

Achim Menges, Oliver Bucklin
Oliver David Krieg, Hans Drexler

**Baukonstruktionen aus Massiv-Holz,
welche durch Form und Fügung
konstruktive und bauphysikalische
Anforderungen des energie-
effizienten und nachhaltigen
Bauens erfüllen**

F 3122

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0325-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

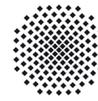
Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Universität Stuttgart



Institute for Computational
Design and Construction

JADE HOCHSCHULE

Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

IBA Thüringen

Baukonstruktionen aus Massiv-Holz, welche durch Form und Fügung konstruktive und bauphysikalische Anforderungen des energie-effizienten und nachhaltigen Bauens erfüllen

Wissenschaftlicher Abschlussbericht

Forschungsprojekt "SWD-10.08.18.7-15.59
gefördert im Rahmen der Forschungsinitiative "Zukunft Bau"

durch das
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmanns Aue 31 - 37
53179 Bonn

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU



Universität Stuttgart



Institute for Computational
Design and Construction

JADE HOCHSCHULE
Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

IBA Thüringen



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU

Baukonstruktionen aus Massiv-Holz, welche durch Form und Fügung konstruktive und bauphysikalische Anforderungen des energie-effizienten und nachhaltigen Bauens erfüllen

Wissenschaftlicher Abschlussberichts

Projektteam:

Institut für Computerbasiertes Entwerfen (ICD) - Projektleitung
Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart
Prof. Achim Menges, Oliver Bucklin, Oliver David Krieg

Jade Hochschule Oldenburg
Fachbereich Architektur
Ofener Straße 16/19, D-26121 Oldenburg
Prof. Hans Drexler

In Kooperation mit

IBA - Internationale Bauausstellung Thüringen
Gutenbergstrasse 29a, D-99423 Weimar
Dr. Marta Doehler-Behzadi, Geschäftsführung
Tobias Haag

Laufzeit:	18 Monate
Gesamtkosten:	186.428,98 €
Anteil Bundeszuschuss:	103.970,24 €



Universität Stuttgart



Institute for Computational
Design and Construction

JADE HOCHSCHULE

Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

IBA Thüringen

Kontakt:

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
70174 Stuttgart

+49 (0)711 68581920
www.icd.uni-stuttgart.de
mail@icd.uni-stuttgart.de

Inhalt

1.	Projektziel und Vorgehen	6
2.	Forschungsvorhaben	10
	AP 1: Entwicklung des Bausystems	10
	AP 2: Entwurf und Planung des Prototypgebäudes	30
	AP 3: Ausführung und Bau des Prototypgebäudes	42
3.	Fazit	46
4.	Weiteres Vorgehen	46
5.	Publikationen	47

1. Projektziel und Vorgehen

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojektes ist es, Baukonstruktionen aus Massiv-Holz zu entwickeln, bei denen die Holzelemente durch moderne Fertigungsmethoden so ausgeformt werden, dass sie durch Form und Fügung konstruktive und bauphysikalische Anforderungen des energieeffizienten und nachhaltigen Bauens erfüllen. Am Beispiel eines variablen Prototypengebäudes, das in Partnerschaft zwischen der Universität Stuttgart, der Jade Hochschule und Projektpartnern aus der Wirtschaft entwickelt und gebaut wird, soll das Bausystem erprobt werden. Ziel ist die Entwicklung einer Bauweise, die einen besonders hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen beinhaltet und durch lösbare Verbindungen sortenrein zu trennen und recyceln ist.

Ein Vorgängerprojekt (*Timber Prototype I MSA 2014*) wurde mit handwerklichen Methoden hergestellt und montiert. Die dort begonnene Forschungsarbeit soll in zweierlei Hinsicht weitergetrieben werden: (1) Entwicklung von digitalen Entwurfs- und Herstellungsmethoden, die eine effiziente und adaptive Herstellung der Bauelemente zulassen. (2) Erforschung und Optimierung der Eigenschaften der Baukonstruktionen, insbesondere Wärmedämmwirkung, Quellen und Schwinden.

Zur Erprobung der Methoden wird ein variables Prototypengebäude gebaut werden. Der Demonstrator wird konzipiert als Labor, Versuchsobjekt und Kommunikationsinstrument, mit dem neue Strategien und Technologien entwickelt, erprobt und erlebbar gemacht werden. Als gebautes Beispiel eines nachhaltigen, industriell hergestellten und recyclingfähigen Gebäudes soll der Prototyp zur Verbreitung ganzheitlicher Gebäudestrategien beitragen.

Beschreibung der zu lösenden Probleme

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit adressiert in seiner Zielsetzung zwei wesentliche Probleme des Bauens: Die Erhöhung des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen in modernen Bauweisen und die Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Baumaterial durch variable Gebäudekonfigurationen.

Das Ziel des Vorhabens soll erreicht werden, indem eine adaptive Holz-Massiv-Bauweise entwickelt wird, die weitgehend oder ausschließlich aus Konstruktionsvollholz besteht und zurück- und wieder aufgebaut werden kann. Dafür muss die Konstruktion mit lösbaren Verbindungen gefügt sein. Gleichzeitig soll das zu entwickelnde Bausystem alle Anforderungen an das zeitgenössische Bauen erfüllen, sodass es über eine hohe Wärmedämmwirkung und Lebenserwartung verfügen muss.

Nachwachsende Rohstoffe

Nachwachsende Rohstoffe haben derzeit einen geringen Marktanteil. Eine Erhöhung des Anteils ist in Hinblick auf die Umstellung auf eine nachhaltige Entwicklung sinnvoll, weil diese Ressourcen die Umwelt im Hinblick auf Emissions- und Abfallaufkommen weniger belasten als nichtnachwachsende Baustoffe. Es fehlen jedoch industrielle Fertigungsmethoden und Bauweisen, die die hohen Anforderungen an moderne Baukonstruktionen erfüllen.

Die Entwicklung neuer Holzbauweisen in den letzten Jahren hat sich vor allem auf die Hybridisierung von Holzprodukten mit anderen Baustoffen konzentriert, um die Tragfähigkeit (Holz-Stahl und Holz-Stahl-Beton) und den Brandschutz zu verbessern. Auch wenn durch diese Verbundbauweisen neue Bauaufgaben für den Holzbau erschlossen werden konnten, wie zum Beispiel der mehrgeschossige Wohnungsbau, so gehen durch die innige Verbindung sehr unterschiedlicher Baustoffe auch viele der Vorteile des Baustoffes Holz verloren. Die sortenreine Trennung, die eine wichtige Voraussetzung für ein stoffliches Recycling oder eine Kompostierung wäre, ist somit in der Praxis nicht mehr möglich. Die Reduktion der CO₂-Emissionen durch die Verwendung von Holz wird durch die hohen Emissionen der Sekundärstoffe größtenteils aufgehoben. Mit dem Forschungsprojekt soll untersucht werden, wie aus dem Baustoff Holz sortenreine Baukonstruktionen entwickelt werden können, die durch Form und Fügung der einzelnen Elemente die wichtigen Funktionen an moderne Baukonstruktionen, insbesondere Tragfähigkeit und Wärmeschutz, erfüllen.

Rückbaubare und rezyklierbare Bauweisen

Ein Großteil des Abfallaufkommen (ca. 53% in 2012) entstehen im Baubereich. Die derzeitige Entwicklung im Bauwesen lässt befürchten, dass sich die Abfallmengen in Zukunft sogar noch vergrößern werden. Zum einen verringert sich die Lebenserwartung der Gebäude stetig, zum anderen werden immer unterschiedlichere Materialien immer inniger konstruktiv gefügt. Diese sogenannten Kompositbaustoffe bestehen aus einer Vielzahl von Ausgangsstoffen, die mit nicht lösbaren Verbindungen zu riesigen Mengen zukünftigem Sondermüll verklebt werden. Durch diese Müllproduktion werden Gesellschaft und Umwelt ebenso belastet wie durch die gleichzeitig notwendige Produktion von neuem Baumaterial, was wiederum zu Energie- und Rohstoffverbrauch führt. Nachhaltige Gebäude müssen anders konstruiert werden: Die einzelnen Bauteile müssen mit lösbaren Verbindungen gefügt werden.

Konstruktive Schichten müssen so aufgebaut sein, dass sie sich einzeln warten und austauschen lassen, da ihre Beanspruchung und Lebensdauer unterschiedlich ist. Insbesondere die Haustechnik muss austauschbar und nachrüstbar sein, weil sich die Technik schnell verbessert und an veränderte Rahmenbedingungen (Verfügbarkeiten von Ressourcen, Klimawandel) angepasst werden muss.

Baukonstruktion und Materialstrategien

Die Baukonstruktion wird als Faktor für die Umweltverträglichkeit eines Gebäudes weitgehend unterschätzt. Der Energieverbrauch ergibt sich bei älteren Gebäuden überwiegend aus dem Betrieb und hat deshalb die öffentliche Debatte der letzten Jahre stark dominiert. Auch haben sich gesetzliche Vorgaben und planerische Verfahren darauf konzentriert. Baukonstruktion ist das Zukunftsthema des nachhaltigen Bauens. Schon heute ist in der Baukonstruktion der meisten Passivhäuser mehr Energie enthalten, als deren Betrieb über den Lebenszyklus verbraucht. Spätestens mit der Einführung der EU-Gebäuderichtlinie 2020 verschiebt sich das Optimierungspotenzial in den Bereich der Baukonstruktion, da die Gebäude im Betrieb keine Energie mehr verbrauchen (Abb. 1).

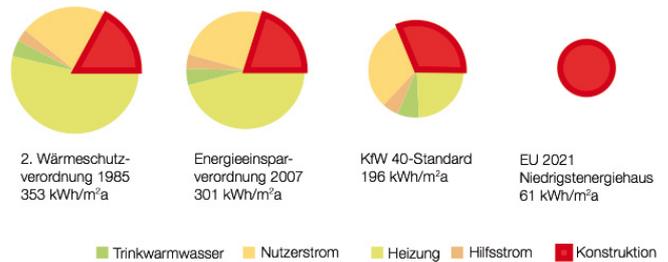


Abb. 1: Primärenergiebedarf von Wohngebäuden unterschiedlicher energetischer Standards (Betrachtungszeitraum 50 Jahre)

Betrachtet man neben dem Energieverbrauch auch noch andere Nachhaltigkeitsaspekte, wie Abfallproduktion oder Verknüpfungen in die lokale Wirtschaft, so wird deutlich, dass die Baukonstruktion das wichtigste Entwicklungsfeld für das nachhaltige Bauen der Zukunft ist. Für den Standort Deutschland wäre die Entwicklung von neuen Herstellungsverfahren und Bausystemen von hohem Interesse, weil diese in zwei wichtige Märkte und Kompetenzbereiche der deutschen Wirtschaften wirken: Zum einen ist Deutschland das führende Land für die Entwicklung und den Verkauf von Produktions- und Werkzeugmaschinen. Die Nutzung digitaler Fertigung liegt außerdem in der Expertise der Antragsteller. Zum anderen hat Deutschland im Bereich des energieeffizienten und nachhaltigen Bauens eine Vorreiterstellung. Durch die Entwicklung und den Vertrieb des Massivholzbausystems könnte ein neuer Bereich für dieses Marktsegment erschlossen werden.

Holz und nachwachsende Rohstoffe

Gerade Deutschland bietet ideale Voraussetzungen für die Weiterentwicklung des Holzbaus. So gibt es in Deutschland eine sehr produktive und seit Jahrhunderten nachhaltig arbeitende Forstwirtschaft. Außerdem gibt es eine lange HandwerksTradition und zahlreiche hochqualifizierte Holzbaubetriebe, die durch Forschung wie diese digitale Herstellungstechnologien mittelfristig integrieren können. Der große Erfolg vorgefertigter Holzkonstruktionen in Marktsegmenten, wie z.B. dem Einfamilienhausbau, zeigt schon, dass aus Holz moderne und wirtschaftliche Konstruktionen realisiert werden können. Holzkonstruktionen bieten dem Nutzer ein besonders angenehmes Innenraumklima und haben bei sichtbaren

Holzkonstruktionen einen hohen ästhetischen Reiz und Identifikationsgrad.

Ökologisch betrachtet ist Holz der Baustoff mit den niedrigsten Primärenergieinhalten und Schadstoffemissionen. Ökonomisch betrachtet trägt Holz zur lokalen Wertschöpfung und dem wirtschaftlichen Erfolg der heimischen Forstwirtschaft bei. Holz hat auch ein besonders günstiges Verhältnis von Eigengewicht zu Tragfähigkeit und Zugfestigkeit. Baukonstruktiv richtig eingesetzt, ist es ein sehr dauerhafter Baustoff. Mit dem Forschungsprojekt soll untersucht werden, wie aus dem Baustoff Holz Baukonstruktionen entwickelt werden können, die durch die Form und Fügung der einzelnen Elemente die wichtigen Funktionen an moderne Baukonstruktionen, insbesondere Tragfähigkeit und Wärmeschutz, erfüllen und dabei gleichzeitig zerstörungsfrei änderbar, rückbaubar und wiederverwendbar sind.

Neue Fertigungsmethoden

Die Herstellung der Holzprofile und Module hat sich als ein zentrales Thema der weiterführenden Forschung herausgestellt, das sich aber mit dem beschränkten Terminplan und Budget des ersten Projekts nicht lösen ließ. So wurden die Profile der Prototypen manuell auf einer Tischfräse hergestellt. Denkbar ist jedoch sowohl eine maschinelle Fertigung durch große Hobelmaschinen oder Sägewerke, sowie eine digitale Verarbeitung durch CNC-Fräsen, bei denen die Profile direkt aus den Baumstämmen gefräst werden. Die Möglichkeiten für eine solche Massenfertigung der Profile soll in dem kommenden Projekt erforscht werden.

In den letzten Jahren wurden neue Fertigungsmethoden entwickelt, die einen höheren Grad der Individualisierung und Spezifizierung von Bauteilen und Konstruktionen erlauben. Dafür stehen den Antragstellern modernste Fertigungslabore mit Industrierobotern zur Verfügung, die bereits für viele andere Forschungsprojekte eingesetzt wurden.

Integrale Dämmung

Bei zeitgenössischen Holzgebäuden wird die Leistungsfähigkeit des Materials nicht ausschöpft. Einen erheblichen Anteil am verbauten Volumen macht nicht das sogenannte Konstruktionsvollholz aus, sondern Brettschichtholz und Plattenware (insb. OSB), die nur zu einem geringeren Anteil aus Holz bestehen und deren Festigkeit aus dem hohen Volumenanteil von Bindemitteln entsteht.

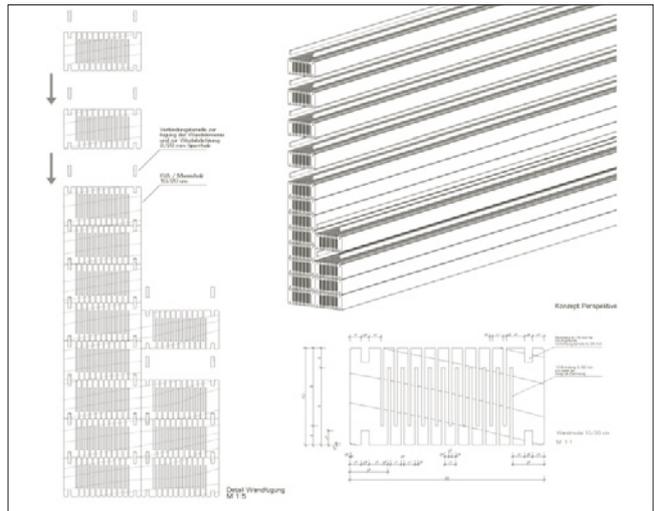


Abb. 2: Bausystem des Vorgängerprojekts

Massive Holzwände können tragen und gleichzeitig ohne zusätzliche Dämmstoffschichten, also auf einstoffliche Art, die Dämmwerte eines Niedrigenergiehauses (U -Wert max. $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) erreichen. Dies ist durch die leimfreie Verbindung von Vollholzelementen möglich. Um die Dämmleistung des Bauteiles zusätzlich zu optimieren ermöglicht die Bearbeitung durch neue Fertigungsmethoden die Herstellung besonderer Geometrien, so dass Hohlräume in den Bauteilen geschaffen werden und die eingeschlossene Luft als Dämmschicht wirkt. Bei dem an der MSA entwickelten Prototypen wurde die Dämmwirkung des Vollholz durch Luftkammern, die von beiden Seiten in die Profile eingefräst wurden, verbessert. Wände, Decken und Bodenmodule sind aus diesen Holz-Profilen zusammengesetzt. Durch die Einschnitte wird zum einen die Dämmwirkung des Materials deutlich verbessert. Zum anderen wurden die Profile durch die beiseitigen Einschnitte so flexibel, dass die Spannungen innerhalb des Materials nicht dazu führten, dass die Module verformt wurden.

Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben

Die Projektpartner ICD und JHS haben umfassende Vorarbeiten in den für das Forschungsprojekt entscheidenden Forschungsbereichen vorzuweisen. Die Verantwortungsbereiche sind entsprechend den Fachgebieten zugeordnet und ergänzen sich gegenseitig. Als Ausgangsbasis dienen verschiedene Forschungsprojekte der Projektpartner, an die das hier vorgestellte Projekt in verschiedenem Maße anknüpft.

Das ICD hat mehrere Jahre Erfahrung in der Forschung an digitalen Fertigungsmethoden für die Architektur und deren Verkettung mit computerbasierten Entwurfs- und Planungsprozessen. Dies umfasst die Untersuchung, Entwicklung und Anwendung von computerbasierten Entwurfsmethoden und -werkzeugen mit direkter Simulations- und Fabrikationsanbindung für robotische Fertigungsprozesse mit einem Schwerpunkt auf konstruktiven Fragestellungen für die Architektur. Neben der Integration fertigungstechnischer Einschränkungen über n-dimensionale Parameterräume schließt dies auch die direkte Generierung von Maschinensteuerungscodes für Industriemanipulatoren, die dazugehörige Prozesssimulationen und deren Rückkopplung zum Design-Space mit ein. Die Forschung an integrativen, fertigungsgerechten Entwurfs- und Planungsmethoden erfolgt in direkter Verkettung mit der Untersuchung und Weiterentwicklung digitaler Fertigungsverfahren. Hier hat das ICD umfassende Vorarbeiten im Bereich der digitalen Vorfertigung von Leichtbausystemen aus Holz- und Faserverbundwerkstoffen vorzuweisen. Forschung des ICD wurde bisher an verschiedenen großmaßstäblichen Demonstrationen und Versuchsbauten erprobt und in F&E-Projekten mit Industriepartnern auf Ihre Praxisnähe untersucht. Für diese Forschung steht dem Institut eine 500m² große Versuchshalle mit einer Roboteranlage mit einem 15m x 3,5m x 4,5m umfassenden Bearbeitungsraum zur Verfügung. Durch Linearachse und Drehkipp-Positionierer erlaubt diese Anlage die Untersuchung und Erprobung von Prozessen und Bausystemen im vollen Vorfertigungsmaßstab.

An der Fachhochschule Münster wurde unter der Leitung von Hans Drexler von 2012 - 2014 ein erstes Forschungs- und Entwicklungsprojekt durchgeführt, bei dem die Studierenden ein Prototypengebäude in Massivbau-Weise errichteten (Abb. 4). Das hier beantragte Projekt baut auf den Erkenntnissen und den Entwicklungen dieses Projekts auf. Die Expertise von Herrn Prof. Drexler liegt in der Entwicklung der Baukonstruktion unter bauphysikalischen Gesichtspunkten, sowie der bauphysikalischen Messung und Evaluation. Hier wurde bereits durch das Vorgängerprojekt viel Erfahrung gesammelt, wodurch die wichtigen Aspekte der Evaluation für dieses Projekt gleich zu Beginn berücksichtigt werden können.



Abb. 3: Robotische Fertigung am Forschungsprojekt "Robotik im Holzbau".



Abb. 4: Vorgängerprojekt TimberPrototype 1

2. Forschungsvorhaben

Die Entwicklung des Bausystems geschieht durch die Integration der baukonstruktiven Voraussetzungen und den Möglichkeiten der digitalen Planung und Fertigung. Dazu wurden zunächst die möglichen Entwicklungsschritte des Bausystems systematisch untersucht und evaluiert. Ausschlaggebend für den Entscheidungsprozess waren nicht nur eine bauphysikalische und baukonstruktive Effizienzsteigerung, sondern auch herstellungstechnische Fragestellungen, Potentiale der Automatisierung und Parametrisierung, sowie nicht zuletzt architektonische Ausdrucksmöglichkeiten. In Zusammenarbeit mit der IBA Thüringen wurde der Entwurf und die Planung eines Demonstratorbaus zur selben Zeit vorangetrieben.

AP 1: Entwicklung des Bausystems

Da das Bausystem unterschiedlichste Anforderungen gleichzeitig erfüllen muss, wurde die Entwicklung in mehreren Iterationen parallel in Hinblick auf Statik, Fertigungstechnik, Bauphysik und architektonische Möglichkeiten untersucht. Die Erkenntnisse aus den einzelnen Fachbereichen flossen in die Entwicklung in der nächsten Iteration mit ein. Eine enge Zusammenarbeit zwischen den Forschungspartnern war dafür unumgänglich.

AP 1.1 Konstruktionssystem

Die Weiterentwicklung des Konstruktionssystems in Verbindung mit digitalen Entwurfs- und Fertigungsmethoden geschieht auf zwei Ebenen. Zum einen soll das System bauphysikalisch leistungsfähiger als das Bausystem im Vorgängerprojekt von Prof. Hans Drexler werden, und gleichzeitig einen Aufbau erleichtern. Zum anderen soll der architektonische Entwurfsspielraum durch eine präzise digitale Vorfertigung erheblich erweitert werden. Eine Kombination aus beiden Aspekten wird in diesem Arbeitspaket integrativ und iterativ untersucht.

Das Arbeitspaket ist in verschiedene Experimentserien unterteilt, mit deren Hilfe unterschiedliche Ansatzpunkte untersucht wurden. Ausgegangen wurde dabei immer vom Grundelement des geschlitzten Balkens.

Experimentserie 1: Balkenorientierung und Verbindung

In einer ersten Experimentserie wurden die Orientierung der Schlitze und die daraus resultierende Verbindung zwischen den Balken untersucht. Da aufgrund der bauphysikalischen Leistung des Vorgängerprojekts generell von einer Wandstärke von ungefähr 400 mm ausgegangen wurde, wurden die Experimente unter der Annahme durchgeführt, dass zwei Balkenebenen nötig sind. Inwiefern diese beide Balkenebenen zueinander orientiert sind, und wie diese verbunden sind, war ein Hauptaspekt dieser ersten Experimentserie.

