

Hans Drexler, Filipa Almeida, Marie Deilmann
Frederik Ehling, Anna Rehfinger, Philip von Rüdiger
Tobias Götz, Tobias Riehle, Tobias Brüggemann

Holz: Form- und kraftschlüssig

Entwicklung eines Voll-Holz-Bausystems mit
form- und kraftschlüssigen geometrischen
Verbindungen

F 3215

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

2020

ISBN 978-3-7388-0493-5

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

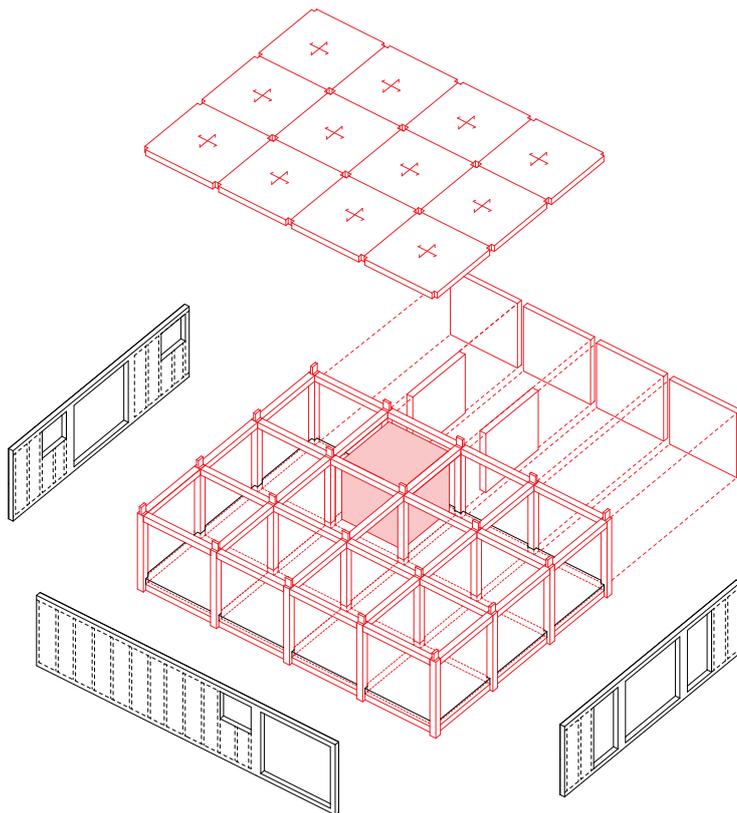
Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



 DGJ
Architektur

PIRMIN JUNG


BRÜGGEMANN
Holzbau

HOLZ: FORM- UND KRAFTSCHLÜSSIG

ENTWICKLUNG EINES VOLL-HOLZ-BAUSYSTEMS MIT FORM- UND KRAFTSCHLÜSSIGEN GEOMETRISCHEN VERBINDUNGEN

FORSCHUNGSPROJEKT
SWD-10.08.18.7-17.28

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

IMPRESSUM

Forschungspartner

DGJ Architektur GmbH
Walter-Kolb-Strasse 22
D-60594 Frankfurt am Main



Dipl. Arch. ETH Hans Drexler M. Arch.,
Filipa Almeida, Marie Deilmann, Frederik Ehling,
Anna Rehfinger, Philip von Rüdiger

Pirmin Jung Deutschland GmbH
Entenweiherweg 12
D-53489 Sinzig

PIRMIN JUNG

Tobias Götz, Tobias Riehle

Brüggemann Holzbau GmbH & Co. KG
Am Wambach 17 – 19
D-48485 Neuenkirchen



Tobias Brüggemann



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.28). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Sachmittelempfänger.



ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

INHALT

1 ZUSAMMENFASSUNG / ABSTRACT	8
Ergebnis des Forschungsvorhabens	9
Press-fit timber buildings: developing a skeleton construction system	11
2 KONTEXT	14
Systematik von Bausystemen für den Wohnungsbau	15
Offene Systeme	15
Geschlossene Systeme	16
Baukasten-Systeme	16
Komponenten-Systeme	17
Begriffsdefinitionen - Tragwerke von Bausystemen für den Wohnungsbau	18
Stabförmige Systeme (1D) - Skelettbau	19
Flächige Systeme (2D) - Elementbauweise	20
Dreidimensionale Systeme (3D) - Raummodule	23
Geschichte - Vernakuläre und autochthone Bauweisen	24
Europäische Tradition des Holzbaus - Fachwerk und Blockbau	25
Asiatische Bauweisen (am Beispiel Japans)	27
Status Quo - Aktuelle Bausysteme für Wohnungsbau	30
3 SYSTEMENTWICKLUNG	42
Definition der Nutzung: Wohnen	43
Geometrische und gebäudekundliche Parameter	44
Geometrie // Orthogonalität	44
Gebäudehöhe, Geschosshöhe	44
Konstruktive Annahmen - Bausystem und Tragwerk	45
Materialität Holz - Ökologie und Nachhaltigkeit	45
Rahmenbedingungen Tragwerk	47
Tragsysteme	52
Ausrichtung von Decken und Unterzügen	54
Material	57
Rahmenbedingungen Brandschutz	60
Anforderungen Bundesländer	60
Anforderungen Gebäudeklassen	61

