersuchungen zum Feuchte- und Wärmeverhalten in unterschiedlichen Holzwandelementen*. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- [40] Agustí-Juan, I.; Habert, G. (2016) *An Environmental Perspective on Digital Fabrication in Architecture and Construction – The 21st International Conference on Computer-aided Architectural Design Research in Asia* in: Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, S. 797–806.
- [41] Wagner, H. J. et al. (2020) *Towards Digital Automation Flexibility in Large-Scale Timber Construction: Integrative Robotic Prefabrication and Co-Design of the BUGA Wood Pavilion* in: Construction Robotics.

Autoren

Theresa Müller, M.Sc. (Korrespondenzautorin)
theresa.mueller@iabp.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik (IABP)
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Daniela Flemming, M.Sc.
daniela.flemming@iabp.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik (IABP)
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Isabel Janowsky, M.Sc.
isabel.janowsky@iabp.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik (IABP)
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Roberta Di Bari, M.Sc.
roberta.di-bari@iabp.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik (IABP)
Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi)
Wankelstr. 5
70563 Stuttgart

Dipl.-Ing. Nadine Harder
nadine.harder@iabp.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik (IABP)
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner
philip.leistner@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP)
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Zitieren Sie diesen Beitrag

Müller, T.; Flemming, D.; Janowsky, I.; Di Bari, R.; Harder, N.; Leistner, P. (2021) *Bauphysikalische und ökologische Potentiale von Gebäuden in Holzbauweise*. Bauphysik 43, H. 3, S. 174–185.
<https://doi.org/10.1002/bapi.202100011>