Experiment 1.1: Orientierung der Schlitze entlang der Wandachse

Unabhängig von der bauphysikalischen Leistungsfähigkeit wurde in einem ersten Experiment überprüft welche konstruktiven und architektonischen Auswirkungen eine verdrehte Orientierung der Balken hat. Während die Anordnung der Schlitze zunächst nur einen bauphysikalischen Vorteil hatte, werden auch Spannungen im Material erheblich reduziert. Die Art der Schlitzung lässt es außerdem zu die Balken zu verbiegen und dadurch gekrümmte Wände zu erzeugen. Dieses Konzept war vor allem architektonisch von hohem Interesse. Dazu wurde ein Wandelement entwickelt, das in der Tiefe aus vier Balken besteht, die durch ihre Schlitzung leicht verbogen werden können und dadurch eine Krümmung erzeugen (Abb. 5 und 6).

Experiment 1.2: Modularisierte Wandelemente

Ein weiteres Experiment verfolgte die Idee, polygonale Elemente mit kreuzverbundenen Balken in zwei Ebenen zu erzeugen. Das dahinterliegende Prinzip ist die feste Verbindung von zwei Balkenebenen, wodurch eine theoretisch endlose Platte entsteht. Der Zuschnitt und die Kanten dieser Platte bestimmt dadurch den Möglichkeitenraum der Konstruktion. Um diesen Raum weiter zu untersuchen wurden drei weitere Parameter festgelegt: (1) Der Winkel der Balkenebenen zueinander, entweder parallel oder diagonal;



Abb. 5: Physischer Prototyp eines Wandsystems, das von gefrästen Schlüsselbrettern gekrümmt werden könnte. Die Balken erhalten durch die Schlitzung eine hohe Biegefähigkeit.

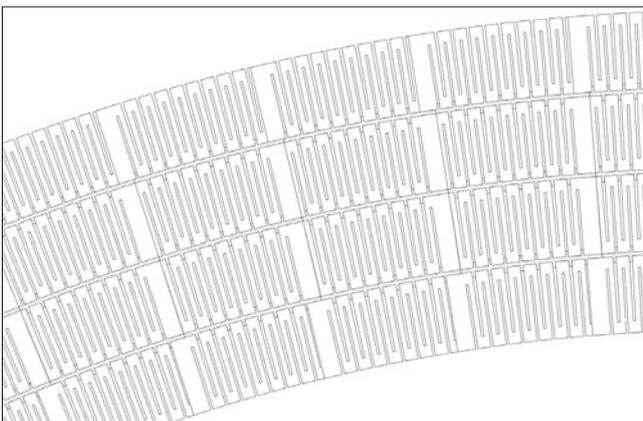


Abb. 6: Schnittzeichnung im Grundriss, die einen Wandaufbau mit der selben Wandstärke wie andere Konstruktionen aufweist.

(2) Die Geometrie des Zuschnitts der Elemente, als Polygon mit unterschiedlich vielen Seiten; und (3) die Art der Verbindung zwischen den polygonalen Elementen. Vor allem die Geometrie und Art der Verbindungen zwischen den polygonalen Elementen hat großen Einfluss auf deren Stabilität und den architektonischen Möglichkeitenraum. Die Ausführung im Detail wurde in diesem Stadium allerdings nicht untersucht (Abb. 7 und 8).

**Experiment 1.3:
Regelfläche durch verdrehte Balken**

Die letzten Experimente werden im Zusammenhang mit der finalen Systementwicklung im nächsten Kapitel beschrieben.

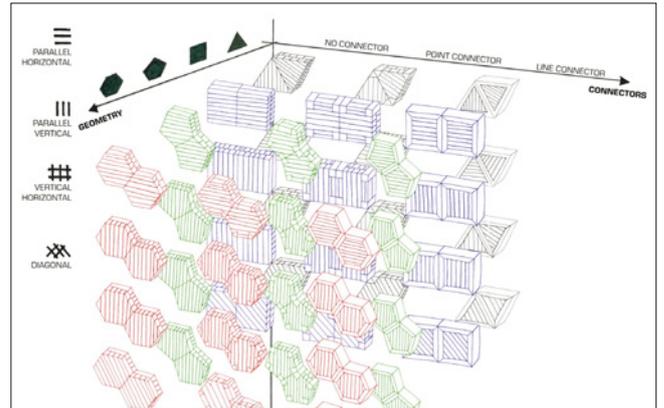


Abb. 7: Dreidimensionale Matrix der drei Parameter (1) Laminat, (2) Modulgeometrie, und (3) Kantenausbildung.

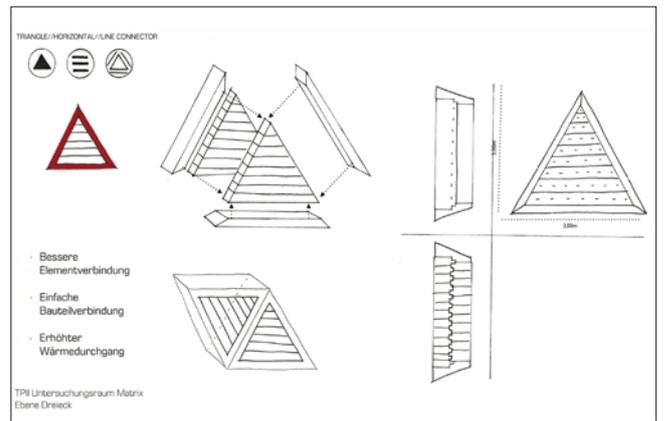


Abb. 8: Detailzeichnung einer Form der Kantenausbildung. In diesem Fall werden vollflächige Verbinder angebracht, die auch in verschiedene Winkel zugeschnitten werden können.

**Experimentserie 2:
Architektonische Auswirkungen**

Parallel zu den Entwicklungen in der ersten Experimentserie wurde auch unter Einbezug von studentischen Arbeiten der architektonische Entwurfsspielraum untersucht. Dies geschah zunächst zusammen mit der ersten Balkenorientierung und deren Verbindungen. Aus architektonischer Sicht war diese von besonderem Interesse, da eine Vielfalt von Radien für gekrümmte Wände möglich ist. Dies würde den Entwurfsspielraum noch einmal deutlich erweitern.

Experiment 2.1: Gekurvte Wände

Im Experiment wurde davon ausgegangen, dass mit der zuvor entwickelten konstruktiven Methode in Experiment 1.1 eine feste Anzahl an gekurvten Wandmodulen mit einem bestimmten Radius erzeugt werden könnte. Dadurch sollte der Entwurfsspielraum eingeschränkt werden. Es wurde vor allem untersucht, wie diese Wandelemente im Grundriss angeordnet werden könnten (Abb. 9). Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Wandelemente vertikal sind, und ein systemfremdes Deckenelement das Gebäude abschließt. Vor allem aufgrund des Deckenelements, das dem Grundriss in seiner Form folgen müsste, wurde von dieser Variante später abgesehen. Auch wurde die Konstruktionsvariante nicht weiter verfolgt, da die Schlitzte in ihrer Orientierung wesentlich weniger vorteilhaft sind (siehe hierzu auch Kapitel 1.4 Bauphysikalische Untersuchung)

Experiment 2.2: Modularisierte Gebäude

Die Form und Verbindung von polygonalen Modulen wurde in diesem Experiment ausführlich untersucht. Dabei wurden vor allem Anordnungen von gleichen Modulen in Betracht gezogen, um eine schnelle und unkomplizierte Vorfertigung zu ermöglichen. In dieser Hinsicht hatten sich vor allem Dreiecke angeboten, da diese in unterschiedlichen Anordnungen verschiedene Gebäudeformen bilden können. Die Idee des Modularen, aber auch des Rekonfigurablen war dabei von besonderem Interesse (Abb. 10 und 11). Obwohl die resultierenden Gebäudeformen aus architektonischer Sicht sehr interessant waren, wurde das Konstruktionssystem aufgrund der komplexen und voluminösen Verbindungen der Module nicht weiter verfolgt.

Experiment 2.3: Regelflächen

Die architektonischen Möglichkeiten der finalen Systementwicklung werden im Kapitel AP 2.2 Architektonisches Konzept näher beschrieben.

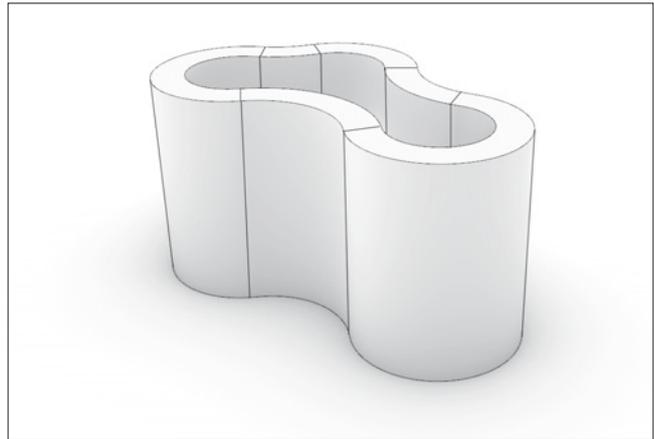


Abb. 9: Beispiel einer Aneinanderreihung von gekurvten Wandelementen. Der Radius ändert sich in diesem Fall nicht. Das Deckenelemente wurde hier ausgeblendet.

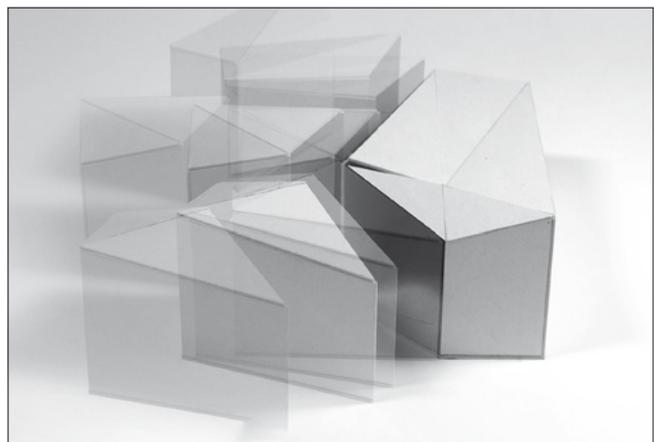


Abb. 10: Architektonische Experimente mit polygonalen Wandelementen, die auch als Deckenelemente verwendet werden können. In diesem Fall handelt es sich um mehrere Körper, die verschoben werden.



Abb. 11: Ein weiterer architektonischer Entwurf mit wandhohen, polygonalen Elementen, die einzeln transportiert und vor Ort zusammgebaut werden.

Finale Systementwicklung: Regelfläche durch verdrehte Balken

Die Erkenntnisse aus den ersten Experimentserien wurden für die Entwicklung eines dem Forschungsprojekt gerecht werdenden Bausystems angewandt.

Zunächst wurde eine Verbindung zwischen den Balken entwickelt, die ohne zusätzliche metallische Verbinder ausgeführt werden kann. Durch die Einführung einer bestimmten Anzahl an individuell gefrästen Nuten an den Rändern der Balken können diese relativ zueinander präzise lokalisiert werden. Die Entlastungsschnitte (Schlitze), die auch im Vorgängerprojekt angewendet wurden, können einerseits weiterhin standardisiert an Abbundmaschinen angebracht werden, andererseits bietet es sich in diesem neuen Kontext an, sie in Kombination mit den oben erwähnten individuellen Nuten auf einer digital gesteuerten Maschine, wie zum Beispiel einer CNC oder einem Industrieroboter, herzustellen. Dadurch wird es möglich, einen konstruktiven Aufbau nicht nur mit geraden Wänden auszuführen, sondern durch das leicht verdrehte Verbinden der Balken zueinander sogenannte Regelflächen zu erzeugen und den architektonischen Entwurfsspielraum zu erweitern (Abb. 12 und 13). In verschiedenen Iterationen wurden die Möglichkeiten einer solchen Lokalisierung untersucht, ohne die bauphysikalischen Eigenschaften zu beeinträchtigen (Abb. 13). Kriterien für den Erfolg der Weiterentwicklung sind:

- Geometrische Redundanz für die Aufnahme von Toleranzen
- Einfache Fügung und einfacher Aufbau
- Kurze Maschinenzeiten für die Bearbeitungsschritte

Verschiedene Strategien wurden dabei getestet. In einer ersten Iteration (Abb. 13, links) wurden sogenannte Kamm Bretter zwischen den Balken montiert, die auch mit einer CNC hergestellt wurden. Diese Kamm Bretter verbinden sich mit den Schlitzen der Balken und halten die Luftkammern gleichzeitig stabil. Die zusätzliche Bearbeitungszeit sprach allerdings gegen das Verwenden von Kamm Brettern, vor allem auch wegen



Abb. 12: Erste Prototypen, die eine parametrisierte Verbindung mit Winkeln zwischen den einzelnen Balken testen.

einem weiterhin fehlenden Verbindungsdetail. In einer zweiten Iteration (Abb. 13, mitte) wurde untersucht, ob Schwalbenschwanzverbindungen eine statisch wirksame Lösung für die Verbindung zwischen den Balken sein können. Die Einbringung von gefrästen Schwalbenschwanznuten ermöglicht auch eine verdrehte Verbindung zwischen den Balken, sofern genug Platz für diese zusätzliche Schwächung des Balkenquerschnitts bleibt. Hierzu wurden die Schlitze nur auf einen bestimmten Bereich der Balken beschränkt. Aufgrund von statischen Anforderungen war eine Verbindung entlang der Wandebene allerdings nicht mit Schwalbenschwanzverbindern möglich. In einer dritten Iteration (Abb. 13, rechts) wurde eine weitere kammähnliche Ausführung getestet, die allerdings direkt auf der Rückseite der Balken eingebracht wurde. Sowohl die Kamm Bretter in der ersten Iteration als auch Verzahnung in der dritten bedürfen durch ihre hohe Anzahl und Reibung einer sehr hohen Kraft beim Verbinden. Die Machbarkeit war damit in Frage gestellt. In den letzten beiden Iterationen wurde außerdem untersucht, welche Vor- und Nachteile die ausführung wechselseitiger und einseitiger Schlitze haben. Es wurde festgestellt, dass ein einseitiges Einbringen von Schlitzen mit einer Tiefe von bis zu 85% der Balkenbreite eine Entlastung für innere Materialspannungen bietet und gleichzeitig genug statische Leistungsfähigkeit erhalten bleibt, um die Balken im Verbund als tragende Wand- und Deckenelemente zu verwenden.

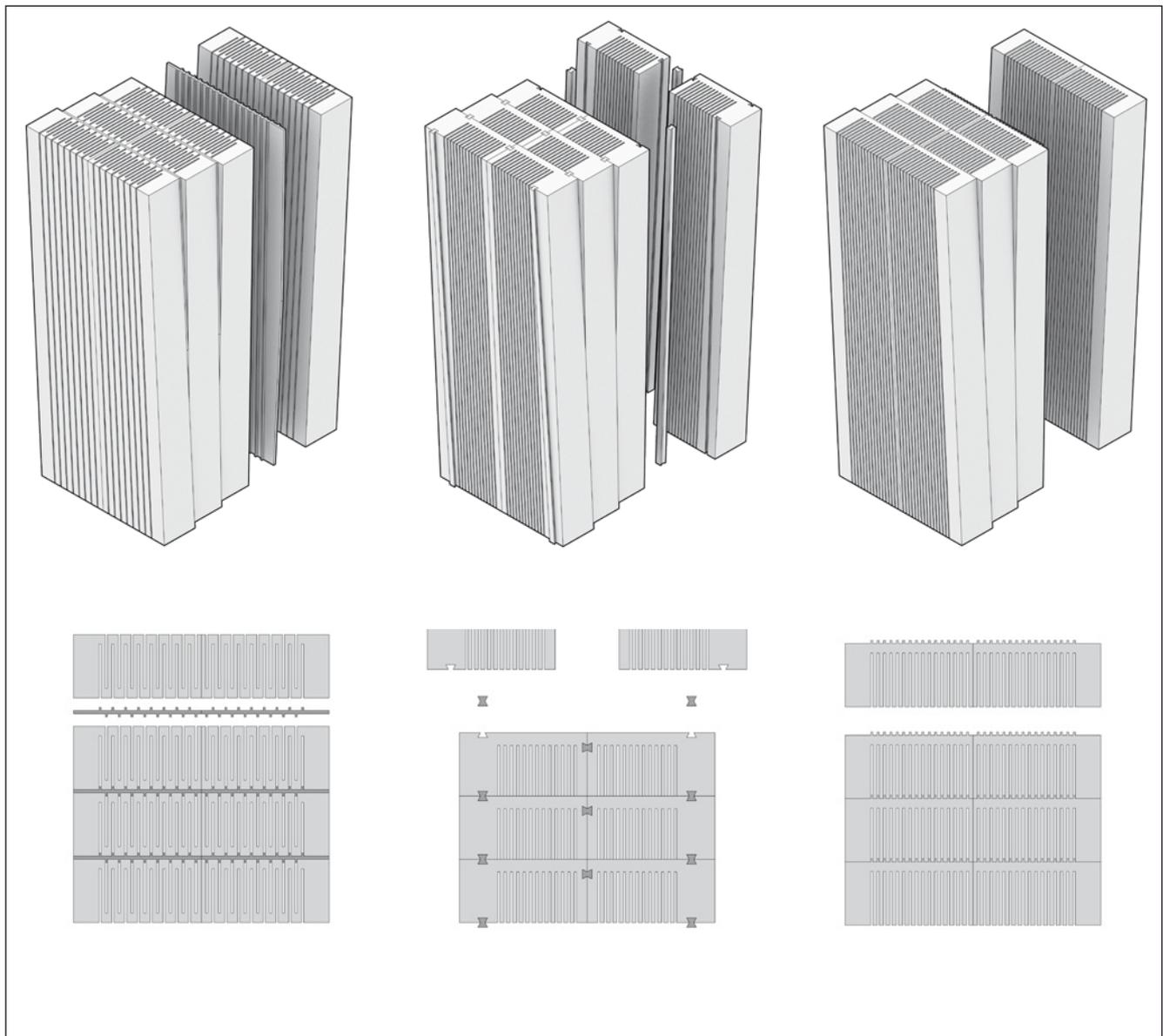


Abb. 13: Eine Reihe an Konzepten für eine parametrische und geometrisch adaptive Verbindung. Es wurden Verbindungselemente und integrierte Verbindungen getestet.

Die ersten Iterationen gaben viel Aufschluss für die weitere Entwicklung. Es wurde erkannt, dass eine konstruktive Verbindung zwischen den Balken sowohl entlang der Wandebene, als auch orthogonal dazu, also zwischen der Balkenebene innen und außen, unterschiedlich hergestellt werden muss, und sowohl eine statische Leistungsfähigkeit als auch eine hohe Dichtigkeit sichergestellt werden muss. Zusätzlich müssen die Verbindungen auf einer CNC Maschine einfach herstellbar und anschließend manuell einfach zu fügen sein. Dazu zählt auch das Kriterium, dass die Balken wenn möglich nicht auf allen Seiten fräsend bearbeitet werden sollen.

In Rücksprache mit dem Industriepartner, der die Produktion des Demonstratorgebäudes

übernehmen soll, wurde in der letzten Iteration eine Kombination aus Nut- und Feder Verbindung, und einer Schwalbenschwanzverbindung, gewählt (Abb. 14, links). Für die Eckverbindung (Abb. 14, rechts) wurde eine gestufte Blattung entwickelt, die durch eine zusätzliche Verzahnung eine erhöhte Dichtigkeit erlaubt. Nicht zuletzt die verfügbaren Maschinen des Industriepartners spielten hierbei eine wichtige Rolle. Auch die Maße der einzelnen Werkzeuge im Abbundprozess haben eine entscheidende Auswirkung auf die Effizienz der Fertigung. Da eine genaue Aussage zur Maschinenzeit pro Balken und zu den möglichen Toleranzen erst im Herstellungsprozess erfolgen konnte, wurden zu Beginn nur wenige Prototypen in einer Art Vorserie gefertigt (Abb. 15). Im Anschluss wurden noch einmal geometrische

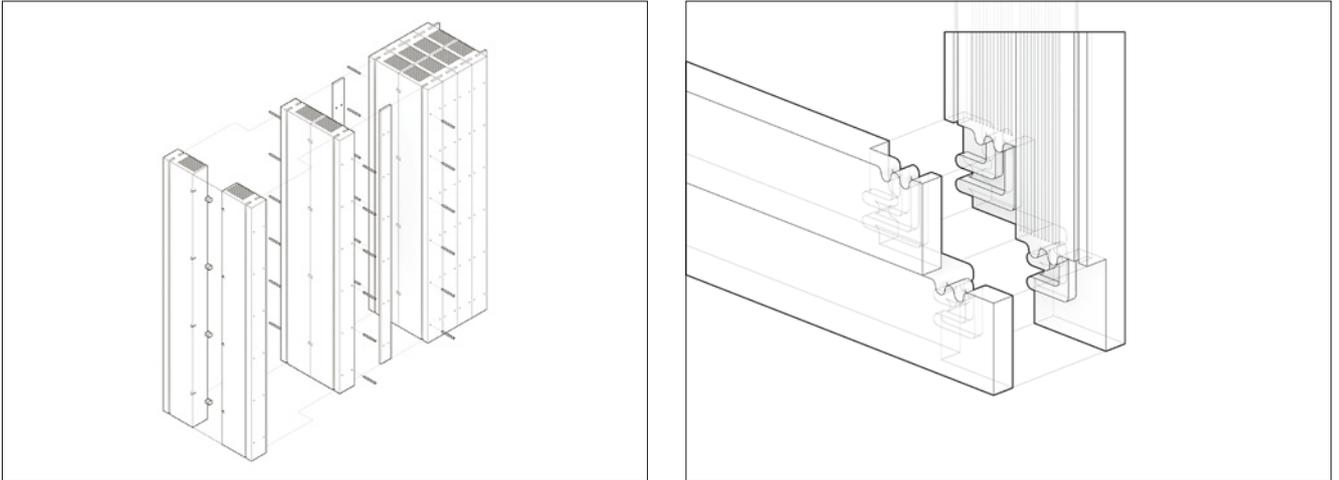


Abb. 14: Explosionszeichnung des entwickelten Konstruktionssystems mit allen Verbindungen. Die Nut- und Feder-Verbindung wird durch von außen eingebrachte Holzdübel permanent fixiert. In die Blattung der Eckverbindung werden noch zusätzliche Stufen eingefräst um eine luftdichte Konstruktion zu gewährleisten.