Globales und lokales Tragwerk: Beschreibung der Vorgehensweise	64
Horizontaler Lastabtrag	65
Vertikaler Lastabtrag	66
Globales Tragwerk:	
Gegenüberstellung von Holz-Skelettbau und Holz-Massivbau	67
Lokales Tragwerk	71
Toleranzen	73
Normative Vorgaben für den Holzbau	73
Betrachtung der einzelnen Anschlussstellen im Bausystem	75
Bilanz	81
Brandschutz und Tragwerk (Heißbemessung)	82
Versuche Testaufbau 1:1 - Untersuchung am Modellvorhaben und Demonstrator	85
Modellvorhaben / Praxistests	85
Bauteiltest und Demonstrationsbau (Demonstrator)	87
Versuche zum lokalen Tragwerk und Holz-Holz-Verbindungen	89
Ausbildung von Musterdetails	89
Arbeitsschritte und Prozessdauern für Abbund und Montage	94
Vergleich zur Ausführung mit Stahl-Verbindungsmitteln	95
Versuche zu Holznagelverbindungen	99
Gebäudekundliche Analyse / Flächeneffizienz des Bausystems	111
4 ANALYSE- UND PLANUNGSTOOL	124
Beschreibung Analyse- und Planungstool	125
Nutzer-Handbuch - Anleitung für das Analysetools	129
Eingabe der Grundparameter	130
Eingabelogik, Vereinfachungen und Einschränkungen	132
Erweiterte Eingabe	133
Ergebnisse	134
Querauswertung Effizienz und Flächenausnutzung	136

5 EXPLORATION	140
Fallstudie 1 - dgj219 Arrival City 4.0	143
Fallstudie 2 - dgj228 Mehrfamilienhaus	151
Fallstudie 3 - dgj223 Studierendenwohnheim	157
Fallstudie 4 - dgj236 Studierendenwohnhaus Weimar	163
Fallstudie 5 - dgj244 Greenhouse	169
6 AUSWERTUNG	174
Querauswertung Fallstudien	175
Vergleich - Effizienz der Tragwerke	175
Vergleich - Genauigkeit des Rechentools	176
Herausforderungen der Systementwicklung	179
7 VARIANTENVERGLEICH UND SYSTEMBEWERTUNG	182
Vergleich von Systemvarianten in unterschiedlichen Bauweisen	183
Definition der Systemvarianten	185
Kosten- und Massenvergleich der Systemvarianten	195
Vergleichende Ökobilanzierung der Systemvarianten	198
Methodik der Ökobilanzierung	198
Einzelbetrachtung der Indikatoren für die Systemvarianten	203
Ressourcen, Rückbaubarkeit und Rezyklierbarkeit	214
Ausgangslage: Stand von Forschung und Technik	214
Bewertung der Rezyklierbarkeit auf Material-Ebene	216
Bewertung nach DGNB	221
Methodik Bewertung nach DGNB	221
Ausblick: Betrachtung des Bausystems / Tragwerk und Ausbau	225
Konstruktive Umsetzung der Rezyklierbarkeit	226
8 ERGEBNISSE	228
Analyse von Stärken und Schwächen des Bausystems	229
Konstruktive Vor- und Nachteile	229
Ökologische Vor- und Nachteile	230
Ökonomische Vor- und Nachteile	232
Marktchancen	233
Bewertung des Entwicklungsstand // weiterer Forschungsbedarf	233

ERGEBNIS DES FORSCHUNGSVORHABENS

Holz war bis zur Industrialisierung einer der wichtigsten Baustoffe, der sich vor allem durch die lokale Verfügbarkeit, die leichte Verarbeitung und die guten statischen und bauphysikalischen Eigenschaften empfahl. Von Zimmerleuten wurden über Jahrhunderte Holzkonstruktionen ohne metallische Verbindungsmittel gebaut. Hierfür gibt es in Europa und Asien einen reichen Fundus an historischen Holzverbindungen für unterschiedlichste Lastfälle und Bauweisen. Auch mehrgeschossige, große und komplexe Bauwerke wurden mit reinen Holzbauweisen allein mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen errichtet. Diese Tradition ist im Zuge Industrialisierung abgerissen. Nicht nur ersetzten kostengünstige Metallverbindungen (Nägeln, Schrauben, Bolzen) die handwerklich aufwendigen und somit lohnintensiven Knotenpunkte, auch wurde Holz als Primärbaustoff durch neue Baustoffe (Gusseisen, Stahl, Beton) verdrängt, die bis heute aufgrund der größeren Produktionsmengen und der fehlenden Berücksichtigung der externen Kosten (Umweltfolgen) bei der Preisbildung zu günstigeren Preisen angeboten werden.

Ziel des Forschungsprojekts ist es eine Holzbauweise zu entwickeln, die von Verbindungen und Knotenpunkten durch form- und kraftschlüssige, geometrische Fügung der Tragelemente ausgeht. In dem Modellvorhaben wird eine Skelettbauweise aus Holz entwickelt und erprobt, die für den mehrgeschossigen Wohnungsbau geeignet ist. Dabei werden die Anforderungen an das Tragwerk und den Brandschutz durch die Ausformung und Dimensionierung der Holzelemente erfüllt.

Die Forschung entwickelt die Grundlagen für ein neues Holzbau-System. Die zu entwickelnden Verbindungen und Knoten lassen sich systematisieren und verallgemeinern. Grundsätzlich wurden zwei Ebene betrachtet:

- Entwicklung der Knoten und Verbindungen (lokales Tragwerk)
- Entwicklung der Bausysteme: Tragstruktur (globales Tragwerk)

Alleinstellungsmerkmal ist der umfassende und systematische Ansatz. In dem entwickelten Bausystem wurden alle Anschlusspunkte und Konstruktionsdetails des Tragwerks betrachtet und in Holz-Holz-Verbindungen übersetzt. Dadurch entsteht ein Bausystem mit allen Anschlussdetails und Dimensionen, dass sich auf zahlreiche Bauaufgaben anwenden lässt. Dazu wurden folgende Arbeitspakete erarbeitet:

- Übersetzung traditioneller Zimmermannsknoten in ein umfassendes Bausystem für das Tragwerk mit Anschlussdetails für form- und kraftschlüssige Holz-Holz-Verbindungen
- Entwicklung von Planungs-, Fertigungs- und Montagethoden für Nur-Holz-Konstruktionen

- Berechnungsmodelle und Bemessungen für form- und kraftschlüssige Verbindungen

Es wurde auch ein Planungstool entwickelt, das eine Vordimensionierung und Abschätzung von Kosten und Performance für einen Anwendungsfall gestattet.