Abb. 15: Fertige Balken und ein Mock-Up der Konstruktion mit einem bei einer Schreinerei gefertigten Eckdetail. Die Verbindung wird nur über eine Verzahnung und die Schwalben-Schwanz-Verbindungen hergestellt.

Parameter der Nut und der gestuften Blattung angepasst, die eine reibungslose Herstellung erlaubten. Die Evaluierung der Herstellungszeit und der Toleranzen wird in einem späteren Arbeitspaket diskutiert. Letztendlich ist es aber auch an dieser Stelle bereits wichtig zu betonen, dass eine auf diese Art der Balkenbearbeitung angepasste CNC Maschine wesentlich höhere Stückzahlen erlauben würde. Aufgrund der damit verbundenen Investitionskosten konnten diese theoretischen Möglichkeiten nicht weiter betrachtet werden.

AP 1.2 Fertigungsmethoden

Die Machbarkeit der Konstruktion wurde kontinuierlich mit verfügbaren Fertigungsmethoden untersucht. Dabei waren die Art und Anzahl der Werkzeuge sowie die Bearbeitungsgeschwindigkeit von Bedeutung. Hierzu wurde auf die Erfahrung von Holzbearbeitung der Projektpartner sowie der Industriepartner zurückgegriffen. Größe und Form der Sägeblätter und der Schaftfräser haben direkten Einfluss auf die Form der Verbindungsdetails. Da es sich hier um eine prototypische Fertigungsentwicklung handelte wurde kein Budget für spezielle Fräswerkzeuge vorgesehen. Stattdessen wurden die Details den in der Schreinerei verfügbaren Werkzeugen angepasst. Dies war vor allem für die Breite der Schlitzes von Bedeutung, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Dämmfähigkeit des Balkens hat.

Die Bearbeitung der Balken des zuletzt entwickelten Konstruktionssystems unterteilt sich in die unten genannten Schritte. Die Zeitangaben beziehen sich auf einen Balken mit einer Länge von ca. 4 Metern. Die Balken werden zuvor in ihre grobe Länge geschnitten, sodass möglichst wenig Material verloren geht. Die Maßhaltigkeit des Rohmaterials spielte in dieser Entwicklung eine wichtige Rolle. In AP3 wird die Problematik im Detail behandelt.

Seite 1, Rückseite:

- Die Balken werden mit einer Kreissäge oder einem Schaftfräser abgelängt und in ihrer Breite zusätzlich formatiert. Dazu wird der Schaftfräser in mehreren Schritten rund um den Balken gefahren. Der Rohbalken hat deshalb ursprünglich ein Übermaß (Dauer ca. 2 Minuten).
- Die Nut auf der Rückseite wird mit einem Schaftfräser in zwei Zustellungen eingefräst (Dauer ca. 2 Minuten).
- Zwei Lokalisierungslöcher für die Vorderseite wird mit dem selben Fräser eingebracht. Beim Umdrehen des Balkens greifen Stifte in diese Löcher (Dauer ca. 1 Minute).

Seite 2, Vorderseite:

- Die Nut auf der Vorderseite wird mit einem Schaftfräser in zwei Zustellungen eingefräst (Dauer ca. 2 Minuten).
- Die verzahnte Blattung an den Enden der Balken wird mit einem größeren Schaftfräser eingefräst. Dazu sind mehrere Zustellungen und komplexere Verfahrenwege notwendig. Jeder zweite Balken hat dabei die negative Verbindung seines Nachbarn (Dauer ca. 5 Minuten).
- Die Schwalbenschwanzverbindungen werden mit einem speziellen Schwalbenschwanzfräser an den Seiten des Balkens eingefräst (Dauer ca. 3 Minuten).
- Die Schlitzes werden zuletzt mit einem Sägeblatt eingebracht. Dieser Arbeitsschritt reduziert die Steifigkeit des Balkens und wird daher erst am Ende ausgeführt. Da nur ein einzelnes Sägeblatt zur Verfügung steht ist dieser Arbeitsschritt außerdem besonders zeitaufwändig (Dauer ca. 10 Minuten).

Für alle Arbeitsschritte werden standardisierte CNC Vorgänge verwendet, aber aufgrund des digitalen Modells parametrisiert und entsprechend der Balkengeometrie automatisch angepasst. Fräsvorgänge mit einem Schaftfräser wurden so programmiert, dass die Zustellung dem Durchmesser entspricht und nicht zu viel Material in einem Fräsvorgang abgetragen wird. Auch der Vorschub und die Werkzeugrichtung wurden beachtet.

Als Schnittstelle zwischen der Geometrieerzeugung und der Maschine der Schreinerei wurde ein Kurven-basiertes Modell gewählt (Abb. 16). Das digitale Werkzeug erzeugt automatisch alle zuvor parametrisierten Werkzeugpfade als Kurven. Diese sind bereits abhängig vom Werkzeugdurchmesser im richtigen Abstand zum Werkstück. Die Richtung der Kurve entspricht außerdem der Fräsrichtung. Die Dateiübergabe wurde in mehreren Iterationen entwickelt und getestet.

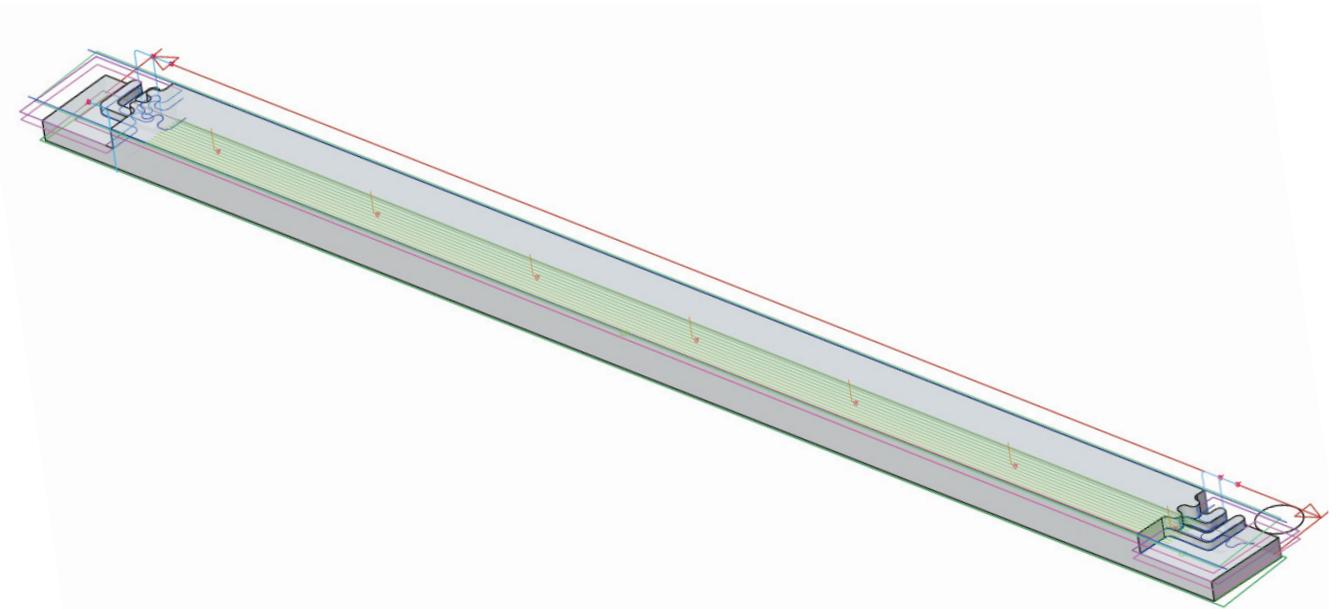


Abb. 16: Visualisierung aller Werkzeugpfade für die Bearbeitung eines Balkens. Die Bearbeitung auf der Rückseite wird dabei am selben 3D Objekt erzeugt, allerdings nach oben verdreht exportiert.

AP 1.3 Statische Untersuchung

Um die Machbarkeit des Demonstrators unter Beweis zu stellen, aber auch um die statische Leistungsfähigkeit des Bausystems im Allgemeinen zu untersuchen, wurde eine statische Analyse mit Hilfe von groben Kalkulationen und Finite-Elemente-Methoden durchgeführt. Diese beziehen sich auf die Ausführung im Detail aber auch auf die möglichen Spannweiten und den generellen Materialverbrauch des Tragsystems.

Das statische Modell wurde in Sofistik so aufgesetzt, dass die Verbindungen mit bekannten statischen Werten versehen werden konnten. Die Steifigkeit der Verbindungen in den Ecken war in diesem Kontext von besonderer Bedeutung und wurde in mehreren Iterationen untersucht. Bevor die Balken über Ecke als verzahnte Blattung verbunden wurden, ging das Projektteam zunächst von einer Bolzenverbindung aus. Deren Steifigkeit ergibt sich aus der Position, der Anzahl und der Größe, sowie dem Material. Durch die Analyse wurde festgelegt, dass in den unteren Ecken mindestens drei Bolzen aus Stahl mit einem Durchmesser von 10mm eingefügt werden müssen. Nicht zuletzt aus diesem Grund wurde die verzahnte Blattung eingeführt, da nun nicht nur

die Bolzen, sondern das Material der Balken durch deren Verzahnung eine hohe Steifigkeit erreicht.

Die Verbindungen zwischen parallelen Balken mit Nut und Feder wurde als ausreichend eingestuft, jedoch wurde von einer Spannweite von Decken und Böden von mehr als sechs Metern abgeraten. Hierzu müssten weiterführende Untersuchungen mit detaillierteren Modellen angestellt werden. Generell sind die für den Demonstrator gewählten Materialqualitäten und Materialüberstände zwischen Verbindern und Holz bereits sehr gering. Dies liegt daran, dass die Anzahl der Schlitz für einen hohen Dämmwert maximiert wurde.

AP 1.4 Bauphysikalische Untersuchung

Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt:

Die traditionelle Blockhausbauweise, in der horizontal Holzbalken übereinandergeschichtet und in den Ecken miteinander verschränkt werden, ist für moderne, hochgedämmte Gebäude aufgrund eines zu hohen Wärmedurchgangs durch die Außenbauteile und einer mangelnden Luftdichtheit nicht geeignet. Zur Verbesserung des Wärmedurchgangs wurden im 'Timber Prototype 1' durch vertikale Einschnitte in die Holzbalken schlanke Luftkammern geschaffen.

Konvektion in den Luftkammern transportiert Wärmeenergie von der wärmeren zur kälteren Seite der Kammer. Luft hat, zumindest in geringen Schichtstärken orthogonal zum Wärmestrom, einen höheren Wärmedurchlasswiderstand als Holz. Die Dämmwirkung von Luftkammern hängt jedoch von der Geometrie, Größe und Richtung der Luftkammern ab. Je schmaler die Kammer in Wärmestromrichtung, desto wirksamer ist sie. Ab ca. 23 mm Schichtdicke orthogonal zum Wärmestrom wird der Wärmedurchlasswiderstand von Holz größer als von Luft.

Ziel des Projekts war ein Bauteil mit möglichst hohem Luftanteil in möglichst schmalen Kammern zu schaffen. Die Breite der Kammern ergibt sich aus dem Radius des Sägeblatts, mit dem die Kammern hergestellt werden. Für den Dämmwert ist die Breite einer Luftkammer parallel zum Wärmestrom nur insofern relevant, als sie den Luftanteil im Bauteil beeinflusst. Auf diese Weise konnte der U-Wert der Massivholzkonstruktion um etwa 25% verbessert werden.

Für ein kleines Gebäude nach den Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2014, wurden im Außenwandbauteil zwei Holzbalkenlagen mit je 20 cm Stärke nebeneinander angeordnet. Als Regenschutz wurde eine hinterlüftete, vorgehängte Holzfassade vor den Außenwänden vorgesehen. Beim 'Timber Prototype 1' wurde der U-Wert in der Summe im Vergleich zu einer 40 cm starken Massivholzkonstruktion ohne Vorhangfassade von 0,281 W/m²K auf 0,206 W/m²K reduziert.

Bei der ersten Berechnung wurde davon ausgegangen, dass es sich um stehende Luftschichten handelt.

Nach der EnEV 2014 wird für opake Außenbauteile bei Nichtwohngebäuden mit einer mittleren Innenraumtemperatur von mind. 19°C ein Soll-U-Wert von 0,28 W/m²K vorgegeben. Der Wärmeübertrag wurde mit diesem Wert und mit dem Wärmeübertrag einer Massivholzkonstruktion verglichen.

Eine 440 mm starke Massivholzwand erreicht genau den Soll-U-Wert für opake Außenbauteile bei Nichtwohngebäuden nach der EnEV2014 (0,28 W/m²K). Der U-Wert der Außenwand von 'Timber Prototype 1' ist unter der Voraussetzung, dass es sich um stehende Luftschichten handelt, bei einem etwa 10 mm stärkeren Wandaufbau etwa 25% besser (Abb. 17).

Die erforderliche Mindestdicke des 'Timber Prototype 1' zur Erfüllung des Soll-U-Wertes nach der EnEV 2014 beträgt bei Berücksichtigung stehender Luftschichten beim gleichen Aufbau 320 mm. Mindestens 10 x 3 mm starke Luftkammern je Balken sind erforderlich, wenn die Stege zwischen Luftkammern 7 mm stark sind und je Balken ein Massivholzelement von 30 mm Stärke außen und ein gemeinsames Massivholzelement von 110 mm zwischen den Balken berücksichtigt wird. Die Wand kann 27% schlanker ausgeführt werden als eine Massivholzwand. Der Wärmedurchgang beider erläuterten Wandaufbauten wurde zusätzlich mit einer hinterlüfteten Fassade berechnet. Die U-Werte verbessern sich jeweils um einige Prozent. Allerdings ist zu beachten, dass das Bauteil mit 14 Luftschichten je Balken und einer Vorhangfassade über 500 mm stark wird. Für kleine Gebäude ist die Wandstärke unverhältnismäßig stark.

Vier weitere Varianten desselben Aufbaus aber mit schwach belüfteten Luftkammern wurden berechnet. Unter Berücksichtigung einer schwachen Belüftung der Luftkammern verschlechtert sich der U-Wert bei gleicher Bauteildicke jeweils um ca. 22%. Die erforderliche Mindestdicke zur Erfüllung des Soll-U-Wertes erhöht sich auf 400 mm (ohne Vorhangfassade) und 13 Luftkammern pro Balken.

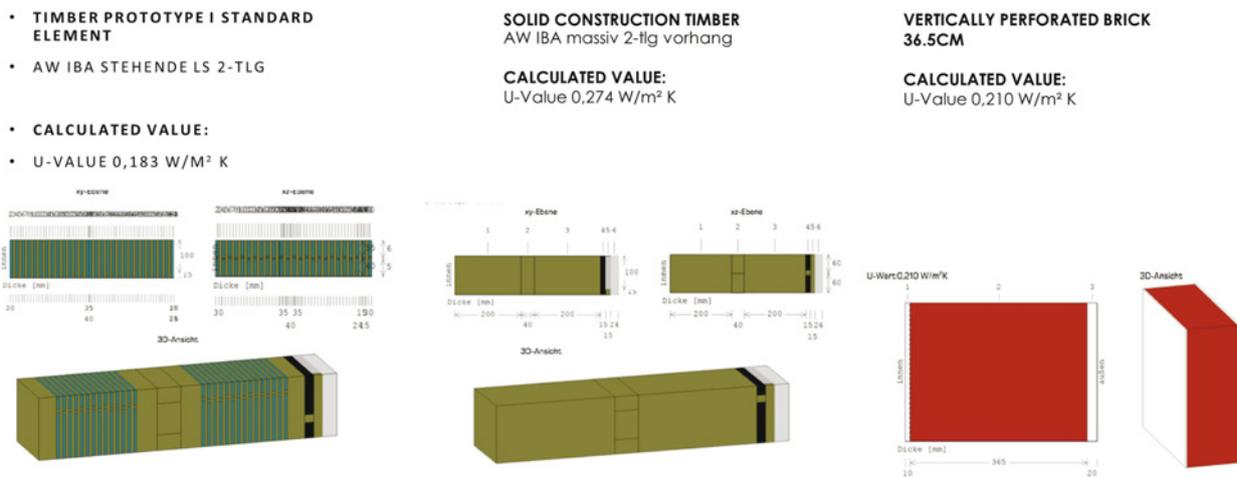


Abb. 17: Vergleich des Wandaufbaus von 'Timber Prototype I' mit einem gleichen Wandaufbau für eine massive Vollholzkonstruktion und einer Hohlziegelkonstruktion.

Weiterentwicklung und Bauphysikalische Untersuchung

Im Verlauf der ersten Iterationen des Bausystems wurden die prinzipielle Anzahl und Anordnung der Schlitze im Vergleich zur bauphysikalischen Leistungsfähigkeit anderer Materialien durch eine digitale Simulationssoftware untersucht. Die Ergebnisse der Simulation liegen dem Bericht als Anlage bei.

Die Bauphysik eines aus dem Bausystem bestehenden geplanten kleinen Gebäudes wurde hinsichtlich Dämmstandard und Dampfdiffusion untersucht.

Dazu wurde mit einer dynamischen Gebäudesimulation auf Komponentenebene der Wärmedurchgang und der Wärmebedarf eines kleinen Gebäudes ermittelt, sowie die Dampfdiffusion am Beispiel eines Wandaufbaus simuliert.

Mit Hilfe eines parametrischen Modells kann die bestmögliche Bauteilgeometrie durch eine Simulation der Bauteileigenschaften in unterschiedlichen Entwürfen überprüft werden, die sich in ihren Dimensionen, dem Aufbau und der Anzahl der Einschnitte unterscheiden. Die Simulation soll mit Hilfe von 1:1 Modellen, an denen die Wärmeleitfähigkeit und Luftdichtheit gemessen werden kann, überprüft werden und wird gegebenenfalls an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst.

Generell haben die Proportion und Anzahl der Schlitze, die Ausführung der Verbindung zwischen den Balken, sowie schlussendlich auch die Art der Fassade einen wesentlichen Einfluss auf die bauphysikalische Leistungsfähigkeit der gesamten Konstruktion. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) von Wänden, Bodenaufbauten und Flachdächern der ersten Experimentserie des Bausystems fielen aufgrund der gedrehten Luftkammern insgesamt schlechter aus. Zur Auswertung der thermischen Eigenschaften wurden einige Varianten überprüft, jedoch wurde schnell klar, dass die Luftkammern orthogonal zum Wärmefluss angeordnet werden sollten.

Die Ergebnisse dieser ersten Simulation konnten zeigen, dass die geplante Konstruktion die Anforderungen der EnEV erfüllen kann. Durch die hohe Anzahl der Schlitze und des großen Einflusses von Toleranzen konnten allerdings keine verlässlichen Aussagen

getroffen werden. Es wurde dennoch festgestellt, dass die Schlitze unter allen Umständen parallel zur Wandebene verlaufen müssen, um bauphysikalische Anforderungen zu erfüllen.

Zu weiteren Details der bauphysikalischen Untersuchung verweisen wir auf die Berichte im Anhang.

Dampfdiffusion

Auch das Dampfdiffusionsverhalten wurde auf zwei Wegen untersucht: mit dem Glaserverfahren nach DIN 4108-3 und mit einem Programm zur gleichzeitigen Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen. Auch hier erfüllten alle untersuchten Varianten die Anforderungen bezüglich des Tauwasserausfalls.

Regen und Wind auf der Außenoberfläche des sind besonders wegen der waagrecht Holz-fugen die größte Herausforderung für das Bausystem. Durch nicht vollständig versiegelte Fugen dringt Wasser in die Holzkonstruktion und sammelt sich in den Luftkammern. Man kann kaum vorhersagen, wie viel Wasser aufgrund von Starkregenereignissen und Wind eindringt. (Abb. 18). Als Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) wurde für alle innenliegenden Schichten der kleinstmögliche, für die äußerste Schicht hingegen der größtmögliche Wert angesetzt.

Die Variante mit 10 stehenden Luftschichten wurde mit und ohne Vorhangfassade über 1 und 10 Jahre berechnet. Aufgrund ihrer schlechteren U-Werte wurden die übrigen Varianten nicht untersucht. Analog zu ‚Timber Prototype 1‘ lag der Feuchtegehalt in Masseprozent auf der Außenhaut bzw. der Vorhangfassade in den regenstarken Monaten kurzzeitig über der kritischen Marke von 20%. Ursache waren Starkregenereignisse, die rasch abtrockneten. In der Wandmitte und auf der Wandinnenseite wurden ausschließlich unkritische Feuchtegehalte unter 18% festgestellt.

In den Varianten mit Vorhangfassade wirkten sich die Regenereignisse kritisch ausschließlich auf der Fassade aus. Hinter der Hinterlüftung war der Effekt sichtbar abgemildert und zu allen Zeiten unter dem kritischen Niveau.

Die relative Feuchte aller untersuchten Schichten lag durchgängig unter 85% und nahm über einen Zeitraum von mehreren Jahren kontinuierlich ab. Die höchste relative Feuchte wurde in den Wintermonaten in der äußersten Wandschicht festgestellt. Die Temperaturen schwankten Jahreszeitengemäß aber waren über 10 Jahre konsistent. Beide

Simulationen zeigen, dass in einer luftdichten Massivholzkonstruktion, in der keine weiteren Materialien verwendet werden, kein Kondensatausfall durch Dampfdiffusion onk.

Es ist allerdings zu beachten, dass das Schwellen und Schrumpfen des Holzes durch Feuchtigkeitseinwirkung in der Berechnung nicht berücksichtigt werden konnte. Es ist zu erwarten, dass sich durch Austrocknung Fugen öffnen und Feuchtigkeit von außen oder innen in das Bauteil eindringen kann. Diese zusätzliche Feuchtigkeit ist in der Berechnung nicht erfasst.

Physikalische Tests

Anschließend wurden deshalb zwei Prototypen für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an der Materialforschungs- und Prüfanstalt der Bauhausuniversität Weimar angefertigt (Abb. 19). Diese entsprachen in ihrem Aufbau bereits der letzten Iteration der Systementwicklung, wurden aber für den Test entsprechend zusätzlich vorbereitet. Die Evaluierung in diesem Testaufbau bezieht sich ausschließlich auf den Wandaufbau ohne Eckverbindungen oder andere architektonische Elemente. Deren Untersuchung an der MFPA hat einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ergeben (siehe Anlage). Damit wurden die wissenschaftlichen Anforderungen zunächst erfüllt.

Vor allem der Unterschied zwischen einer Konstruktion mit und ohne hinterlüfteter Fassade (Abb. 20) ist hier hervorzuheben. Auch hat die Luftdichtigkeit der Konstruktion spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle und wurde deshalb in der Fertigung und im Aufbau mehrfach berücksichtigt. Der Prüfbericht ist dem Abschlussbericht angehängt.