Die Planung der Anschlüsse ist in einer zeitgemäßen dreidimensionalen Ausführungsplanung entstanden, wie sie im Holzbau verbreitet ist. So lassen sich auch die Maschinendaten mit geringem Aufwand in der Planung erzeugen. Die Herstellung des Bausystems mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen lässt sich auf weit verbreiteten Abbund-Anlagen herstellen. So wird das traditionelle Wissen in zeitgenössische Bautechnologien und Materialien übersetzt.

Dieser Bericht, das Rechentool und die Anleitung zu dem Rechentool sind auf dieser Seite öffentlich zugänglich:

<https://www.dropbox.com/sh/axw5xmx3xyeckxm/AAD2DpTfVrjwkr4nToXNkrh-a?dl=0>



Abbildung 1:
Bausystem dgj219 Arrival City 4.0
Foto: Hans Drexler 2016.

PRESS-FIT TIMBER BUILDINGS: DEVELOPING A SKELETON CONSTRUCTION SYSTEM

Until industrialization, wood was one of the most important building materials, which was widely used because of its local availability, easy workmanship and good structural and physical properties. For centuries, carpenters have been building wooden structures without metallic connections. There is a rich tradition of historical timber connections in Europe and Asia for a variety of building types and construction methods. Multi-storey, large and complex buildings were also built with those timber constructions using press-fit timber construction. This tradition has been mostly lost in the course of industrialization. Not only have cost-effective metal connections (nails, screws, bolts) replaced the technically complex and thus labour-intensive junctions, but also wood as a primary material has been replaced by new building materials (cast iron, steel, concrete), which until today due to the larger production quantities and the lack of consideration of the external cost (environmental impact) in pricing, are offered at more affordable prices.

The aim of the research project is to develop a timber construction in which the connections and junctions originate from press-fit timber, geometric joining of the structural elements. In a model project, a skeleton construction made of wood is developed and tested, which is suitable for multi-storey housing. The requirements for the structure and the fire protection are met by the shaping and dimensioning of the timber elements.

In the research a new timber construction system has been developed. Basically, two levels were considered:

- Development of the building systems: supporting structure (global structure)
- Development of nodes and connections (local structure)

In the developed building system, all connection points and construction details of the structure were considered and translated into press-fit timber joints. This creates a construction system that can be applied to numerous building typologies. For this purpose, the following research tasks were completed:

- Translation of traditional carpenter's nodes into a comprehensive construction system for the structure with connection details with positive and non-positive wood-wood joints
- Development of planning, manufacturing and assembly methods for wood-only constructions
- Calculation models and dimensions for positive and non-positive connections

Furthermore, a calculation tool has also been developed that allows for pre-dimensioning and estimating cost and performance for an application case.

Thanks to advancements in design and production technology, it is now possible with computer-controlled machines to produce perfectly fitting joints economically, regardless of the complexity of the geometry. In a series of case studies and two research projects in cooperation with Pirmin Jung Ingenieure, DGJ Architektur has developed a timber construction system in which the entire load-bearing structure and all joints are press-fit without metal connectors. Part of the research is a complete set of construction details so that the system fulfills today's regulatory requirements regarding fire protection, acoustic insulation, structural calculation, and industrial construction standards.

The construction system is based on readily available materials, technologies, and processes at all levels so that the system can be applied immediately by everybody. Standardized and inexpensive materials that are available in large volumes are used: solid structural timber (KVH), laminated timber (BSH) and cross-laminated timber (CLT), or glue-laminated ceilings. The structural analysis of the load-bearing structure and the joints are based on the current Eurocode and in principle any engineer can calculate and dimension them. Thus, the innovative part is not newly developed materials, but the more intelligent use of existing methods, technologies, and materials and combining them into a system.

This report, the calculation tool and the instructions for the calculation tool are publicly available on this page:

(the tool is only available in German)

<https://www.dropbox.com/sh/axw5xmx3xyeckxm/AAD2DpTfVrjwkr4nToXNkrh-a?dl=0>



KONTEXT

GRUNDLAGEN UND RAHMENBEDINGUNGEN

In diesem Abschnitt wird der Kontext des Forschungsvorhabens untersucht und dargestellt. Zunächst werden dazu die Begriffe eingeführt, die in dem Projekt benutzt werden. Auch werden die rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen für die Systementwicklung beschrieben. Ferner wird ein kurzer Überblick über historische und zeitgenössische Bausysteme gegeben, die für das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprojekt relevant sind.

SYSTEMATIK VON BAUSYSTEMEN FÜR DEN WOHNUNGSBAU

Offene Systeme

Offene Systeme ermöglichen es, unterschiedliche Elemente verschiedener Hersteller flexibel miteinander zu kombinieren. In der Planung werden die Funktionen den Elementen zugewiesen und die möglichen Hersteller ausgewählt. Diese Flexibilität und Kombinierbarkeit sorgt für eine hohe Anpassungsfähigkeit an die unterschiedlichsten Bauvorhaben.

In dieser Definition eines offenen Systems lehnen wir uns an den Begriff ‚open source‘¹. Ein Beispiel für ein offeneres open-source System ist Wiki-House, das den Ansatz einer Open-Source-Technologie auf den Baubereich überträgt. Die britische WikiHouse Foundation² hat ein Bausystem entwickelt, das auf einer einfacher Fertigungstechnologie basiert: Holzwerkstoffplatten oder Sperrholzplatten werden computergesteuert mit einer 2D-CNC-Fräse ausgeschnitten und anschließend gesteckt und/oder verschraubt.