Eine abschließende Untersuchung am gebauten Demonstrator soll auch nach Ende des Forschungsprojekts angestrebt werden, sofern dies finanziell möglich ist. Hier wäre vor allem der Einfluss aller Verbindungen und der Dichtigkeit der Öffnungen in der Konstruktion im Vergleich zum theoretisch erreichbaren Wert von großem Interesse.

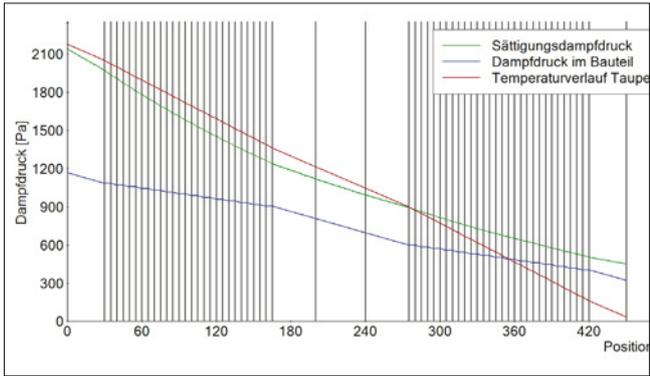


Abb. 18: Sättigungsdruck, Dampfdruck und Temperaturverlauf im Bauteil mit einer hinterlüfteten Fassade. Der Schichtaufbau erfüllt die Anforderungen an den Feuchteschutz.



Abb. 19: Prototyp an der MFPA in Weimar zur Messung der Wärmeleitfähigkeit.

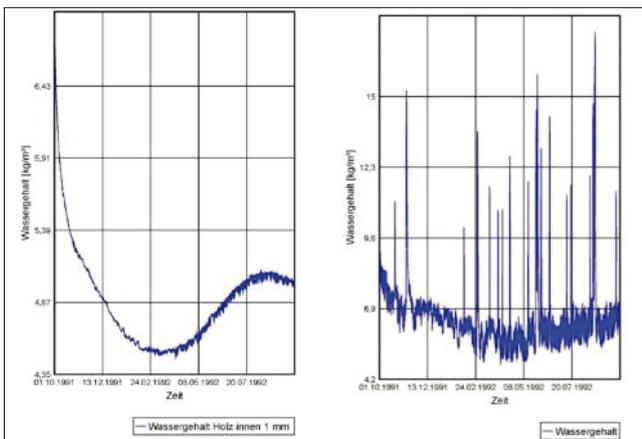


Abb. 20: Simulationsergebnisse des Wassergehalts in der Konstruktion ohne Fassade (links) und mit hinterlüfteter Fassade (rechts). Weitere Informationen dazu können dem MFPA Prüfbericht entnommen werden.

AP 1.5 Öffnungen in der Konstruktion

Teil der Entwicklung des Bausystems war auch das Verhältnis zu möglichen Öffnungen. Im Verlauf des Forschungsprojekts wurden verschiedene Optionen zu Öffnungen in der Konstruktion untersucht. Dabei wurde zwischen Öffnungen innerhalb einer Wand und Öffnungen am Ende der Konstruktion (Abb. 22) unterschieden. In beiden Fällen wurden mehrere Varianten untersucht, die statische und baukonstruktive Abhängigkeiten aufweisen. Der erste Ansatz untersucht, ob die Öffnungen als Sonderkonstruktion in die Außenwände zu integrieren sind (Abb. 22, links). In diesem Fall werden die Öffnungen als raumhaltige Bauteile konstruiert, die auch Wohnfunktionen wie Badezimmer oder Schlafkojen übernehmen können. Alternativ wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem Bausystem um eine stark gerichtete Konstruktion handelt, die nur Öffnungen in Querrichtung zu der Hauptachse des Gebäudes, also als Abschlussflächen der longitudinalen Gebäudeflächen zulassen (Abb. 22, rechts). Nicht zuletzt die transportfähigkeit eines Gebäudes oder von Gebäudemodulen spielten in dieser Entwicklungsphase bereits eine Rolle.

Aufgrund schwer zu lösenden Anschlussdetails, des begrenzten Budgets für einen Prototypen, und zuletzt auch dem wissenschaftlichen und architektonischen Fokus auf die Primärkonstruktion, wurde der zweite Ansatz für die Öffnung gewählt. Die Sonderelemente aus dem ersten Ansatz waren dennoch von großem Interesse und wurden als machbar, wenn auch teurer, bewertet. Der Lichteinfall wurde besser bewertet, auch wenn ein Demonstrator in der angestrebten Größe von diesem Vorteil nicht besonders profitieren würde. Die sich diesem Arbeitspaket bereits anschließenden architektonischen Entwürfe richteten sich deshalb nach dem zweiten Ansatz für Öffnungen (Abb. 24).

Im Vergleich ist es von besonderem Interesse den Wandaufbau inklusive seiner Öffnungen später in Hinblick auf das bauphysikalische Verhalten untersuchen zu können. So kann am fertigen Gebäude mittels Thermographie eine Aussage zu den Wärmeverlusten und der Dichtheit der gesamten Konstruktion

getroffen werden. Dazu soll aber die Konstruktion der einzelnen Fenster aber keinen allzu großen Einfluss nehmen, sondern lediglich die Verbindung zwischen Fenstern und Konstruktion bewertet werden. Die Konstruktion der Fenster wurde deshalb so gewählt, dass die Dichtigkeit innerhalb dieser gewährleistet ist und ähnlich der eines standardisierten Fensters entspricht. Nichtöffnende Fenster wurden deshalb lediglich als aufgeklebte Doppelverglasung ausgebildet, während die Öffnungsflügel an den Türen mit zusätzlichen Gummilippen ausgeführt sind.

Die weitere Ausdetaillierung der Konstruktionsöffnungen wurde im Rahmen der Entwicklung eines prototypischen Demonstratorgebäudes in AP2 durchgeführt. Das ästhetisch und architektonische Ziel ist es, den Fokus auf der Konstruktion zu belassen und die Öffnungen möglichst schlicht und zurückhaltend auszuführen, ohne aber baukonstruktive Nachteile zu erleiden (siehe auch Abb. 27 am Ende des Kapitels). In diesem Rahmen wurden für die Fensterkonstruktion verschiedene Optionen untersucht. Die zuletzt gewählte Strategie der Fensterrahmen ist in Abb. 21 und 23 zu sehen.



Abb. 21: Explosionszeichnung der Fensterrahmenkonstruktion.

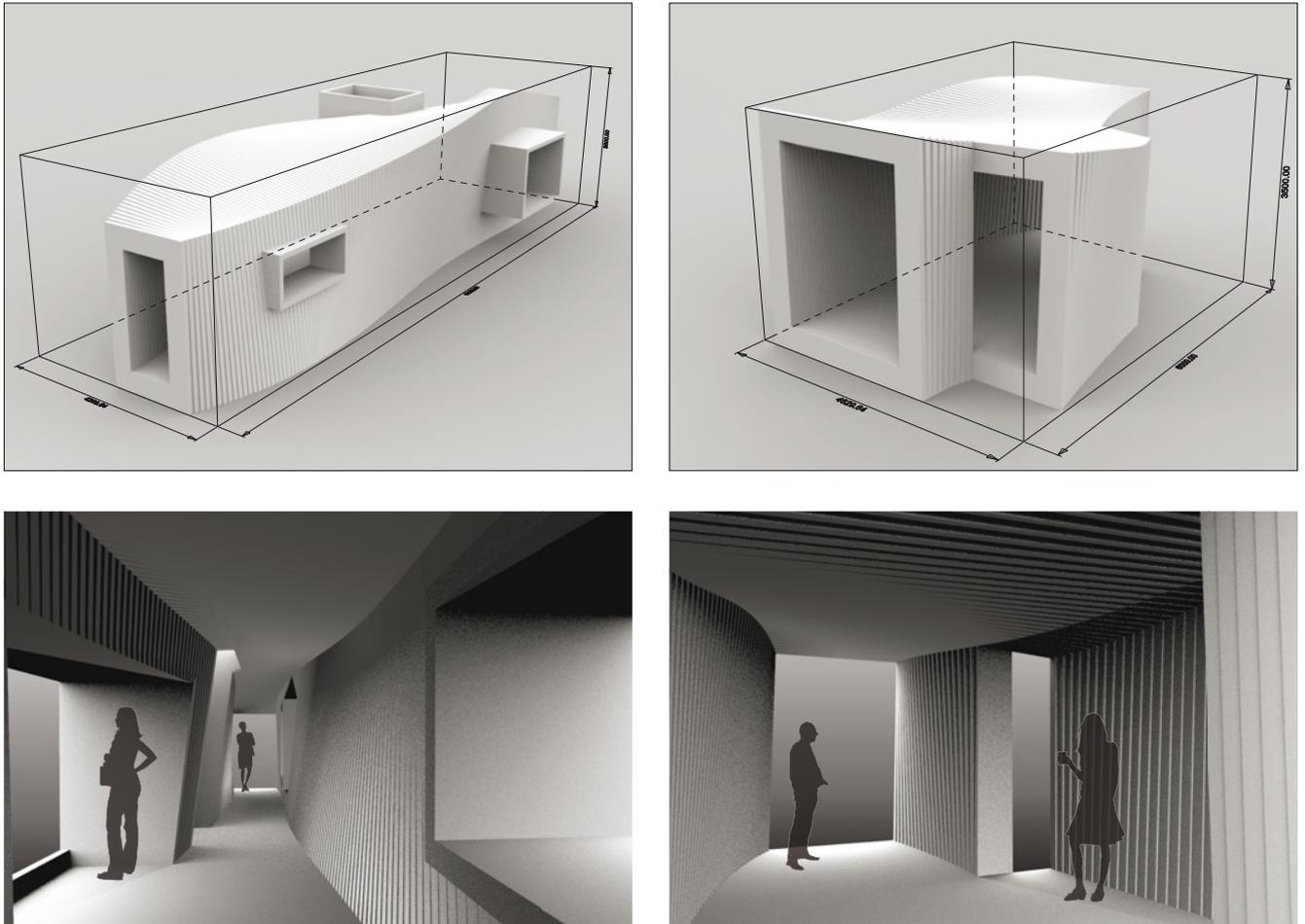


Abb. 22: Schematische Darstellung von Öffnungsvarianten und deren architektonische Auswirkungen, die zu Beginn des Forschungsprojekts untersucht wurden.
 Links: Die Öffnungen werden als Sonderkonstruktion ausgeführt und sind statisch von der Primärkonstruktion getrennt. Die Außenmaße des Gebäudes halten außerdem Transportmaße ein, um am Stück transportiert werden zu können. Rechts: Die Öffnungen sind Teil der Primärkonstruktion und nur in Richtung der Gebäudeachse orientiert.

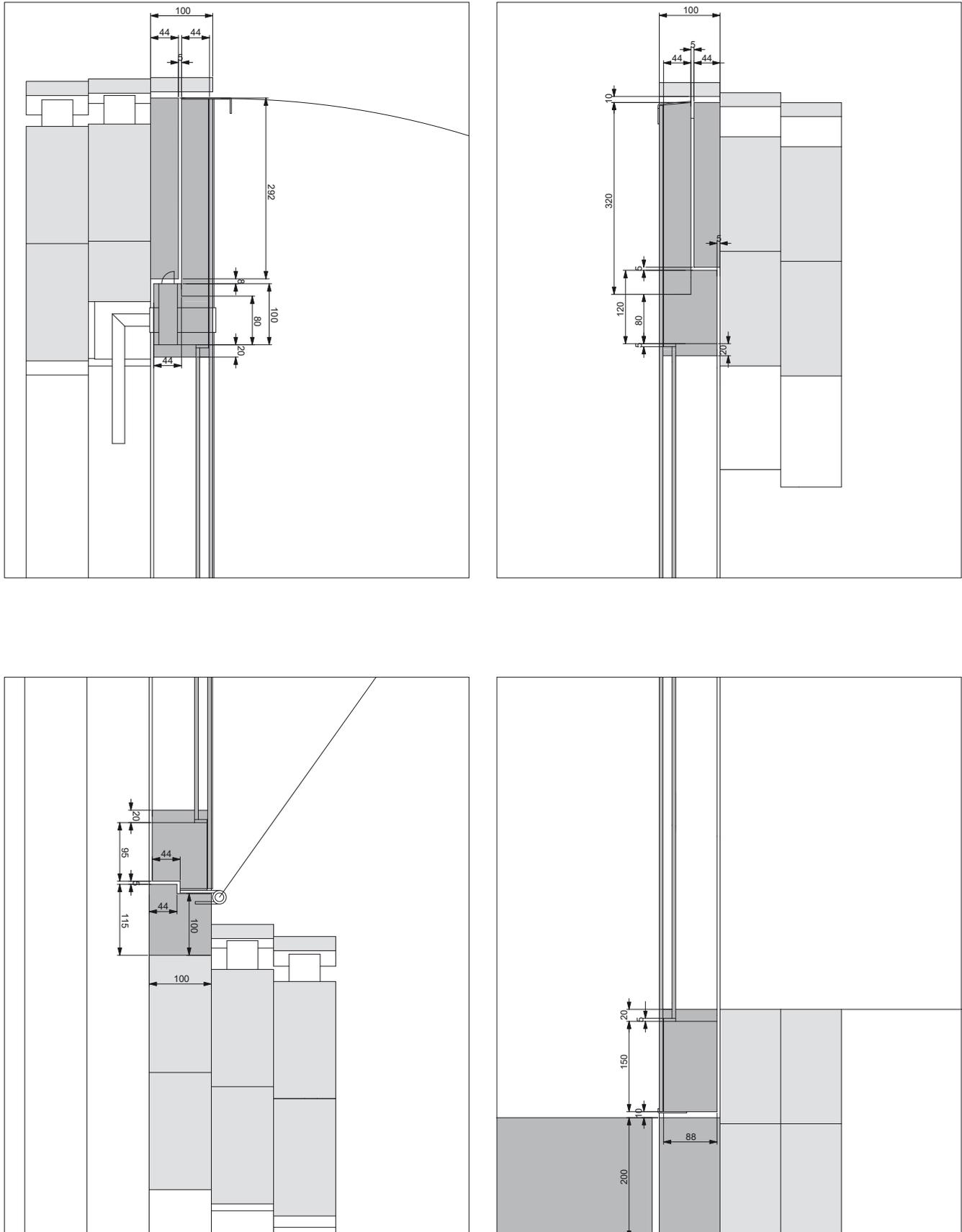


Abb. 23 Links: Grundriss des Öffnungsflügels im Detail. Rechts: Schnitt des Öffnungsflügels im Detail. Die Glasscheibe wird auf einen Holzrahmen aufgeklebt, der wiederum an einen an der Konstruktion befestigten Holzrahmen anschließt. Dazwischen werden Gummilippen in drei Ebenen angebracht, um eine Dichtigkeit sicherzustellen.

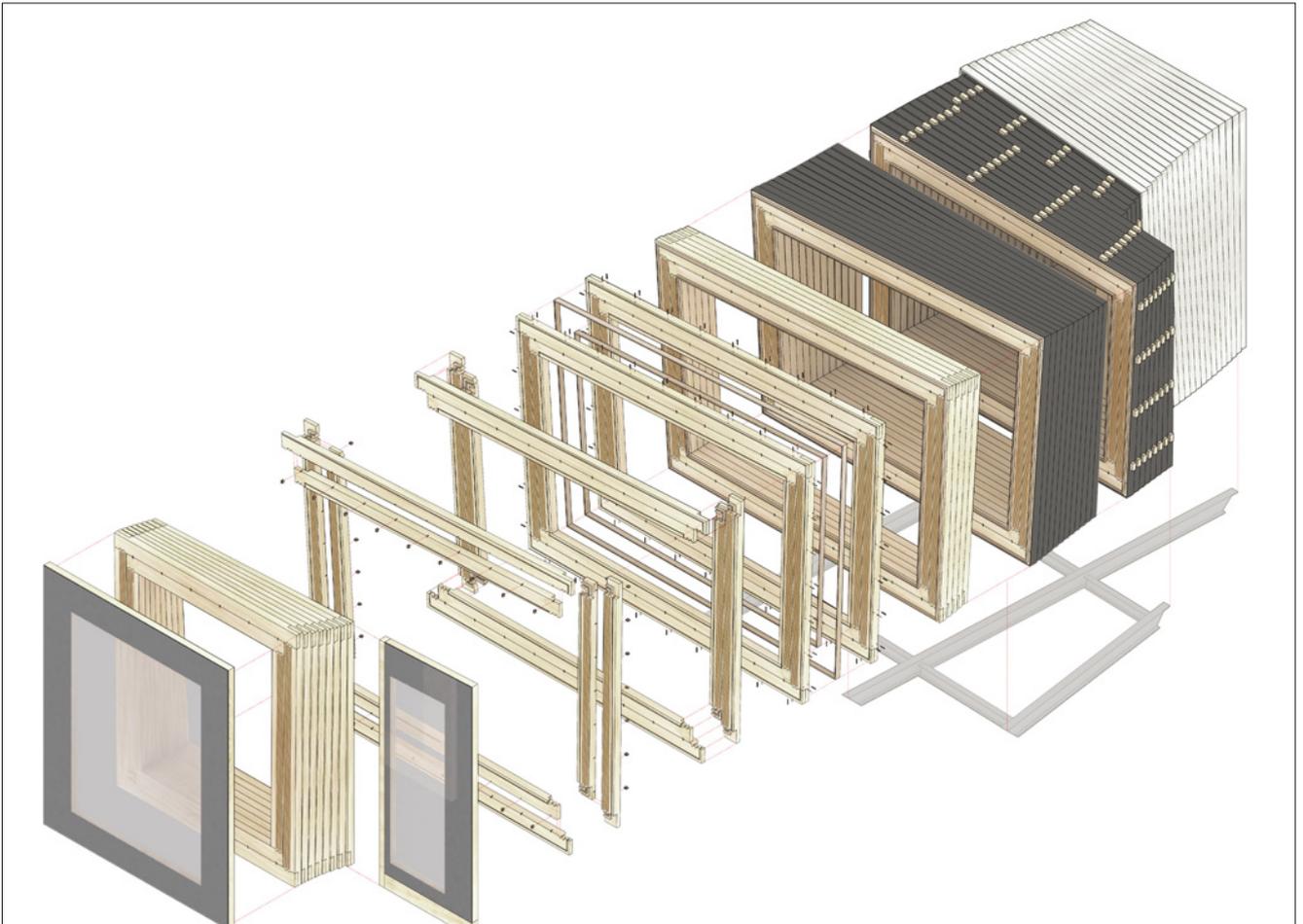


Abb. 24: Die Ausformulierung des Entwurfs und der Konstruktion hängen eng zusammen. Der in AP2 entwickelte Entwurf hat insgesamt zwei primäre Öffnungen, die als einfache Fenster ausgeführt sind, und zwei sekundäre Öffnungen an der Seite des Gebäudes, die als Türelemente ausgeführt sind. Alle Öffnungen wurden zusammen mit Industriepartnern entwickelt und hergestellt.

AP 1.6 Transport

Auch die Transportfähigkeit der Konstruktion spielte bereits zu Beginn des Forschungsprojekts eine wichtige Rolle. Sowohl das Gewicht als auch die zulässigen Transportmaße waren zwei technische Begrenzungen. Die massive Holzkonstruktion kann trotz ihres vergleichsweise geringen Gewichts nur mit Maschinen bewegt und abgesetzt werden. Das relativ leichte Nadelholz hat durch die Schlitzung ein noch geringeres Konstruktionsgewicht von weniger als 400 Kg/m^3 und ist damit eine der leichtesten Massivbauweisen. Allerdings passt das vollständige Demonstratorgebäude nur unterteilt auf einen Lastwagen.

Ein transportfähiges Gebäude, das nicht unterteilt werden müsste, wurde nach den ersten Iterationen im Entwurf nicht weiter verfolgt, da die für den Transport zulässige Breite und Höhe in Verbindung mit der Wandstärke von mindestens 38 cm plus Fassade zu wenig Platz für einen nutzbaren Innenraum lassen würden (Abb. 25 und 26). Hingegen wurde eine Strategie verfolgt, die relativ leichte Gebäudemodule ermöglicht, die einfach verbunden werden können und einen architektonisch hochwertigen Innenraum ermöglichen.

Es erwies sich deshalb als sinnvoll, den in AP2 entworfenen Demonstrator in insgesamt sechs Module zu unterteilen, die ein relativ geringes Eigengewicht von zwei bis vier Tonnen aufweisen und platzsparend transportiert werden können (Abb. 27). Diese können auf einem Tieflader aneinander gereiht werden und von einem relativ kleinen Kran oder Radlader vor Ort versetzt werden (Abb. 28). Die Verbindung zwischen den Modulen ist dabei sehr ähnlich zum Standarddetail. Durch ein inkrementelles Versetzen vor Ort können die Module sehr präzise miteinander verbunden werden. Für den Transport vom herstellenden Industriepartner zum Aufbauort an der neuen IBA Thüringen Geschäftsstelle wurden zwei Tieflader beauftragt.

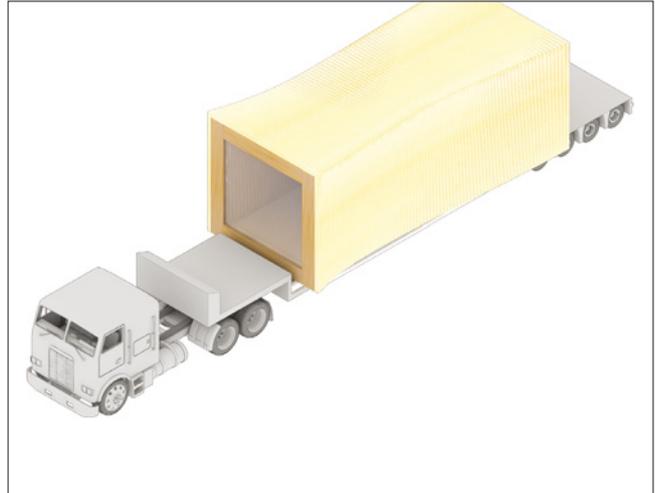


Abb. 25: Die maximale Breite für einen normalen Transport auf einem Tieflader würde die Gebäudebreite zu sehr einschränken.