Die Offenheit des zu entwickelnden Systems lässt sich also auf zwei Ebenen denken: Zum einen ist das System proprietär offen und kann von Dritten weitergeschrieben werden, zum anderen ist das System materiell offen und kann andere Bauteile, Systeme und Materialien integrieren. Im Gegensatz dazu spricht Fritz Haller auch in Zusammenhang mit seinen Systemen ‚Maxi‘, ‚Midi‘ und ‚Mini‘ auch von offenen Systemen³, allerdings bezieht er diese Offenheit allein auf die Möglichkeit das Gebäude umzubauen und zu erweitern, nicht mit anderen Komponenten oder Geometrien zu kombinieren.

¹ Die Open-Source Bewegung entstand in den späten 1990er Jahren und geht auf die freie Software Bewegung zurück, die von Richard Stallman 1983 gegründet wurde. Ziel der Bewegung ist ein freier Zugang zum Netz, zu Software und ein ungestörter Austausch von Daten und zwischen NutzerInnen. Die Quellcodes werden offengelegt, um von anderen verändert, weiterentwickelt oder als Plattform für eigenen Entwicklung genutzt zu werden. Vgl. dazu: https://en.wikipedia.org/wiki/Free_software_movement, Zugriff 12.01.2019. Die Idee von Open-Source wurde auf andere Wissensgebiete und Industrien übertragen: So werden alle Arten von Inhalten geteilt und weitergeschrieben. Ein wichtiges Beispiel ist das Online-Nachschlagewerk ‚Wikipedia‘, dem die Idee einer freiwilligen Selbstkontrolle der Einträge durch die NutzerInnen (ohne kommerzielle Interessen) zu Grunde liegt. Neben der Vernetzung und dem dadurch ermöglichten Austausch von Daten, ist die Idee der ‚Community‘ zentral für ein Open-Source System. Die Community bildet einen geschützten Raum, in dem die NutzerInnen sich gegenseitig und das Projekt respektieren und schützen. Der Austausch basiert zum einen auf der Annahme, dass die Individuen durch die kollektive Entwicklung von dem gemeinsam erarbeiteten Ergebnis profitieren (do ut des). Zum anderen funktioniert die Community (wie jede andere soziale Gruppe), indem die Einzelnen Anerkennung und Wertschätzung für ihren Beitrag zum gemeinsamen Projekt erfahren. Grundsätzlich ist die Idee eines gemeinsamen Korpus von Wissen, das innerhalb einer Gruppe geteilt und weitergegeben wird nicht beschränkt auf digitale zeitgenössische Technologien. So haben die traditionellen Handwerkszünfte ihr Wissen in ähnlicher Weise entwickelt, konserviert und verbreitet, indem es innerhalb der Gruppe (wenigstens mit klaren Hierarchien und Strukturen innerhalb der Zünfte) weitergegeben wurde. Auch die Wissenschaften haben praktisch von den ersten Anfängen an das Wissen mit allen zur Verfügung stehenden Medien (mündlich, Publikationen, Korrespondenz, Ausbildung) ausgetauscht und so weiterentwickelt. Neu gegeben über die traditionellen Formen und Praktiken hinaus, ist die technologische Grundlage (vor allem Computer und das Internet), die zumindest allen ComputernutzerInnen Zugang zu dem Open-Source Material gewährt. Dadurch wird die Personengruppe, die an dem Austausch teilnehmen kann erheblich erweitert.

² <https://wikihouse.cc>

³ Fritz Haller, Ein offenes System für mehrgeschossige Bauten mit integrierter Medieninstallation Un système constructif ouvert pour édifices à plusieurs niveaux avec réseaux de fluides intégrés An open system for multi-storied buildings with integrated media installation, Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home : internationale Zeitschrift, Werk AG, Zürich, Band (Jahr): 29 (1975), S. 431.

Eine Kombination von offenen und geschlossenen Systemen, z. B. ein Tragwerk aus einem geschlossenen System und ein Innenausbau aus einem offenen System, ist auch denkbar.⁴

Geschlossene Systeme

In geschlossenen Systemen sind alle Elemente aufeinander abgestimmt und nicht (oder nur bedingt) durch Elemente anderer Hersteller austauschbar. Meist stammen alle Teile von einem Hersteller oder werden zumindest als System vermarktet und aus einer Hand montiert. Das System funktioniert wie ein Bausatz. Die Gestaltungsflexibilität ist beschränkt auf den Spielraum den die Festlegungen der Elemente im System bedingen. Dies erschwert u.U. die Anpassung an verschiedene Nutzungen, Topographien oder Umgebungsbebauung.⁵

Geschlossene Systeme, in denen die Komponenten ausschließlich von einem Anbieter hergestellt werden sind im Baubereich ebenso wie bei Computer-Hardware, Automobilen und anderen Technologien nicht denkbar, weil die meisten Komponenten in sich schon so komplex sind, dass es weder möglich noch sinnvoll wäre, diese auch herzustellen. So kaufen auch die Anbieter von geschlossenen Systemen den Großteil der Komponenten zu. Das Spezifische des Systems entsteht also in der Art, wie die Komponenten kombiniert und das System konstruiert wird.

Im Baubereich zeichnet sich ein System-Anbieter vor allem durch den Leistungsumfang aus. Während das sogenannte schlüsselfertige Bauen die kompletten Bauleistungen umfasst, bieten die Systemanbieter auch die Planung im System an, so dass die gesamte Abwicklung des Projektes aus einer Hand kommt.

Baukasten-Systeme

Eine ähnliche Begrifflichkeit wie die geschlossenen Systeme findet sich bei den Baukasten-Systemen. Die Anbieter betonen die Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit des Systems. Meistens werden deswegen kleinteiligere Systematiken (z.B. Tragwerk aus Träger und Stützen) gewählt, die sich vielseitiger kombinieren lassen als große Komponenten (z.B. Raum-Module). In diesen Systemen gibt es festgelegte Bauteile und Elemente. Stützen, Wände, Unterzüge, Decken und die für das entsprechende System entwickelte Verbindungsmittel werden vorproduziert. Aus dem Sortiment kann man sich dann das Gebäude zusammenstellen. Aufgrund der auf das System begrenzten Möglichkeiten der Flexibilität und der Austauschbarkeit der Elemente ausschließlich gegen Elemente aus dem System, handelt es sich meist um geschlossene Systeme.⁶

⁴ Staib, Gerald et al. (2008): Elemente + Systeme Modulares Bauen, Entwurf Konstruktion neue Technologien, Edition Detail, Basel: Birkhäuser Verlag

⁵ Ebd.

⁶ Ebd.

Die Baukasten-Systeme wurden historisch aber auch im aktuellen Diskurs häufig aufgegriffen, um eine Effizienzsteigerung im Baubereich zu erreichen. Für die Steigerung der Effizienz und Produktionsgeschwindigkeit werden dabei zwei Strategien eingesetzt: Erstens soll durch die geringere Anzahl der unterschiedlichen Bauteile die Zahl der Wiederholungen des einzelnen Bauteils so erhöht werden, dass durch die Skaleneffekte (Massenprodukt, economy of scale) geringe Stückkosten entstehen. Diese Produktion könnte, bei einer hinreichend konstanten Nachfrage nach dem System auch von einem konkreten Projekt unabhängig produziert werden, was zu einer besseren Ausnutzung der Anlagen und wiederum niedrigeren Stückkosten führt.

Voraussetzung für Serienproduktion und Outsourcing von Produktionsteilen wäre eine weitergehende Standardisierung der Bauelemente und -produkte. Auf der Ebene von Bauteilen (Mauersteine, Elektrobauteile, Armaturen, Rohre, Leitungen, Kabel et cetera) werden die Produkte unabhängig von der Nachfrage industriell in großen Stückzahlen gefertigt. Ein anderer Weg, die Anzahl der Wiederholungen zu erhöhen, wäre es, dass in der Automobilindustrie eingesetzte Plattformkonzept zu übersetzen. Dabei werden in zahlreichen unterschiedlichen Modellen eine Vielzahl von gleichen Komponenten eingesetzt. Diese bilden eine Plattform (im Allgemeinen bestehend aus Chassis, Motor und Getriebe und weiteren Komponenten), auf die dann für die einzelnen Modelle individuelle Elemente aufgebaut werden. Der normale Planungsprozess verläuft umgekehrt und beginnt mit der konkreten Nachfrage, sodass jedes Gebäude ein prototypischer Einzelfall bleibt. Den dritten Weg zeigen Lacaton & Vassal auf, die in ihren Projekten auf am Markt verfügbare industrielle Bauteile wie Stahlbetontragwerke für Industriehallen oder Gewächshäuser zurückgreifen und eine Architektur aus der Logik der verfügbaren Bauprodukte entwickeln. Die anschließende Montage der Halbzuge geschieht handwerklich und mit einem geringen Vorfertigungsgrad.

Komponenten-Systeme

Komponenten-Systeme sind im Baubereich am häufigsten. Hersteller oder Systemgeber bieten nicht alle für das Gebäude notwendigen Bauteile, Bauleistungen und Planungen an, sondern spezialisieren sich auf einen Bereich: Das Tragwerk, die Fassade oder auch einzelne Bauteile wie Fenster, Dachaufbauten oder Technik-Systeme. Die Notwendigkeit, in sich schlüssige Systeme zu entwickeln, die auch mit den üblichen Konstruktionen normgerecht und kosten-effizient kombiniert werden können, wird überlagert von der hohen Komplexität und den Anforderungen an das heutige Bauen.

BEGRIFFSDEFINITIONEN - TRAGWERKE VON BAUSYSTEMEN FÜR DEN WOHNUNGSBAU

Wenn für den Wohnungsbau industrielle Bausysteme etabliert würden, die unabhängig von der Nachfrage produziert werden könnten, ließen sich große Effizienzpotenziale realisieren. Zu unterscheiden sind drei unterschiedliche Ansätze:

- 3D: Modulbauten (Raum-Module) und Fertighäuser in Gebäudegröße
- 2D: Elemente, die im Allgemeinen auf standardisierten Bauelementen basieren (zum Beispiel Wandtafeln, Großtafelbau)
- 1D: Bausysteme, die auf einer bestimmten Herstellungstechnologie basieren (Fertigbauweisen in Holzrahmenbau, digitale und robotische Fertigung)

Diese drei Kategorien unterscheiden sich durch den Grad der Vorfertigung und der geometrischen Bestimmtheit und damit auch in der zunehmenden Anpassungsfähigkeit. Für das zu entwickelnde Bausystem wird versucht, einen Kompromiss zwischen diesen Faktoren zu finden, der sich in der Skelettbauweise und somit vorrangig in der Verwendung stabförmiger und flächiger Systeme abbildet.