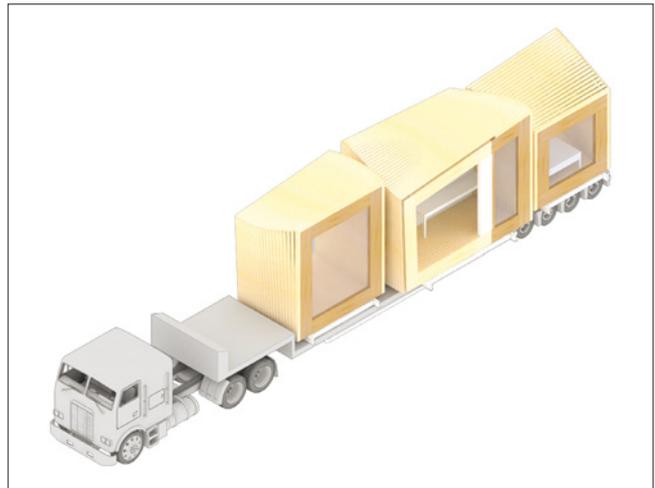


Abb. 26: Ein Gebäude mit breiteren Bereichen als die der maximalen Transportbreite (hier: das vordere Fenster) muss stattdessen in der Länge unterteilt werden.



Abb. 27: Sechs fertige Module für den Demonstrator, in ihrer Aufbaureihenfolge aneinandergereiht. Die Aufteilung richtet sich auch nach den maximalen Lasten für die involvierten Kräne und Gabelstapler, sowie die verfügbaren Lastwagen für den Transport.

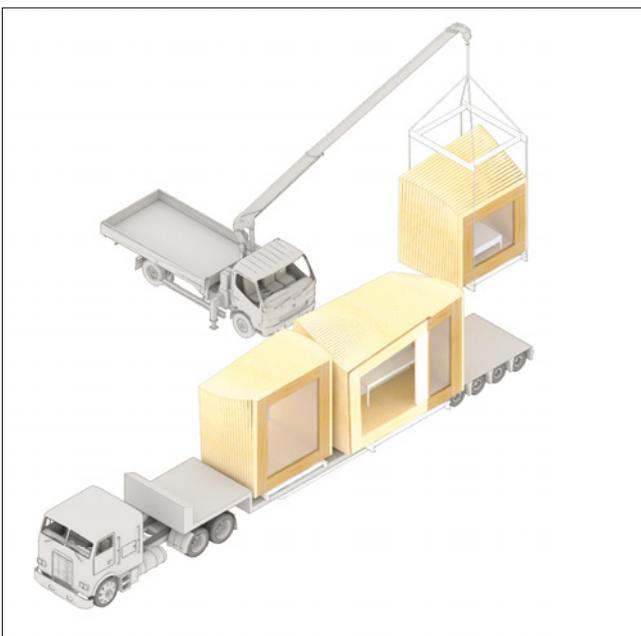


Abb. 28: Konzept und Visualisierung für den Transport und Aufbau der Module. In der Theorie sind die maximalen Maße eines Moduls bei dieser Methode in der Höhe und Länge stark beschränkt, nicht aber in der Breite. Je nach Transportmöglichkeit kann ein Gebäudemodul die Maße eines Schiffcontainers besitzen. Durch die massive Konstruktion ist das Gewicht der Module allerdings entscheidender.

AP 1.7 Fassadenkonstruktion

In Hinblick auf die bauphysikalische Leistungsfähigkeit und Langlebigkeit der Konstruktion wurde eine hinterlüftete Fassade entwickelt, die der Primärkonstruktion in Form und Ästhetik folgt. Durch den erhöhten geometrischen Entwurfsspielraum muss auch die Fassade eine geometrische Flexibilität aufweisen ohne funktionale Nachteile mit sich zu ziehen.

Parallel zur Entwicklung des Konstruktionssystems wurden deshalb verschiedene Fassadenvarianten mit unterschiedlichen Materialien und ästhetischen Qualitäten untersucht. Eine geometrisch einfache und sogleich architektonisch ansprechende Lösung wurde mit vertikalen Holzplanken aus Fichte gefunden. Diese sollen als hinterlüftete Fassade wirken und gleichzeitig die geometrische Logik des Gebäudes widerspiegeln (Abb. 30).

Zu Beginn des Projekts wurden zwei weitere Varianten in Betracht gezogen, die aber aufgrund ihrer geometrischen Komplexität und der Kosten nicht weiter verfolgt wurden. Zum einen wurde untersucht, ob eine transparente Hülle aus gespannter Folie das Gebäude abdecken könnte. In Betracht käme hier eine ETFE Folie, die mit Abstandhaltern entlang der Kanten der Konstruktion als hinterlüftete Fassade dienen würde. Durch die doppelt gekrümmte Fläche, die sich aus der Anordnung der Balken und der daraus resultierenden komplexen Form des Gebäudes ergibt, wäre die Folie in fast allen geometrischen Situationen unter Spannung.

Zum anderen wurde untersucht, individuell zugeschnittene, horizontal verlaufende Fassadenbretter anzubringen (Abb. 29). Diese würden die vertikal verlaufende Konstruktion ignorieren und stattdessen durch ihre horizontal verlaufende Überlappung einen einfachen Wetterschutz bilden. Allerdings müssten die Bretter aufgrund der komplexen Form des Gebäudes individuell mit Hilfe einer CNC Maschine zugeschnitten werden. Zuletzt würde die Fassade aus ästhetischer Sicht einen Kontrast zur Gebäudestruktur bilden, die an sich bereits ausdrucksstark genug ist. Aus diesem Grund wurde auch diese Variante verworfen.

Aufgrund der variablen Geometrie und gegenläufige Kanten in der Primärkonstruktion ist es nicht ohne großen Aufwand möglich die Konstruktion mit einer wasserdichten Holzfassade zu schützen. Deshalb soll direkt auf die Primärkonstruktion eine Fassadenbahn aufgebracht werden, die aufgrund ihrer standardisierte Anwendung einen dauerhaften Witterungsschutz bilden kann (Abb. 31). Hier wurde das Produkt Stamisol verwendet. Die Fassadenbahn lässt sich leicht verschweißen und kann den Versatz und die Winkel zwischen den einzelnen Balkenebenen gut aufnehmen. Die Fassadenbahn ist außerdem das einzige Element in dieser Konstruktion, das nicht aus Holz hergestellt wurde. Die Rückbaubarkeit und Trennung der Materialien ist dennoch gegeben.

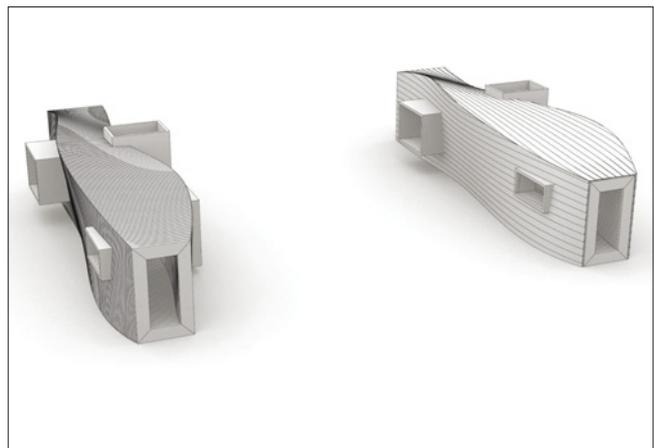


Abb. 29: Vergleich einer vertikalen mit einer horizontalen Fassadenstruktur.

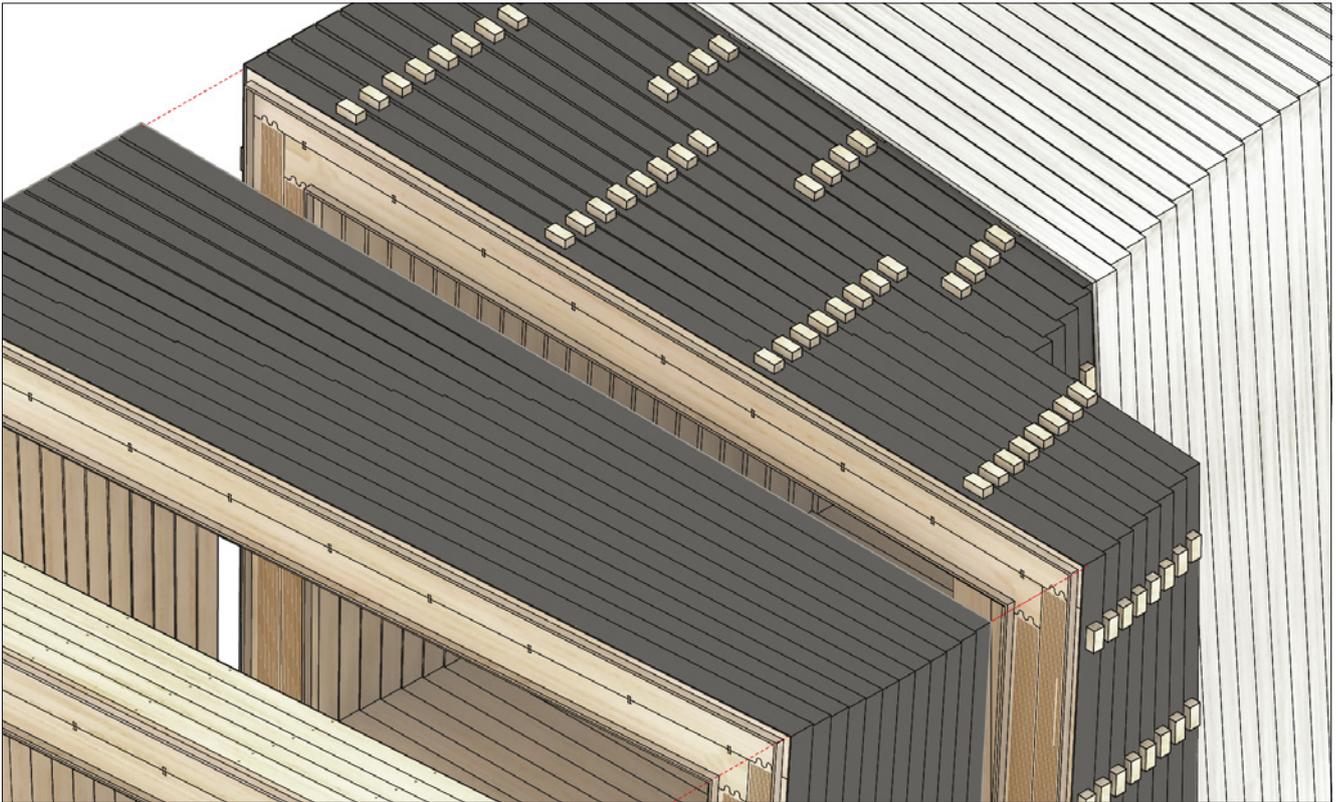


Abb. 30: Fassadenkonstruktion: Die Fassadenplanken werden vertikal und parallel zur Konstruktion aufgebracht. Konterklötze halten sie auf Abstand um für eine Hinterlüftung zu sorgen.



Abb. 31: Die schwarze Dachbahn (links) wird über die versetzten Balken der Primärkonstruktion gestülpt und mit Klammern befestigt. Die Konterklötze werden durch die Fassadenbahn fest verschraubt. Die weiß lasierten Fassadenplanken (rechts) haben 5mm Fugen zueinander und werden anschließend auf die Kötze von außen geschraubt.

AP 2: Entwurf und Planung des Prototypgebäudes

AP 2.1 Digitales Entwurfswerkzeug

Das Forschungsprojekt zeichnet sich durch eine Wechselwirkung zwischen konstruktiven, planerischen, und fertigungstechnischen Aspekten aus. Die Entwicklung von konstruktiven Aspekten ist deshalb in engem Zusammenhang mit einem digitalen Entwurfswerkzeug, das die Generierung von kompletten Gebäudegeometrien erlaubt (Abb. 32). Dabei sind lediglich dreidimensionale Kurven als Input nötig, um architektonisch anspruchsvolle Entwürfe zu generieren .

Anhand der vom Entwerfenden erstellten Kurven werden zunächst die Balkenlagen generiert, sowie der Versatz der einzelnen Lagen auf deren Machbarkeit überprüft. Der maximale Versatz, der zu einer stark gekrümmten Regelfläche führt, liegt bei 40mm. Dieser Platz ist aufgrund der hohen Anzahl an Schlitzern, und der nötigen Materialüberlappung für die Nut und Feder Verbindung definiert. Je nach den Maßen der Vollholzbalken könnte dieser Materialüberstand angepasst werden.

Anschließend werden die Balkenvolumen für eine schnellere Vorschau erzeugt. Daraufhin können alle einzelnen Balken und deren Verbindungsdetails erzeugt werden. Die Geometrie der Verbindungen und der Schlitzte, wie sie auf vielen der Grafiken zu sehen ist, muss dabei theoretisch nicht für die Fertigung generiert werden. Stattdessen werden die Maschinendaten aus dem geometrischen Zusammenhang zwischen den Balkenebenen direkt erzeugt und exportiert. Dafür nötig sind nur die Angabe von Winkel und der Versatz der Balken. Für eine visuelle Kontrolle wurde diese detaillierte Geometriegenerierung dennoch durchgeführt.

Im Speziellen unterteilt sich dieser Vorgang im digitalen Werkzeug in folgende Schritte:

1. **Randkurven:** Als Entwurfswerkzeug dienen Randkurven, die repräsentativ für die Kanten des Gebäudes dienen. Das Entwurfswerkzeug teilt dem Entwerfenden während des Entwerfens mit, ob sich die Krümmung der Kurven und die Position dieser zueinander noch im Rahmen des Möglichen befindet. Die Anzahl der Kurven bestimmt dabei die Anzahl der Kanten des Gebäudes und somit auch die Anzahl der Eckverbindungen und der Balken. Ein Gebäude kann deshalb aus mindestens vier Kurven, also vier Seiten, bestehen.
2. **Unterteilung:** In einem ersten Schritt, aber auch als Feedback und schnelle Visualisierung, werden die Randkurven in Balkenebenen unterteilt. Dabei wird schnell ersichtlich inwiefern die Balken sich überlappen, und wie viele Balkenebenen für den Entwurf nötig sind. Um die Balkenebenen zu erzeugen werden die Randkurven mit vertikalen Ebenen mit einem Abstand der Balkendicke verschnitten. Die sich daraus ergebenden Punkte entlang der Kurven werden anschließend miteinander verbunden.
3. **Balkengeometrien:** Die Unterteilung der Randkurven bildet die Basis für die Balkengeometrie. Die resultierenden Linien werden in der Dimension der Balken zu Volumenkörpern umgewandelt (100 x 200 mm im Schnitt). Standardmäßig wird eine Wand automatische in zwei Balkenebenen unterteilt.
4. **Verbindungen:** Entlang der Schnittstellen zwischen zwei Balken werden die Positionen der Verbindungen generiert. Dazu wird die Länge eines jeden Balkens ausgelesen und mit einem Mindestabstand unterteilt. So werden die Schwalbenschwanzverbindungen sowie die Nut- und Federverbindung entlang der Balkenränder angebracht. Die verzahnte Blattung wird an der Überschneidung zweier Balken derselben Ebene generiert. Der Winkel zwischen den Balken bestimmt dabei die Schnittfläche und schlussendlich die Geometrie der Verzahnung.

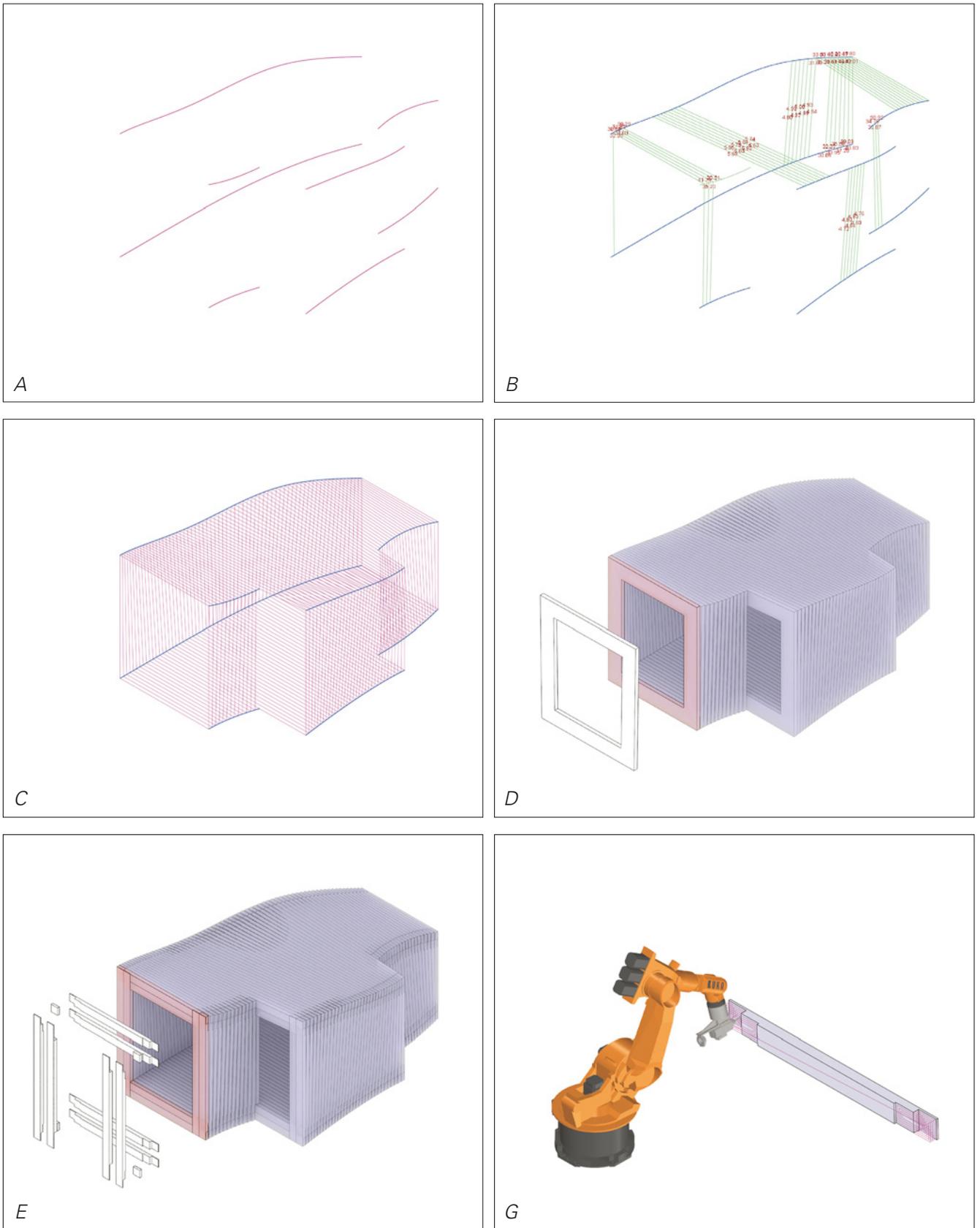


Abb. 32: Das digitale Entwurfswerkzeug generiert in einem automatisierten Prozess alle Bauteile und Maschinendaten basierend auf den vom Entwerfer gestalteten Kurven im Bild oben links.

5. Schlitz: Die Balkenlänge und die Eckverbindungen bestimmen die verbleibende Länge der Schlitz. Diese werden nach den vorher definierten Vorgaben zu Materialabstand generiert.
6. Fertigungsdaten: Anhand der Balkengeometrie und der Position der Verbindungen werden wie bereits beschrieben die Fertigungsdaten in Form von Kurven erzeugt. Diese werden als eine Datei pro Balken exportiert und an die Schreinerei übergeben.
7. Fassadenkonstruktion: Um die Materialmengen der Fassade zu bestimmen, erzeugt das digitale Werkzeug zusätzlich die Positionen der Abstandsklötze und der Bretter der hinterlüfteten Fassade. Die Materialdicken werden zuvor eingegeben und bestimmen den Abstand der Fassadenbretter.

Für diese Entwicklung war es essentiell mit Industriepartnern in Kontakt zu treten, um die Konstruktion in Relation zu fertigungstechnischen Einschränkungen regelmäßig zu evaluieren. Zwar wurden im Labor des ICD bereits mehrere kleine Prototypen gebaut (Abb. 33 und 34), jedoch verfügt der dort benutzte Industrieroboter über einen anderen Arbeitsraum und benutzt andere Maschinendaten als übliche CNC Maschinen mit heutigem Stand der Technik. Die Fertigung des Demonstrators wurde deshalb schon in einer frühen Phase in enger Zusammenarbeit mit einem Schreinerunternehmen entwickelt. In diesem speziellen Szenario sind die maximalen Balkenmaße auch von der verwendeten CNC Maschine abhängig.

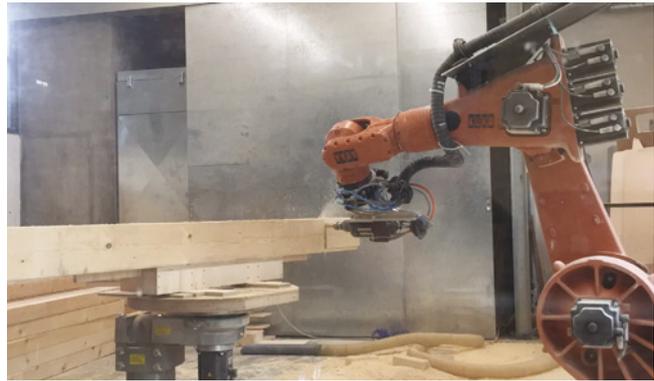


Abb. 33: Robotische Fertigung von Prototypen im institutseigenen Labor.



Abb. 34: Zusammenbau eines ersten Prototypen, der einen vollen Rahmen ausbildet.

AP 2.2 Architektonisches Konzept / Kontext

Die Internationale Bauausstellung (IBA) in Thüringen hat als Projektpartner eine neue Geschäftsstelle in Apolda geplant. Als Gebäude wurde die historische Fabrik des Architekten Egon Eiermann gefunden. An der Rückseite dieses architektonisch äußerst wertvollen Gebäudes befindet sich eine unbebaute und wilde Grünfläche mit landschaftlichen Qualitäten im Übergang zu Gärten der Nachbargebäude und einer Kleingartenanlage. Der Demonstrator des Forschungsprojekts soll auf der leicht ansteigenden freien Fläche als architektonische Inszenierung des landschaftlichen Kontexts eingesetzt werden. Diese Inszenierung reflektiert die Aufgabenstellung der IBA Thüringen "Stadt-Land": In dem landschaftlich geprägten und kleinteilig besiedelten Bundesland Thüringen ist Architektur immer im Spannungsfeld zu dem landschaftlichen Kontext zu denken. Der Demonstrator soll im Anschluss zum Aufbau in Apolda nach ungefähr zwei Jahren als touristische Infrastruktur (dezentrales Mikro-Hotel) im Thüringer Wald zum Einsatz kommen. Die genaue Planung steht dafür noch aus.