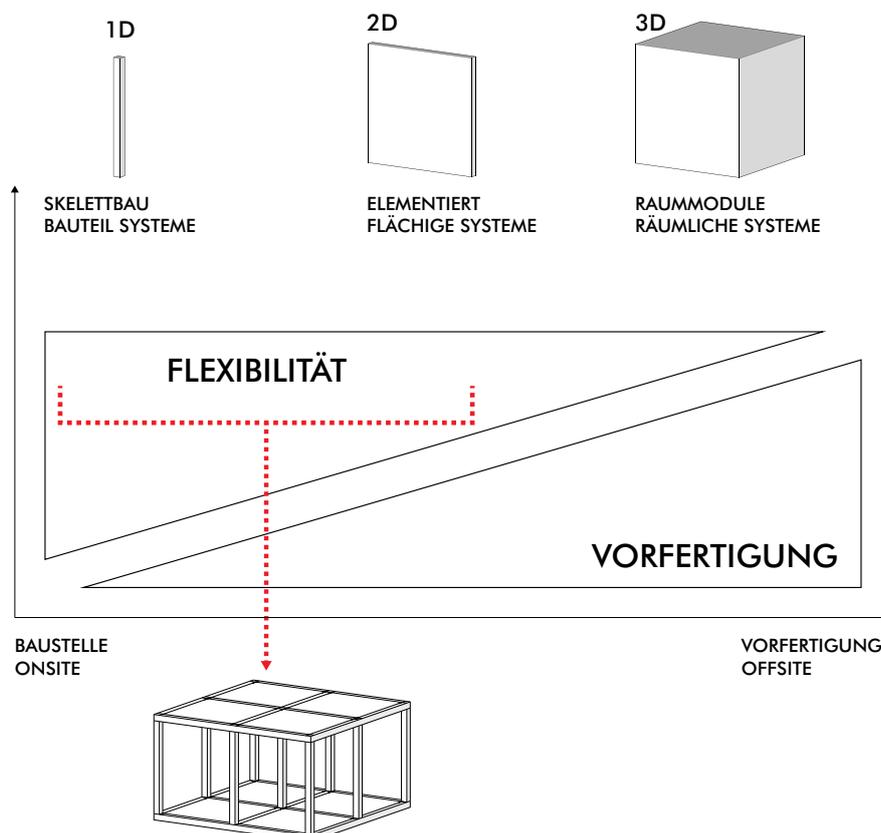


Abbildung 2:
Systematik Bausysteme 1D, 2D, 3D
DGJ Architektur, 2019.

Stabförmige Systeme (1D) - Skelettbau

Das Tragwerk dieser Systeme wird mittels Stützen, Trägern und Aussteifungselementen gebildet. Außen- und Innenwände sind nicht tragend, wodurch innerhalb des Stützenrasters eine flexible Grundrissorganisation ermöglicht wird.⁷ Skelettbauten sind im Bereich des Wohnungsbaus unüblich. Meist werden tragende Innen- und Außenwände ausgebildet, deren gleichmäßiger Lastabtrag zu einem effizienten Tragwerk führt. Die Bündelung der Lasten in Stützen bedeutet für das Tragwerk, dass neben den Decken für den horizontalen Lastabtrag auch Träger eingesetzt werden müssen, um die Lasten der Decken in die Stützen einzuleiten. Auch in Hinblick auf den Schallschutz ist der Skelettbau nicht ideal. Die Ausführung von tragenden Wänden, die beim Massivbau notwendig hohes Eigengewicht haben, sind für den Schallschutz zwischen angrenzenden Räumen besser geeignet als die Trennwände im Skelettbau, die als nicht-tragende Wände auch leicht ausgeführt werden können. In Hinblick auf den Schallschutz ergeben sich aber schwerere und/oder aufwendigere Konstruktionen, die z.B. mehrerer Schalen aufweisen, die akustisch entkoppelt sind. Das Tragwerk bildet eine akustische Schwachstelle. So führt das Tragskelett sowohl in horizontaler Richtung (Träger), als auch in vertikaler Richtung (Stützen) zu durchgehenden Bauteilen, die Luft- und Körperschall übertragen können und deswegen akustisch entkoppelt oder ertüchtigt werden müssen.

Der große Vorteil des Skelettbaus ist in der Trennung von Raumbildung und Tragwerk zu sehen. So ermöglicht die Tragstruktur, dass sowohl Innen- als auch Außenwände versetzt und verändert werden können. Für die Abtragung der horizontalen Lasten werden die bei den untersuchten Systemen auch Wände als aussteifende Wandscheiben herangezogen. Dadurch sind einige der Wände nicht mehr flexibel. Dennoch entsteht in Hinblick auf die Nutzung und die Anpassungsfähigkeit des Gebäudes enorme Freiheitsgrade, die sich in einem Massivbau mit tragenden Wänden nicht erreichen lassen. Im Sinne der Definition von Groák⁸ (analog bei Schneider, Till) von flexiblem Wohnen als einer physisch und baulich veränderbaren Struktur bietet der Skelettbau die besten Voraussetzungen. Vor allem ist ein großer Vorteil darin zu sehen, dass das Tragsystem robust und selbsterklärend ist, so dass es von den NutzerInnen ohne Planungsaufwand selbst verändert werden kann.

⁷ Quelle: Staib, Gerald et al. (2008): Elemente + Systeme Modulares Bauen, Entwurf Konstruktion neue Technologien, Edition Detail, Basel: Birkhäuser Verlag

⁸ Steven Groák, The Idea of Building: thought and action in the design and production of buildings, London: E & FN Spon, 1992, p. aus: Tatjana Schneider und Jeremy Till greifen in „Flexible Housing“ die Definition von Steven Groák auf: Flexibles Wohnen als eine Wohnumgebung, die sich physisch verändern lässt. In diesem Sinne sind die gegenständlichen Entwürfe als flexibles Wohnen einzuordnen, weil die BewohnerInnen die Möglichkeit haben, das Wohnumfeld physisch umzugestalten. Adaptives Wohnen wird als eine Anpassungsfähigkeit in Hinblick auf unterschiedliche soziale Nutzungen beschrieben, ohne dass physisch verändert wird.

Für Skelettbauten eignet sich Holz in besonderer Weise: Holz hat von allen gängigen Baumaterialien das günstigste Verhältnis von Eigengewicht zu Tragfähigkeit. Deswegen lassen sich in Holz besonders effiziente Tragsysteme konstruieren. Ein weiterer Vorteil, ist die geringe Wärmeleitfähigkeit aus der sich ergibt, dass sich im Holzbau die Probleme anderer Skelettbauten (Durchdringungen, Kältebrücken) einfacher vermeiden lassen.