Die IBATHüringen befindet sich an der Schnittstelle zwischen Stadt und Land. Der Demonstrator ist darauf ausgelegt diese Schnittstelle zu untersuchen. Der weltweite Urbanisierungsprozess bestimmte lange Zeit den Architektur- und Stadtdiskurs. Im Zusammenhang mit den Debatten um Nachhaltigkeit, schrumpfende Städte und alternative Praktiken lohnt es, sich erneut der dialektischen Beziehung zwischen Stadt und Land zuzuwenden, die von Beginn an den Stadtdiskurs der Moderne mit dessen sozialreformerischer Tendenz bestimmt hat. Die Suche nach einem neuen Stadt-Land-Verhältnis ist somit als Indikator für die damit verbundenen gesellschaftlichen Fragestellungen zu verstehen. Doch welche Abhängigkeiten oder Angleichungen der scheinbar separierten und doch unzertrennlichen Lebenswelten von Stadt und Land existieren heute, wo sind Unterschiede festzustellen? Welche Bedeutung hat es, dass weltweit ein erneutes Interesse an ländlichen Räumen festzustellen ist? Und inwiefern kann Stadtland als konzeptionelle Folie für neue Gestaltungsmöglichkeiten dienen? Als urbanes Minihaus auf der Wiese

soll der Demonstrator diese Fragestellungen erörtern und die Besucher dazu anregen über Mobilität und urbanes Wohnen nachzudenken.

Das architektonische Konzept ist stark von den technischen und logistischen Anforderungen geprägt. Zunächst müssen die Maße des Prototypengebäudes den Anforderungen der Nutzung genügen. Der Demonstrator wird deshalb in Module unterteilt, die es erlauben, zwischen verschiedenen Aufbauorten auf einem LKW transportiert zu werden. Da die Module in ihrer Länge auf einem LKW transportiert werden, entsteht ein relativ großer Entwurfsspielraum (Abb. 35). Innerhalb dieses Volumens soll ein Baukörper gebildet werden, der gestattet, einen Freiraum in die Komposition des Gebäudes einzubinden, so dass Innen- und Außenräume durch die Setzung des Baukörpers definiert werden. Hier spielen deshalb auch die Öffnungen des Gebäudes eine wichtige Rolle. Obwohl die Konstruktion an sich massiv und geschlossen erscheint, soll sie in einer Achse möglichst offen und durchlässig erscheinen. Im Entwurfsprozess haben sich die Projektpartner deshalb auf ein kompaktes Gebäude geeinigt, das an beiden Enden große Öffnungen aufweist und durch seitliche Kiemen eine Eingangssituation und zusätzliche architektonische Elemente integriert (Abb. 36).

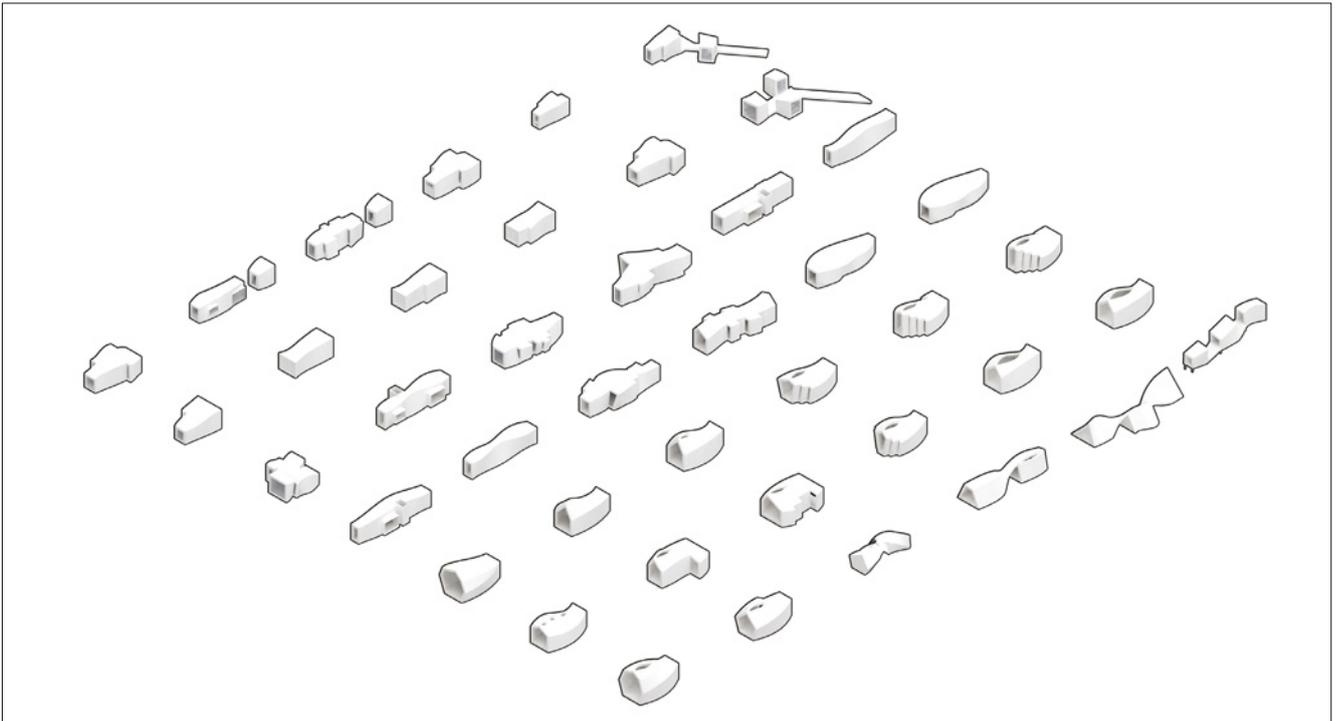


Abb. 35: Das digitale Entwurfswerkzeug weist einen erheblichen Entwurfsspielraum auf und wurde im Verlauf des Forschungsprojekts auch analytisch genutzt, um architektonische Artikulationsmöglichkeiten zu untersuchen. Abgesehen von Transport- und Materialmaßen ist die größte Einschränkung durch den maximalen lateralen Versatz zwischen den einzelnen Balkenebenen, wodurch die Regelflächen erzeugt werden, gegeben.

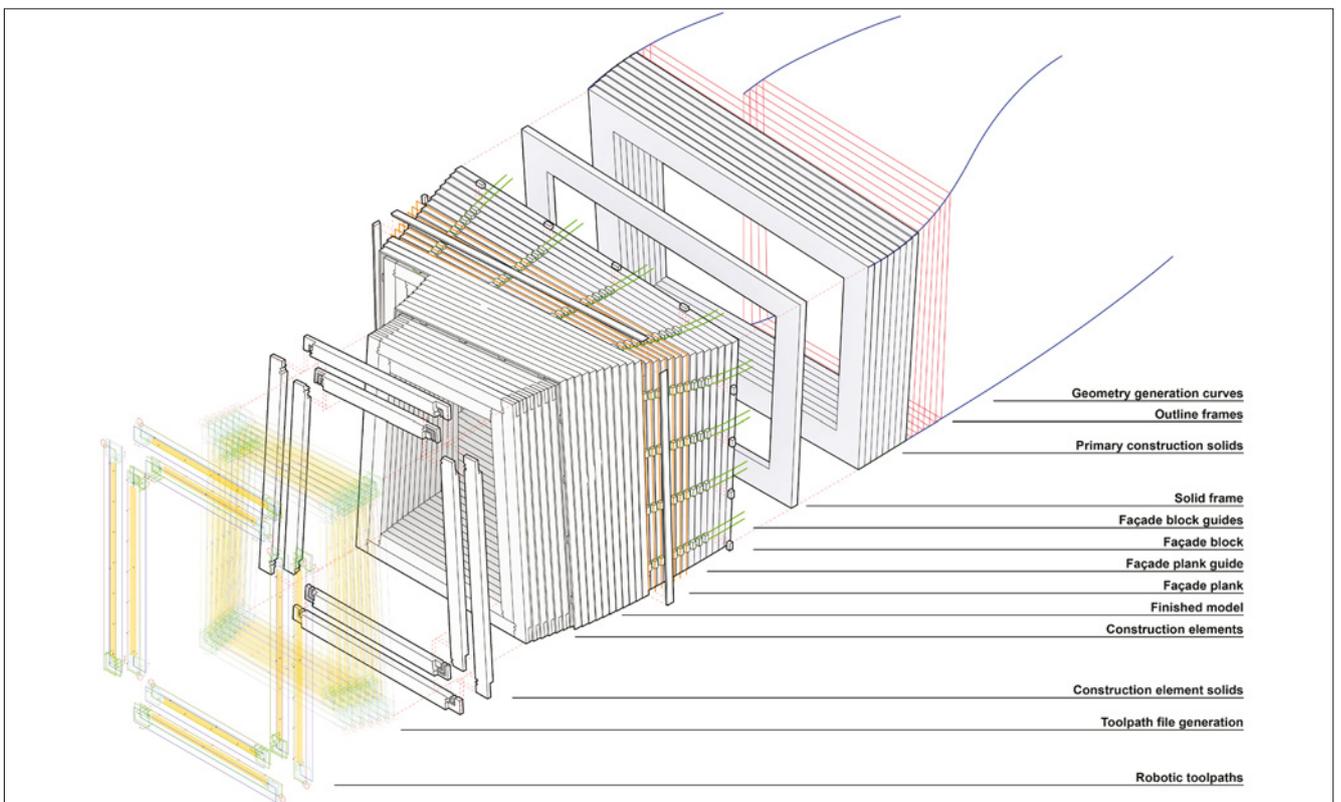


Abb. 36: Detaillierte, grafische Beschreibung des Entwurfswerkzeugs. Die einzelnen parametrischen Arbeitsschritte laufen von oben nach unten ab, und generieren sowohl Geometrie als auch CNC-Werkzeug-Pfade.

Hintergrund

Der Typus "Mikroarchitektur" erlebt z.Z. eine starke Nachfrage. Architektur im kleinen Maßstab ist in besonderer Weise geeignet experimentelle Ansätze mit einem vertretbaren Ressourceneinsatz praxisnah zu evaluieren. Hier steht sowohl die wissenschaftliche Zielstellung und Innovation im Vordergrund als auch der Entwicklungsimpuls für Entwicklungen vor Ort. Die IBA Thüringen setzt diese Strategie von temporären Lösungen und Interventionen in diese Dimension bewusst ein, um brachgefallene Standorte zu aktivieren und die Qualität zukünftiger Prozesse über diesen Impuls positiv zu beeinflussen. Als ein Folgeprozess ist bspw. hier das Projekt "XS: neue ferienhäuser - modellhaft bauen" hervorgegangen das mit einem internationalen Wettbewerb (Veröffentlichung Anfang Juli 2018) nach vergleichbaren Lösungen sucht und diese an zwei konkreten Standorten an der Bleilochtalesperre in Thüringen mit privaten Investoren und Betreibern realisieren möchte.

Modellprojekte (Prototypen) sind das Kernformat jeder Internationalen Bauausstellung. Nicht nur das physische Ergebnis im Maßstab 1:1 bildet die Zielstellung ab, sondern insbesondere auch der Prozess der Entwicklung und die Einbindung relevanter Partner. Angewandte Forschung wird so konkret und im direkten Dialog mit fachlich relevanten Partner gelebt. Konkret sind bei diesem Projekt - neben klassischen Dienstleistern - folgende Partner eingebunden worden.

Thüringen Forst:

Thüringen Forst als Teil des Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft hat bereits zu Beginn des Projekts seine Unterstützung zugesagt. Der intelligente und innovative Einsatz der regionalen Ressource Holz ist für Thüringen Forst von strategischer Bedeutung, um neue Absatzmärkte zu erschließen. Durch Thüringen Forst wurde die Stammware im Rahmen eines Sponsoring Vertrags kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Fa. Rettenmeier:

Die Fa. Rettenmeier ist einer der größten Konstruktions-Vollholz-Hersteller in der Region und ein wichtiger Abnehmer bei Thüringen Forst. In Kooperation mit Thüringen Forst wurde ebenfalls im Rahmen eines Sponsorings ein Großteil der KVH-Profile (10x20cm) zur Verfügung gestellt.

Holz von Hier gGmbH:

Mit Holz von Hier wurde eine Vereinbarung getroffen, dass das Gebäude mit dem "Holz von Hier" Zertifikat ausgestattet wird. Hintergrund ist, dass der grundlegend ökologische Baustoff Holz den Vorteil der Einspeicherung des CO₂ im Material in der Ökobilanz verliert, wenn die Transportwege gewisse Distanzen überschreiten. Da ein Großteil des verbauten Holzes nach rein wirtschaftlichen Kriterien am globalen Markt beschafft wird, ist dieser grundlegend positive Effekt in Frage gestellt. Holz von Hier bietet hierbei ein Zertifikat an, das Vergabekonform einen regionalen Kreislauf und damit eine positive Ökobilanz sicherstellt.

„Holz von Hier“ ist ein Umweltzeichen ISO Typ I ähnlich gemäß ISO 14024. „Holz von Hier“ ist ein Herkunftsnachweis, der bezogen auf das Produkt nachvollziehbar die Stoffströme entlang der gesamten Verarbeitungskette bis zum Produkt erfasst und dokumentiert. Es ist das einzige Umweltlabel, welches die tatsächlichen Transporte und die damit verbundenen Umweltwirkungen erfasst und quantifiziert. „Holz von Hier“ hat unabhängig von einer bestimmten geografischen Region Gültigkeit. Erfasst wird die Transportentfernung in der Produktionskette an sich und nicht die Zugehörigkeit zu einer regionalen Gruppierung oder Verwaltungseinheit. „Holz von Hier“ ist ein Herkunftsnachweis für das Produkt und nicht den Betrieb. Das heißt, ein Betrieb der ein bestimmtes Produkt unter „Holz von Hier“ vermarktet, kann andere Produkte in seinem Sortiment führen die kein „Holz von Hier“ enthalten. Diese können allerdings nicht unter „Holz von Hier“ vermarktet werden.

Produkte, die mit einem Nachweis nach Holz von Hier ausgezeichnet wurden, erfüllen folgende Kriterien:

- Das Holz im Produkt hat überdurchschnittlich kurze Transportwege vom Wald über alle Verarbeitungsschritte der gesamten Stoffstromkette bis zum fertigen Produkt zurückgelegt (Transportentfernungen) und ist damit besonders klima- und umweltfreundlich. Die Umweltwirkungen konkreter gekennzeichnete Holzprodukte ist seit Herbst 2016 in Form eines Umweltfootprint mit den klassischen Umweltbilanzdaten erhältlich. Diese Daten können auch mit Holzprodukten anderer Herkünfte bzw. anderen Baustoffen verglichen werden.
- Das gesamte Holz muss aus nachweislich nachhaltiger Forstwirtschaft stammen. Das gesamte Holz muss aus legalen Quellen stammen.
- Es darf kein Holz aus Urwäldern (borealen und tropischen Primärwäldern) verwendet werden – zum Schutz von Klima und Artenvielfalt.
- Es darf kein Holz international gefährdeter Baumarten (nach der internationalen Roten Liste von IUCN) verwendet werden – zum Schutz der Biodiversität.

hierfür die Grundlage. Ein Innovationsfeld das beispielsweise im Bereich des Möbelbaus bereits zur Marktreife geführt hat (z.B. www.opendesk.cc) und auch im Gebäudemaßstab denkbar ist. Hierdurch werden z.B. auch im ländlichen Raum Unternehmenskonzepte gestützt.

Regionale Ressourcen und Innovation

Think Global / Act Local: Die Möglichkeiten der Digitalisierung in der Planung und Fertigung eröffnen vollständig neue Perspektiven auch für traditionelle, regionale Baustoffe. Damit stiftet das Projekt ein Innovationsfeld, dass für die IBA Thüringen von hoher Bedeutung ist. Der zunehmenden Industrialisierung und Zentralisierung der Bauindustrie kann durch neue, offene Tools ein Gegenimpuls hinzugefügt werden. Somit können auch Kleinere und mittlere Unternehmen der Bauwirtschaft auf hohem technischen Niveau konkurrenzfähige Produkte entwickeln. Intelligente, offene Planungsbausätze in Kombination mit leistungsfähigen CNC / Robotiksystemen bilden

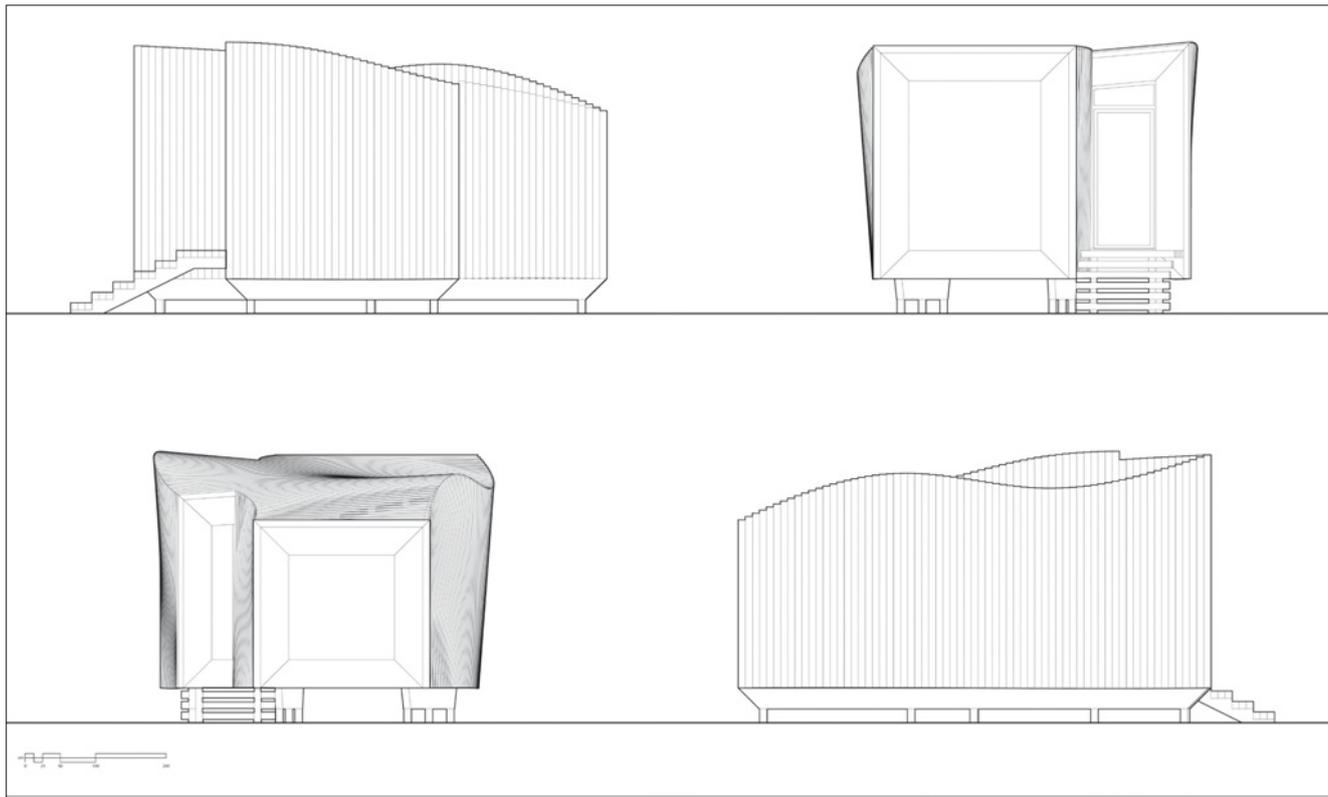


Abb. 37: Ansichten des fertigen Entwurfs für den Demonstrator. Während die großen Fenster an den Enden des Gebäudes Rechtecke ausbilden, sind alle anderen Balken in einem anderen Winkel verbunden.

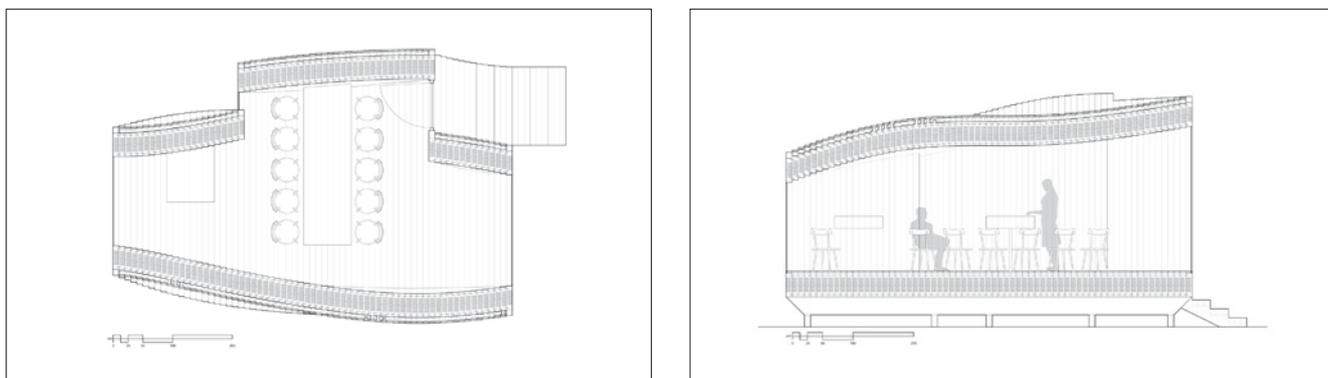


Abb. 38: Grundriss und Schnitt einer alternativen Raumnutzung für Besprechungen. Die Möbel sind nicht Teil der Forschungsarbeit, sondern dienen hier lediglich zur Einschätzung der möglichen Nutzung.