Flächige Systeme (2D) - Elementbauweise

In diesen Systemen bilden flächige Wand- und Deckenelemente, Platten oder Tafeln, das Tragwerk und zugleich auch den Raumabschluss. Die selbsttragenden Elemente können schmale Kleintafeln sein oder raumbreite Großtafeln sein. Man unterscheidet daher auch zwischen Kleintafel-, Großtafel- und Schottenbauweise. Grundsätzlich werden die Abmessungen der Elemente vom Baustoff, den Transportbedingungen, dem Entwurfsraster und der Geschosshöhe bestimmt.⁹

2D-Elemente sind die am häufigsten eingesetzte Form der Vorfertigung. Hier werden Wandtafeln, Deckenelemente, Fassadenelemente im Werk weitgehend vorgefertigt und dann auf der Baustelle zusammengesetzt. Es werden für Tragwerk und Gebäudehülle bei bestimmten Bausystemen bereits hohe Vorfertigungsgrade erreicht. Einzelne Bauteilgruppen, wie Fassaden für Gewerbebauten, werden komplett vorgefertigt. Die elementierte Bauweise führt aufgrund der Fügung der einzelnen Elemente zu einem gesamthaft niedrigeren Grad der Vorfertigung des Gebäudes als die Modulbauweise. So müssten zum einen luft- und wasserdichte sowie kraftschlüssige Verbindungen und Fugen vor Ort hergestellt werden. Zum anderen müssen der Ausbau und die Oberflächen von Wänden und Böden nach der Fügung der Elemente eingebracht werden. Der Gebäudetechnik kommt im Hinblick auf den gesamten Vorfertigungsgrad der Gebäude eine Schlüsselstellung zu: Durch die Vor-Ort-Montage von haustechnischen Leitungen und Komponenten können die nachfolgenden Schichten und Bauteile nicht werkseitig eingebaut werden. Die Vorteile der Vorfertigung werden für große Bereiche der Gebäudetechnik nicht umgesetzt. Zwar geht der Trend bei den Herstellern von Anlagen zunehmend dazu, einzelne Komponenten wie Heizung, Warmwasserspeicher und Lüftungsanlagen in kompakten Einheiten zusammenzufassen. Die zentralen Einheiten werden aber über konventionelle Leitungen mit den Gebäuden verbunden.

⁹ Quelle: Staib, Gerald et al. (2008): Elemente + Systeme Modulares Bauen, Entwurf Konstruktion neue Technologien, Edition Detail, Basel: Birkhäuser Verlag.

Das wichtigste Marktsegment der Fertighausindustrie sind die Einfamilien- und Doppelhäuser. Hier liegt der Marktanteil 2014 in Deutschland bei 16,2 Prozent.¹⁰ Auch diese Produktion ist handwerklich geprägt und die Produkte sind in hohem Maße individualisiert. Im Ergebnis unterscheidet sich die Produktion von konventionellen Gebäuden in Holztafelbauweise meist in erster Linie dadurch, dass ein höherer Grad der Vorfertigung in der Fabrik erzielt wird. Die Preise sind nicht deutlich niedriger als die für konventionelle Gebäude. Das liegt zum einen an den noch immer relativ niedrigen Stückzahlen, zum anderen aber auch daran, dass die Anbieter die Kostenvorteile in der Produktion nicht vollständig an die Kunden weitergeben, sondern nur knapp unterhalb des Wettbewerbs anbieten. So werden Fertighäuser auch in erster Linie über die höhere Sicherheit hinsichtlich Kosten, Terminen und Qualität vermarktet, nicht über einen niedrigen Preis.

Am erfolgreichsten – gemessen an der Zahl der Umsetzungen – ist die Großtafelbauweise oder der Plattenbau. Nach ersten Versuchen in New York 1910 wurde diese Bauweise erstmals im großen Umfang bei dem Projekt Neues Frankfurt (1925–1930) eingesetzt. Der Stadtbaurat Ernst May ließ eine Fabrik für Betonplatten errichten. Auch Martin Wagner setzte in Berlin ähnliche Projekte um. Durchschlagende Wirkung entfaltete der Plattenbau nach dem Zweiten Weltkrieg in Ost und West durch die Koppelung an den modernistischen Städtebau. Auf der freien Fläche oder als Ersatz für zerstörte oder abgerissene Standquartiere als Wohnzeilen oder punktförmige Hochhäuser im großen Maßstab umgesetzt, ließ sich die Anzahl der Wiederholungen für die einzelnen Bauteile und damit auch die Kosten für die Herstellung dramatisch senken. Seit den 50er-Jahren, vor allem aber zwischen 1960 und 1985, wurden in der Großtafelbauweise überwiegend Großsiedlungen umgesetzt, die einen erheblichen Anteil an der gesamten Bautätigkeit hatten und für den Städtebau und das Erscheinungsbild der Städte prägend waren. So wurden allein in der DDR 1,8 bis 1,9 Millionen Wohnungen im Plattenbau errichtet.¹¹ Diese Bauleistung ist im Vergleich zur gesamten Wirtschaftsleistung der DDR bemerkenswert hoch und unterstreicht die Effizienz des Bausystems. Historisch sind Plattenbau (Großtafelbauweise) und Großsiedlungen eng verknüpft. Aus der Verbindung von serieller Fertigung und monotoner Gestaltung erklären sich viele Vorurteile gegen das industrielle Bauen.

¹⁰ Quelle: Fertigbau-Branche | BDF e.V. <http://www.fertigbau.de/bdf/unsere-branche/index.html>.
¹¹ Hannemann, Christine: Die Platte: Industrialisierter Wohnungsbau in der DDR. Stuttgart, 2004.