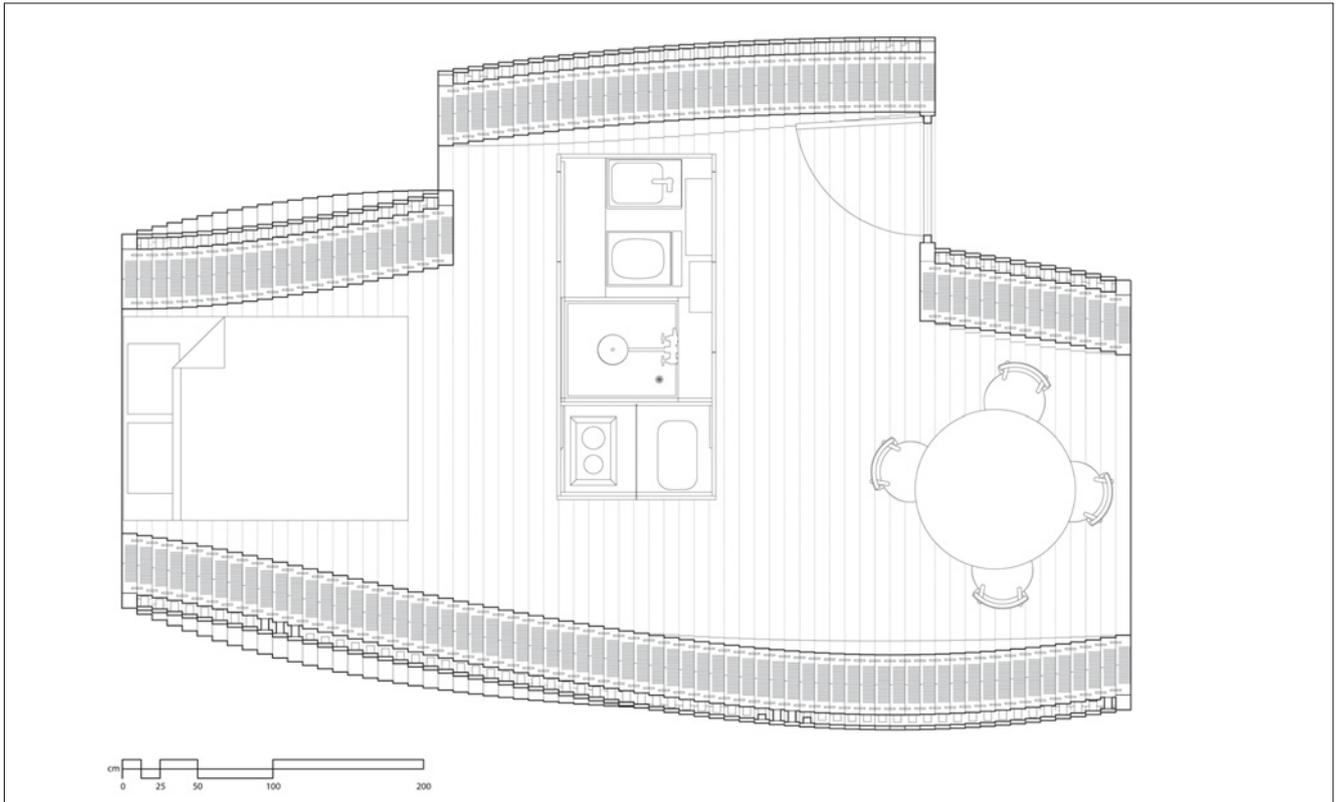


Abb. 39: Grundriss des fertigen Entwurfs für den Demonstrator mit einer beispielhaften Ausstattung. Länge und Breite des Gebäudes wurden durch die Kosten für Material und Fertigung beschränkt. Mit 16qm Nutzfläche findet die Nutzung "Micro Living" genug Platz.

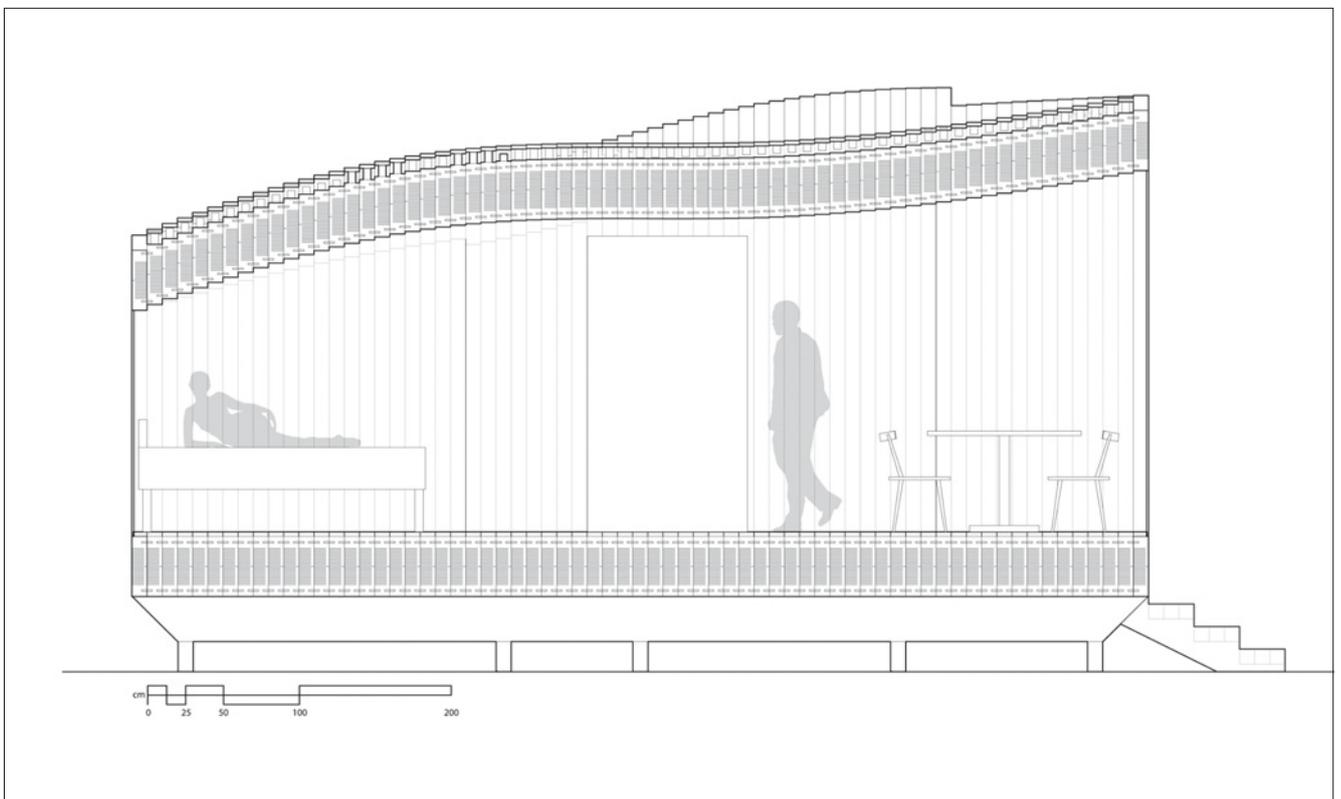


Abb. 40: Längsschnitt durch den fertigen Entwurf für den Demonstrator mit einer beispielhaften Ausstattung. Die Raumhöhe ist vorwiegend durch die maximale Transporthöhe begrenzt.

AP 2.3 Technischer Gebäudeausbau und Innenausbau

Die Integration des technischen Ausbaus der Gebäude stellt eine zunehmende Herausforderung an die Architektur dar. Es wurden im Verlauf des Arbeitspakets verschiedene Konzepte untersucht, wie mit der Gebäudetechnik im Demonstrator umgegangen werden kann. Es ist für das Forschungsprojekt von Bedeutung, einen ganzheitlichen Ansatz zu finden. Im Rahmen der Internationalen Bauausstellung IBA Thüringen soll die Gebäudetechnik innerhalb einer minimalen Box funktionsfähig integriert werden, die einen Kontrast zur Mono-Material-Konstruktion der Primärstruktur darstellt. Die dafür entwickelte Bad-Box, die alle sanitären Funktionen beinhaltet, kann zu einem späteren Zeitpunkt in den Demonstrator integriert werden (Abb. 26 und 27). Die verbleibende Innenausstattung soll auch in Relation zur Konstruktion entwickelt werden. Hier wird eine minimale Lösung angestrebt, die im Nachgang zum Forschungsprojekt noch ausgeführt werden soll.

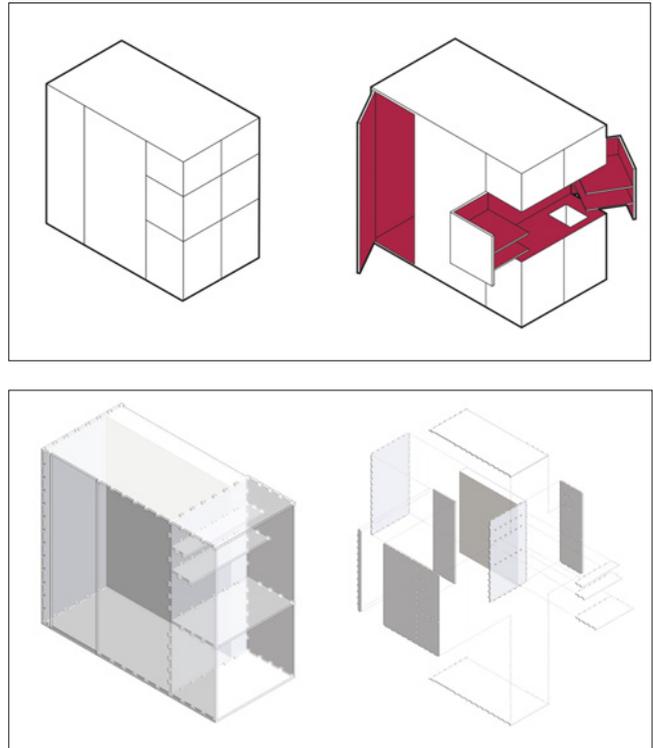


Abb. 26: Eine Bad-Box mit allen nötigen elektrischen und sanitären Anschlüssen soll im Demonstrator Platz finden. Eine Ausstattung mit Spiegeln soll den Raum im Demonstrator groß wirken lassen.



Abb. 27: Visualisierung der verspiegelten Bad-Box und des Interieurs. Zum Zeitpunkt des Abschlussberichts ist das Demonstratorgebäude noch nicht abgeschlossen.

AP 3: Ausführung und Bau des Prototypgebäudes

AP 3.1 Produktion

Die Ausführung und der Bau des Demonstrators ist in der angewandten Forschung der wichtigste Schritt für der Konkretisierung der Planungs- und Fertigungstechnologie, die im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekts praxisnah untersucht werden soll. Im August 2017 wurden finale Entwürfe und Detailsentscheidungen getroffen, um die Produktion des Demonstrators zu beginnen. Bei der Ausführung wurde auch aus architektonischer Sicht schnell klar, dass das Bausystem im baulichen Maßstab durch seine geometrische Komplexität eine besondere Wirkung aufweist. Es konnte aber auch festgestellt werden, dass massives Konstruktionsvollholz für die hohen Anforderungen an eine präzise Fertigung ungeeignet ist. Das leicht verformte Rohmaterial hatte zur Folge, dass der subtraktive Fertigungsprozess wesentlich länger als ursprünglich antizipiert dauerte. Im Schnitt dauerte die Fertigung vom angelieferten Material bis zum fertigen Balken 20 bis 30 Minuten, abhängig von der Länge. Diese Zahl könnte in einem weiteren Entwicklungsschritt mit einer generellen Überarbeitung des Produktionsablaufs und der Verwendung von Duobalken anstatt KVH auf die Hälfte reduziert werden. Aufgrund des begrenzten Budgets wurde davon jedoch in diesem Forschungsprojekts abgesehen.

Der Zusammenbau erfolgte in der Werkstatt liegend (Abb. 28) und war generell wesentlich schneller als die Fertigung der Balken. Untrainierte Arbeitskräfte konnten 32 Balken pro Stunde verbauen. Eine einzelne erfahrene Arbeitskraft konnte 16 Balken pro Stunde zusammenbauen, was einem Baufortschritt von 20cm Gebäude pro Stunde entspricht. Auf eine einzelne Wand umgerechnet sind dies 80cm, oder ca. 3qm pro Stunde. Pro Balken werden 2 bis 4 Minuten pro Arbeitskraft gebraucht. Die Balken wurden liegend zu einem Modul, bzw. einen Abschnitt des Gebäudes zusammengesetzt. Um die Luftdichtigkeit auch trotz eventuell anfallender Toleranzen zwischen den Balken zu gewährleisten werden Stoffbah-

nen zwischen jede Balkenebene gelegt. Die Module werden anschließend für das Anbringen der Dachbahn und der Fassade aufgestellt (Abb. 29). Das Vermessen der Module ergab eine generelle Maßhaltigkeitsabweichung von 10 mm pro 1000 mm Gebäudelänge. Dies ist allerdings nicht auf Toleranzen bei der CNC Bearbeitung, sondern beim Fügen der Balken zurückzuführen. Da die Gebäudemodule liegend gefügt werden, sorgt zunächst nur das Eigengewicht für eine lückenfreie Verbindung zwischen den Balkenebenen. Nach der vollständigen Assemblierung eines Gebäudemoduls wurde deshalb vor dem Einbringen von Dübeln in die Nut- und Federverbindung mechanisch Druck auf die Assemblierung ausgeübt um mögliche Spalte zwischen den Balkenebenen zu schließen. Anschließend wurden die Nut- und Feder-Verbindungen mit Holzdübeln, bzw. Holznägel permanent verbunden. Dazu wurden gegen Ende der Fertigungszeit "LignoLoc" Holznägel verwendet. Zwischen den einzelnen Gebäudemodulen wurde diese Nut- und Feder-Verbindung offen gelassen, um sie später vor Ort zu fügen.

Da der Unterschied zwischen Maschinenzeit und Zusammenbau so groß ist, ist das Optimierungspotential vor allem beim Fräsen der Balken zu sehen. Aufgrund der Beschaffenheit der von der Firma Rettenmeier bereitgestellten Konstruktionsvollholz Balken mussten diese zunächst auf allen vier Seiten plangefräst werden. Die Verwendung von Material mit höherer Qualität hätte dies verhindern können, war aber im Zuge des prototypischen Prozesses und des begrenzten Budgets nicht möglich. Eine Rückkopplung zwischen Maschine und Material hat hier nur kaum stattfinden können, da beides durch die jeweiligen kooperierenden Firmen vorgegeben war.

Die eigentliche CNC-Bearbeitung, bei der die Balken auf weniger als einen Millimeter genau bearbeitet wurden, war wesentlich kürzer. Ohne das vorherige planfräsen hätte die Bearbeitung nur 10 Minuten betragen. Zusätzlich könnten die Schlitzungen mit einem speziellen Werkzeug in Zukunft in wesentlich kürzerer Zeit ausgeführt werden. Hierzu muss ein sogenanntes Sägeaggregat, das parallel angeordnete Sägeblätter besitzt, verwendet werden.

AP 3.2 Montage

Die insgesamt 464 individuelle Balken wurden wegen anfänglicher Schwierigkeit und einer langsamen Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit innerhalb von acht Wochen auf der zur Verfügung gestellten Fünf-Achs-CNC Maschine gefräst und zu sechs Modulen zusammengebaut. Diese Module wurden auf zwei Tiefladern innerhalb eines Tages zum Aufbauort transportiert, und innerhalb von zwei Tagen zu einem kompletten Gebäude zusammengebaut. Als Unterkonstruktion wurde ein Rahmen aus Stahlprofilen vorgefertigt, der wiederum auf Schraubfundamenten ruht (Abb. 31). Es wurde ein Teleskopstapler verwendet, um die Module auf diesem Rahmen aneinander zu reihen. Die Module wurden mit Hilfe des Teleskopstaplers und von Spanngurten zusammengezogen. Aufgrund der unerwartet hohen Reibung zwischen Stahlgerüst

und Gebäudemodulen hat dies am meisten Zeit beansprucht. Da auch hier eine sehr hohe Genauigkeit nötig ist, könnte die Montagezeit durch ein Schienensystem auf dem Stahlrahmen, oder durch die Verwendung eines Autokran verkürzt werden.

Es ist in diesem Montageprozess eine besondere Herausforderung, die Luftdichtigkeit, die bei der Vorfertigung in der Montagehalle erreicht wird, auch zwischen den Modulen sicherzustellen. Da die Nut- und Federverbindung die Module beim Verbinden nicht von selbst zusammenzieht, musste dies auf der Baustelle mit den erwähnten Hilfsmitteln erreicht werden. Die Nut- und Federverbindung war für diesen Einsatz nicht ausgelegt. Um ein automatisches Zusammenziehen der Balken beim Verbinden sicherzustellen müsste die Verbindung zwischen den Modulen gesondert betrachtet werden.



Abb. 28: Die einzelnen Module werden liegend zusammengebaut, um einen engen Verbund der Balken zu erleichtern. Zwischen den Balkenlagen werden Stoffe eingelegt, um die Luftdichtigkeit zu erhöhen.



Abb. 29 und 30: Blick durch fertige Module, die nach der Vorfertigung aufgestellt wurden. Die komplexen Regelflächen an den Wänden und der Decke sind hier bereits sichtbar.



Abb. 31: Aufbau eines mit Schraubfundamenten befestigten Stahlrahmens als Unterkonstruktion.



Abb. 32: Anlieferung der ersten vier Module auf einem Tieflader.



Abb. 33: Aufbau der Module vor Ort. Die Orientierung wird genau überprüft.



Abb. 34: Jedes Module wird mit einem Radlader auf dem Stahlrahmen abgesetzt.



Abb. 35: Die einzelnen Module haben ein Gewicht von drei bis vier Tonnen.



Abb. 36: Der Aufbau dauerte zwei Tage.

3. Fazit

Als eines der ersten voll parametrisch entworfenen und digital hergestellten Gebäude mit einer Vollholzkonstruktion stellt das Projekt einen wichtigen Schritt für die moderne Architekturforschung dar. Vor allem die praxisnahe Evaluation der Entwurfs- und Fertigungsmethodik hat eine Reihe von wichtigen Erkenntnissen zur Folge. Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, dass Mono-Material-Konstruktionen durch intelligente Entwurfprozesse und eine digitalisierte Fertigung effizient herstellbar sind und einen wesentlich höheren architektonischen Entwurfsspielraum erlauben.

Die für das Demonstratorgebäude benötigte hohe Genauigkeit hatte zunächst noch einen wesentlich höheren Fertigungsaufwand zur Folge. Dieser Unterschied könnte in einem weiteren Entwicklungsschritt mit einer generellen Überarbeitung des Produktionsablaufs stark reduziert werden. Das Forschungsprojekt kann insofern als ersten Schritt für die Entwicklung eines neuen Bausystems angesehen werden.

4. Weiteres Vorgehen

Der Demonstrator wurde im November 2017 unter Absprache und mit Hilfe der IBA Thüringen in Apolda aufgebaut. Für die Fenster wird eine Kooperation mit einem lokalen Fensterbauer angestrebt, sodass das Gebäude im Frühjahr 2018 abgeschlossen werden kann. Zum Zeitpunkt des Abschlussberichts wurde ein Fensterbauer gefunden. Die Planung und Fertigung der Fenster steht allerdings noch aus. Im Anschluss ist ein Blower-Door-Test des gesamten Gebäudes angestrebt, um die bauphysikalischen Werte mit denen aus den Labortests zu vergleichen.

Anschließend soll der Entwicklungs-, Entwurfs-, Fertigungs- und Aufbauprozess in Form eines Pressepakets mit Bildern und Videos veröffentlicht werden. Vergangene Forschungs- und Bauprojekte der Projektpartner wurden nach höchsten Standards dokumentiert und veröffentlicht. Es ist das Anliegen der Projektpartner die Ergebnisse professionell in Foto und Video zu dokumentieren, und in Architektur-, Ingenieurs-, und Holzbaumagazinen zu veröffentlichen. Die Erfahrung hat dabei gezeigt, dass ein Gebäude als Demonstrator vor allem aufgrund der architektonischen Qualitäten ein breites Publikum ansprechen kann, und dadurch die gewonnenen technischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse besonders gut disseminiert.

Es sind ebenfalls weitere wissenschaftliche Publikationen geplant, die die Forschungsergebnisse mit Fokus auf das Konstruktionssystem, die digitale Fertigung, oder den computerbasierten Entwurfsprozess detailliert darstellen. Weitere Publikationen in Fachmagazinen sollen sicherstellen, dass der gesamte Prozess für Planer und Bauherren verständlich wird und die Machbarkeit auch in einem anderen Kontext hervorgehoben wird.

5. Publikationen

Wissenschaftliche Publikationen

- Drexler, H., Bucklin, O., Rohr, A., Krieg, O., Menges, A.: 2017, Timber Prototype: High Performance Solid Timber Constructions. In Auer, T., Schneider, J., Knaack, U. (eds.): PowerSkin Conference 2017 Proceedings, München.
- "Development of an Insulating Solid Timber Construction System through Computational Design and Digital Fabrication Methods" (geplante Publikation im Rahmen der ACADIA 2018 Konferenz)

Veröffentlichungen

- Menges, A., Krieg, O., Drexler, H.: 2017, Holzarchitektur Neu Denken, in Arch+ Sonderausgabe zur IBA Thüringen, Arch+ Verlag GmbH, Aachen. (to be published)

Akademische Auswirkung und Verbreitung

- Im Verlauf des Forschungsprojekts wurden studentische Hilfskräfte beider Universitäten mit dem Forschungsbereich vertraut gemacht (Leonard Balas)
- Resultate des Forschungsprojekts werden in Vorträgen und Präsentationen der beteiligten Wissenschaftler in Lehre und Forschung vorgestellt werden

Anlage 1: Bauphysikalische Simulation



Bautechnik

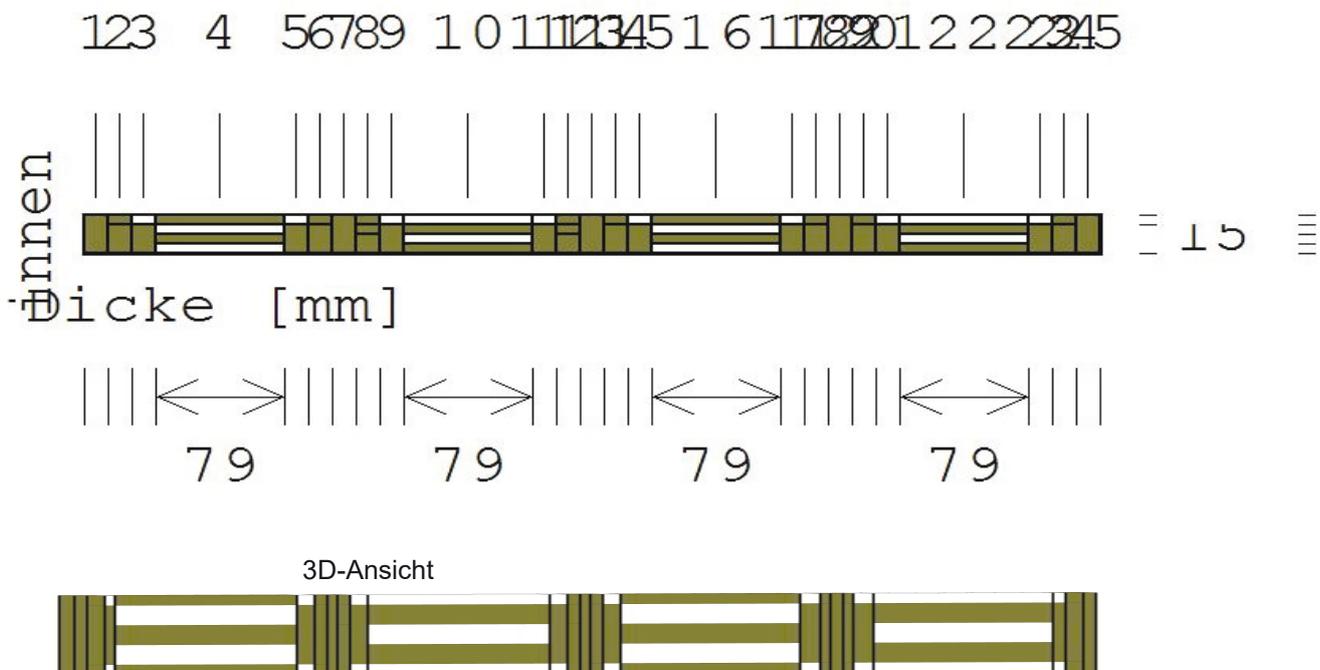
Verwendete Konstruktionen

AW IBA schwach belüftet LS andersrum 4-tlg

Außerdem verwendet für:

BP IBA schwach belüftet LS andersrum 4-tlg

DA IBA schwach belüftet LS andersrum 4-tlg



Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
1	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
2	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
3	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	$R=0,055$ m^2K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
4	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	79	$R=0,090$ m^2K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	79	0,130	200 / 200	15,800	5
5	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	8	$R=0,068$ m^2K/W	1 / 1	0,010	5

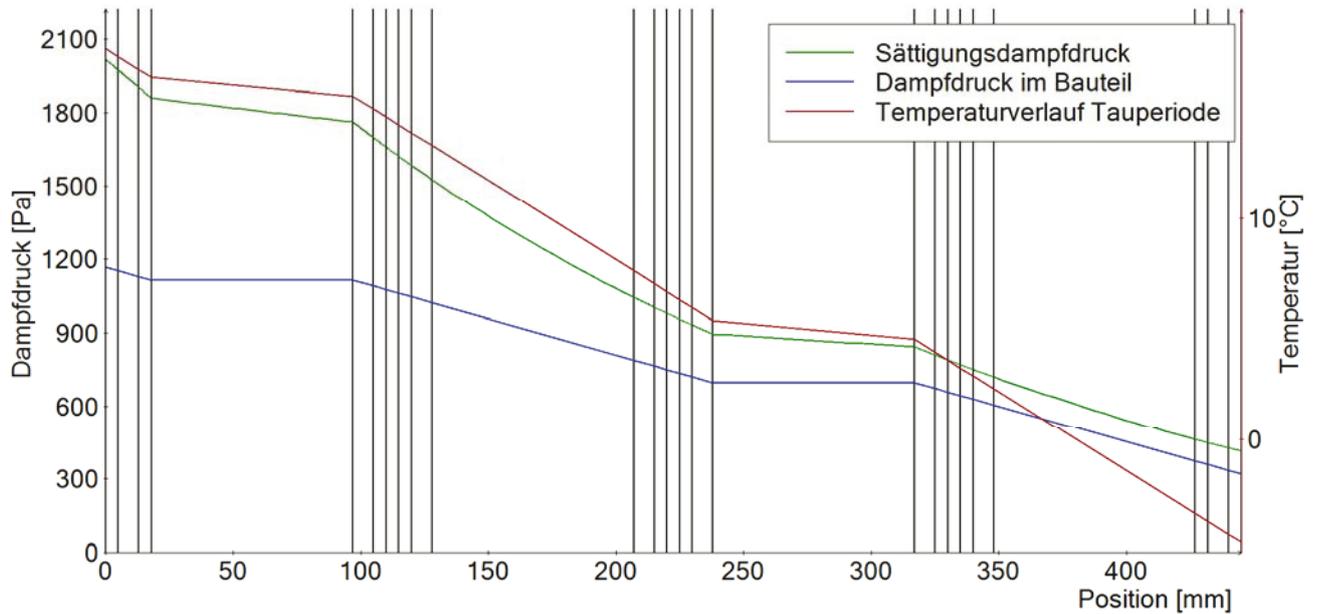
Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
6	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
7	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
8	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
9	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	8	R=0,068 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
10	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	79	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	79	0,130	200 / 200	15,800	5
11	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	8	R=0,068 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
12	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
13	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
14	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
15	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	8	R=0,068 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
16	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	79	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	79	0,130	200 / 200	15,800	5
17	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	8	R=0,068 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
18	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
19	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
20	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
21	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	8	R=0,068 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
22	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	79	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	79	0,130	200 / 200	15,800	5
23	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
24	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	8	0,130	200 / 200	1,600	15
25	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
	gesamt	445				

Verwendung

Bauteile	R _{si} [m ² K/W]	R _{se} [m ² K/W]	U-Wert [W/(m ² K)]
AW Nord (25,0 m ²) AW Ost (7,5 m ²) AW Süd (22,5 m ²) AW West (7,5 m ²)	0,13	0,04	0,46
BP (27,0 m ²)	0,17	0,04	0,43
DA (27,0 m ²)	0,10	0,04	0,47

Feuchteschutz

Es werden die vereinfachten Klimabedingungen gemäß DIN 4108-3 verwendet.



Auswertung

Der Schichtaufbau erfüllt die Anforderungen an den Feuchteschutz.

Hinweise zur Berechnung:

Als Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ) wurde für alle innenliegenden Schichten der kleinstmögliche, für die äußerste Schicht hingegen der größtmögliche Wert angesetzt.

Die Berechnung erfolgte nach DIN 4108-3:2014-11.

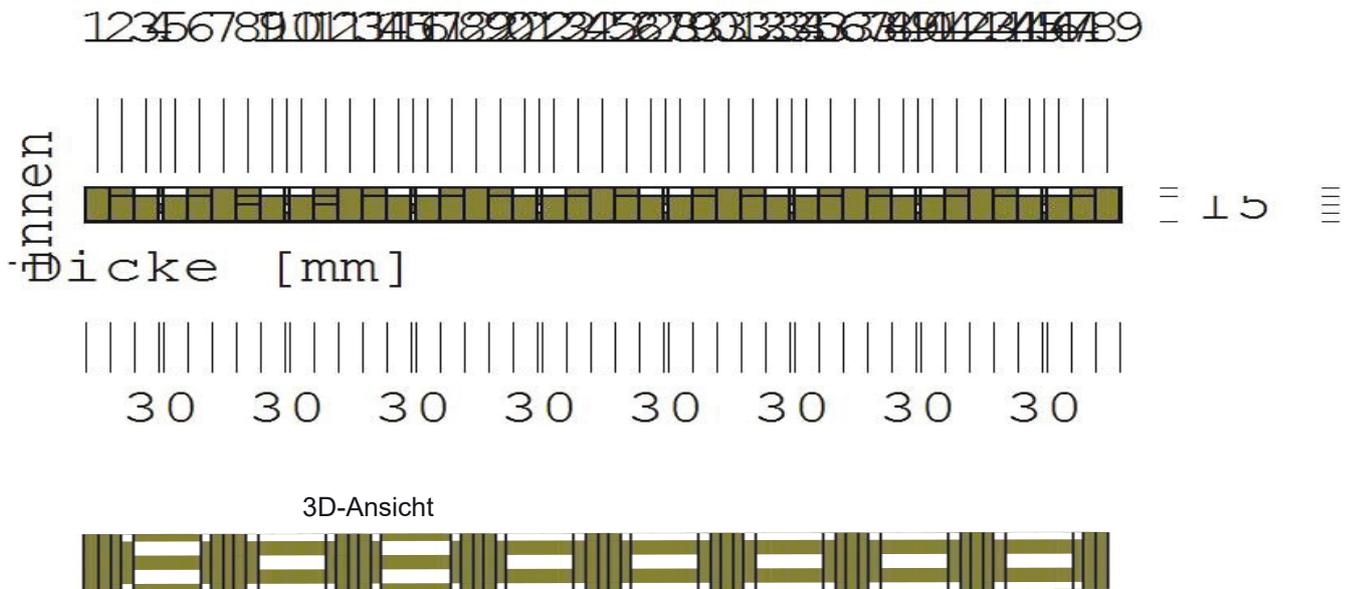
Verwendete Konstruktionen

AW IBA schwach belüftet LS andersrum 8-tlg

Auch verwendet für:

BP IBA schwach belüftet LS andersrum 8-tlg

DA IBA schwach belüftet LS andersrum 8-tlg



Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
1	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
2	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
3	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
4	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
5	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
6	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
7	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
8	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
9	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
10	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
11	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
12	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
13	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
14	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
15	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
16	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
17	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
18	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
19	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
20	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
21	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
22	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
23	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
24	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
25	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
26	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
27	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
28	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
29	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
30	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
31	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
32	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15

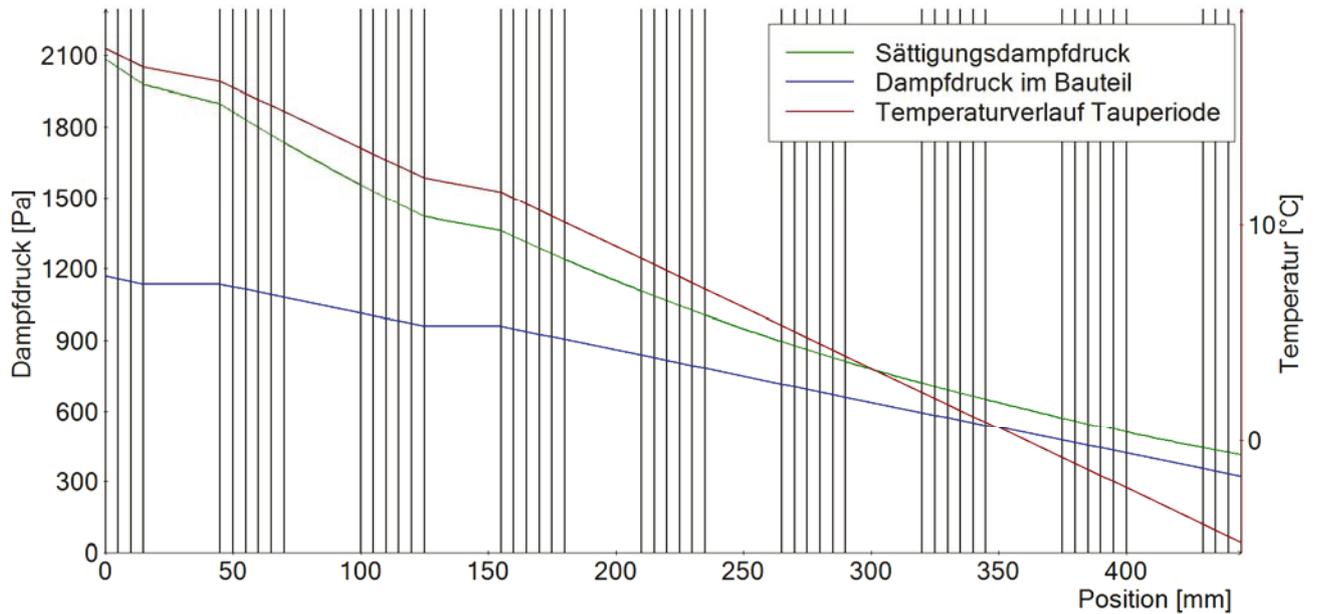
Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
33	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
34	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
35	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
36	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
37	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
38	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
39	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
40	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
41	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
42	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
43	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
44	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
45	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
46	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
47	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
48	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
49	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
	gesamt	445				

Verwendung

Bauteile	R_{si} [m ² K/W]	R_{se} [m ² K/W]	U-Wert [W/(m ² K)]
AW Nord (25,0 m ²) AW Ost (7,5 m ²) AW Süd (22,5 m ²) AW West (7,5 m ²)	0,13	0,04	0,34
BP (27,0 m ²)	0,17	0,04	0,33
DA (27,0 m ²)	0,10	0,04	0,35

Feuchteschutz

Es werden die vereinfachten Klimabedingungen gemäß DIN 4108-3 verwendet.



Auswertung

Der Schichtaufbau erfüllt die Anforderungen an den Feuchteschutz.

Hinweise zur Berechnung:

Als Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ) wurde für alle innenliegenden Schichten der kleinstmögliche, für die äußerste Schicht hingegen der größtmögliche Wert angesetzt.

Die Berechnung erfolgte nach DIN 4108-3:2014-11.

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
4	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30
5	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
11	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
12	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
13	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
14	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
15	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
16	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30
17	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
18	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
19	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
20	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
21	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
22	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30
23	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
24	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
25	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
26	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
27	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
28	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30
29	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
30	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
31	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
32	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
33	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
34	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30
35	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
36	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
37	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
38	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
39	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
40	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30
41	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
42	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15

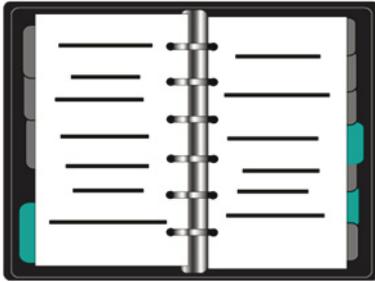
Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
43	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
44	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
45	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30
46	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	5
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	30	R=0,090 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	30	0,130	200 / 200	6,000	30
47	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
	EN ISO 6946 Luftschicht 5mm (Wärmestrom aufwärts - schwach belüftet)	5	R=0,055 m ² K/W	1 / 1	0,010	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	30

Schicht	Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	μ_{\min}/μ_{\max}	s_d -Wert [m]	Breite [mm]
48	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	5
	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	15
49	(WUFI-Wert) Hartholz	5	0,130	200 / 200	1,000	
	gesamt	445				

U-Werte entsprechen der vorangehenden Variante.



Allgemein

Nachweisergebnisse Gebäudemodell AW IBA schwach belüftet LS andersrum 4-tlg

Projekt: IBA Bauteilbetrachtung NWGB, mobil, Thüringen

Berechnung: Nichtwohngebäude nach EnEV 2014 (Anforderungsniveau ab 1.1. 2016), Verfahren nach DIN V 18599:2011, Neubau

Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2014 sind NICHT erfüllt.

EnEV-Werte	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)]	295,55	189,46	156,0 % (unzulässig)

Mittlere U-Werte [W/(m ² K)]	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
Opake Außenbauteile (>= 19 °C)	0,455	0,280	162,5 %
Transparente Außenbauteile (>= 19 °C)	1,000	1,500	66,7 %

Der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 ist erfüllt.

Nachweisergebnisse Gebäudemodell AW IBA schwach belüftet LS andersrum 8-tlg

Berechnung: Nichtwohngebäude nach EnEV 2014 (Anforderungsniveau ab 1.1. 2016), Verfahren nach DIN V 18599:2011, Neubau

Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2014 sind NICHT erfüllt.

EnEV-Werte	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)]	249,57	189,46	131,7 % (unzulässig)

Mittlere U-Werte [W/(m ² K)]	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
Opake Außenbauteile (>= 19 °C)	0,340	0,280	121,4 %
Transparente Außenbauteile (>= 19 °C)	1,000	1,500	66,7 %

Der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 ist erfüllt.

Anlage 2: Bauphysikalische Untersuchung

MFA Weimar • Postfach 2310 • 99404 Weimar

Universität Stuttgart, ICD
z.Hd. Oliver David Krieg
Keplerstraße 11

D - 70174 Stuttgart

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Bearbeiter
he

Durchwahl
564-326

Datum
08.05.17

Auftrag ICD/09/03/2017
Prüfberichte B21.17.070.01 und 02

Sehr geehrter Herr Krieg,

danke für Ihren Auftrag.
Anbei übersenden wir die beiden oben genannten Prüfberichte und verbleiben

Mit freundlichen Grüßen

Im Auftrag



Dr.-Ing. S. Helbig
Wiss. Angestellter
Abteilung Bauphysik und Zerstörungsfreie Prüfung

Anlagen



Wissenschaftlicher Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. C. Könke

Abteilung: Bauphysik und Zerstörungsfreie Prüfung
Abteilungsleiter: Dipl.- Ing. A. Freyburg

MFA Weimar
Coudraystraße 9
99423 Weimar
Herr G. Wings
Tel. 03643 / 564 325
Fax 03643 / 564 204
gunther.winges@mfpa.de

Prüfbericht Nr. B 21.17.070.01



Auftrag Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Bauteils aus Holz nach DIN EN 12664:2001-05

Auftraggeber Universität Stuttgart
Oliver David Krieg
Keplerstraße 11
70174 Stuttgart

Auftrag vom 09.03.2017, ICD/09/03/2017

Probenahme Auftraggeber

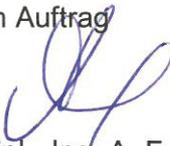
Probeneingang am 03.04.2017

Bezeichnung des Materials Muster-Holzelement für Simple Pocket, Option C, hergestellt aus Konstruktionsvollholz (KVH) Fichte

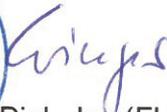
Angaben zur Probe Einbau der Probe im angelieferten Zustand

Ergebnis der Prüfung **Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C Mitteltemperatur**
 $\lambda_{10} = (0,084 \pm 0,003) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

Im Auftrag


Dipl.- Ing. A. Freyburg
Abteilungsleiter




Dipl.- Ing. (FH) G. Wings
Bearbeiter

Weimar,
18.04.2017

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Materialbezeichnung	Muster-Holzelement für Simple Pocket, Option C
Auftragsnummer AN	21.17.070
Prüfkörperbezeichnung AN	PK 1
Prüfgerät	Poensgen - Plattenapparat, im Einplattenverfahren nach DIN EN 12664 waagerechte Lage mit Kontaktplatten, Heizplatte 500 mm x 500 mm, Heizring 900 mm x 900 mm, Randdämmung der Proben mittels PS-Plattenstreifen, Umgebungstemperatur im Raum 20 °C

Angaben zur Probe

PK-Nr.	1
Einbaudicke	0,1971 m
Einbaumasse	60,4 kg
Länge	0,906 m
Breite	0,900 m
volumenbezogene Masse	376 kg/m ³

Messwerte

Nr.	Wärme- strom	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche		Temperatur- differenz an der Probe	Mitteltemperatur der Probe	Wärmeleit- fähigkeit
	W	°C	°C	K	°C	W/(m·K)
1	1,135	15,4	4,8	10,58	10,1	0,0846
2	1,200	25,4	14,9	10,54	20,1	0,0897
3	1,304	35,4	24,9	10,48	30,2	0,0982

Prüfung vom 06.04. bis 11.04.2017

Die Wärmeleitfähigkeit der Probe wurde bei drei verschiedenen Mitteltemperaturen gemessen. Aus den Messwerten wurde eine Ausgleichsgerade mittels Regressionsrechnung ermittelt. Mit dieser Funktion wurde die

Wärmeleitfähigkeit bei einer Mitteltemperatur von 10 °C bestimmt.

$$\lambda_{10} = (0,084 \pm 0,003) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Das Prüfergebnis bezieht sich auf die so untersuchten Proben. Der angegebene Messwert der Wärmeleitfähigkeit λ_{10} stellt keinen Bemessungswert dar. Die angegebene Messunsicherheit entspricht der zweifachen Standardunsicherheit ($k=2$), welche für eine Normalverteilung einen Grad des Vertrauens von etwa 95% bedeutet.



Wissenschaftlicher Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. C. Könke

Abteilung: Bauphysik und Zerstörungsfreie Prüfung
Abteilungsleiter: Dipl.- Ing. A. Freyburg

MfPA Weimar
Coudraystraße 9
99423 Weimar
Herr G. Wingses
Tel. 03643 / 564 325
Fax 03643 / 564 204
gunther.winges@mfpa.de

Prüfbericht Nr. B 21.17.070.02



Auftrag Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Außenwand nach DIN EN ISO 6946:2008-04

Auftraggeber Universität Stuttgart
Oliver David Krieg
Keplerstraße 11
70174 Stuttgart

Auftrag vom 09.03.2017, ICD/09/03/2017

Probenahme Auftraggeber

Probeneingang am 03.04.2017

Bezeichnung des Materials 40 cm dicke Außenwand aus dem Material des Muster-Holzelements Simple Pocket, Option C, hergestellt aus Konstruktionsvollholz (KVH) Fichte

Ergebnis der Berechnung **Wärmedurchgangskoeffizient für eine 40 cm dicke Außenwand**
 $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Weimar,
02.05.2017

Im Auftrag


Dipl.- Ing. A. Freyburg
Abteilungsleiter





Dipl.- Ing.(FH) G. Wingses
Bearbeiter

Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Der Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils U ergibt sich nach DIN EN ISO 6946 aus

$$U = \frac{1}{R_T}.$$

Dabei ist

R_T der Wärmedurchgangswiderstand in $m^2 K/W$.

Der Wärmedurchgangswiderstand R_T eines ebenen Bauteils aus thermisch homogenen Schichten ist zu berechnen nach

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}.$$

Dabei sind

R_{si} der innere Wärmeübergangswiderstand in $m^2 K/W$,

R_1, R_2, \dots, R_n die Wärmedurchlasswiderstände jeder Schicht in $m^2 K/W$ und

R_{se} der äußere Wärmeübergangswiderstand in $m^2 K/W$.

Der Wärmedurchlasswiderstand einer i -ten Schicht ergibt sich aus

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \tag{3}$$

Dabei sind

d_i die Schichtdicke der i -ten Schicht in m und

λ_i die Wärmeleitfähigkeit der i -ten Schicht in $W/(m K)$.

Unter Verwendung der Übergangswiderstände $R_{si} = 0,13 m^2 K / W$ und $R_{se} = 0,04 m^2 K / W$ für eine Außenwand (horizontaler Wärmestrom), der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,084 W/(m \cdot K)$ für das Material des Muster-Holzelements Simple Pocket, Option C ergibt sich für eine 40 cm dicke Außenwand ein Wärmedurchgangskoeffizient von

$$U = 0,20 W/(m^2 K).$$

Anmerkung: Es ist zu beachten, dass der berechnete U -Wert kein Bemessungswert ist, da er lediglich aus einem Messwert der Wärmeleitfähigkeit für das Material ermittelt wurde.



Universität Stuttgart



Institute for Computational
Design and Construction

JADE HOCHSCHULE

Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

IBA Thüringen

Kontakt:

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
70174 Stuttgart

+49 (0)711 68581920
www.icd.uni-stuttgart.de
mail@icd.uni-stuttgart.de