Auch die Planung der Gebäude und die Produktion der Bauteile waren zentralisiert, standardisiert und von den einzelnen Projekten entkoppelt. Von dem erfolgreichsten Plattenbautyp „Wohnungsbau system 70“ (WBS 70) wurden bis 1990 insgesamt 644.900 Wohneinheiten umgesetzt.¹² Gemessen an der großen Zahl der Wiederholungen ist der Arbeitsaufwand der ursprünglichen Planung verschwindend gering. Der Vergleich zu der zentralisierten Planung in der DDR macht deutlich, dass sich Aufwand und Kosten für die Planung erheblich senken lassen, wenn der Wohnungsbau als industrielle Produktion begriffen wird und diese unabhängig von einzelnen Projekten und Anwendungsfällen geplant und durchgeführt wird. Natürlich erfordert eine zeitgenössische Architektur, vor allem aber die heutige kontextuelle städtebauliche Planung eine größere Anpassungsfähigkeit der Bausysteme, als dies mit dem sozialistischen System möglich gewesen wäre.

Dennoch ist es sinnvoll und notwendig, in Anbetracht des Wohnungsmangels zu neuen Planungs- und Baumethoden zu finden, die an den Ansatz der industriell-seriellen Fertigung anknüpfen. Zum einen kann bei vielen Bauaufgaben, etwa bei großmaßstäblichen Wohnsiedlungen, auch mit höherer Standardisierung gearbeitet werden. Zum anderen erlauben neue digitale Planungs- und Fertigungsprozesse auch einen hohen Grad der Individualisierung bei gleichzeitig höherem Grad der Automation. Im Sinne einer maximalen Vorfertigung wäre ein Wohngebäude nicht als individuell geplantes Einzelobjekt, sondern als standardisiertes Produkt oder System zu verstehen. Für die Bauteile eines Bausystems können die technischen Nachweise (Stand-sicherheit, Schallschutz, Brandschutz) als Typenprüfung erbracht werden. Die Erarbeitung der bautechnischen Nachweise würde vereinfacht, indem nur die bestehenden Einzelnachweise für die eingesetzten Bauteile zu einem System zusammengestellt werden müssen.

Dreidimensionale Systeme (3D) - Raummodule

In modularen Systemen können die einzelnen raumbildenden Module entweder tragend oder nichttragend ausgebildet sein. Sind die Raumzellen selbst nicht tragend, werden sie auf der Baustelle in ein separat gefertigtes Tragwerk hineingestellt. Tragende Module hingegen müssen auf der Baustelle nur noch zu einem Gebäude zusammengefügt werden. Dieses System ermöglicht einen extrem hohen Vorfertigungsgrad. Im Werk können bereits einen Großteil der Installationen getätigt werden, sodass die Arbeitszeit auf der Baustelle sehr kurz gehalten werden kann. Die Abmessung der Module wird durch den Transport eingegrenzt. Größere Räume müssen durch aneinanderreihen von mehreren Modulen hergestellt werden.¹³

Die Ikonen der industriellen Produktion von Wohnraum sind Modulbauten. So finden sich in der Architekturgeschichte zahlreiche Beispiele für kleinmaßstäbliche Modulbauten von Frank Lloyd Wright, Le Corbusier, Buckminster Fuller und den Smithsons, die auf eine Vervielfachung angelegt waren. Diese Gebäude sind wie ein Schiff, Flugzeug oder Automobil als geschlossene gebrauchsfertige Einheiten gedacht, die an jedem Ort installiert werden können. Durch den hohen Vorfertigungsgrad soll die Produktion ähnlich effizient wie in den anderen Industrien erfolgen. Das Problem dieser Konzepte ist, dass diese Module nie eine Produktion in solchen Stückzahlen erreicht haben, die die Skaleneffekte der anderen Industrien ermöglicht hätte: So ist die Herstellung der Fertighäuser noch immer eine standardisierte, aber weitgehend handwerkliche und nicht industrielle oder gar automatisierte Produktion.

Baukonstruktiv haben die Modulbauten auch Nachteile: Ein hoher Grad der Vorfertigung lässt sich nur erreichen, wenn die Module komplett vormontiert angeliefert werden. Daraus ergibt sich eine Beschränkung der Modulmaße für einen wirtschaftlichen Transport, was im Wohnungsbau zu einer kleinteiligen Struktur führt. Die Addition der Module führt zu einer Dopplung der Wände und Decken, die meist Mehrkosten zur Folge hat.

13 Staib, Gerald et al. (2008): Elemente + Systeme Modulares Bauen, Entwurf Konstruktion neue Technologien, Edition Detail, Basel: Birkhäuser Verlag.

GESCHICHTE - VERNAKULÄRE UND AUTOCHTHONE¹⁴ BAUWEISEN

Traditionelle Zimmermannsbauweisen aus vorindustrieller Zeit besitzen ein hohes Maß an Integrität: Material, Handwerk und Baukultur vereinen sich in einer Architektur von hohem Identifikationswert, Dauerhaftigkeit und Atmosphäre. Im Handwerk werden Formen, Techniken, Gestaltungen über Generationen weitergegeben und inkrementell weiterentwickelt. Die Tauglichkeit und gestalterische Qualität werden hier eher in Übereinstimmung mit den tradierten Formen produziert und beurteilt, denn als Innovation und Weiterentwicklung. Interessant für diese Studie sind dabei vor allem die Selbstverständlichkeit solcher Formen und Techniken in der Wahrnehmung und das gleichzeitig großen Potential zur Identitätsstiftung, das sich vor allem aus der Omnipräsenz solcher Formen sowohl im Alltag, aber noch stärker im kollektiven Unterbewussten speist. So beziehen sich die archetypischen Vorstellungen (was ist ein Haus, ein Tisch, ein Hammer...?) meist auf diese Formen. Der Bezug zu autochthonen, häufig regional sehr unterschiedlichen Bauformen und deren Identitätsstiftung ist dabei auch (oder vielleicht vor allem) wirksam, wenn diese durch den Lauf der Geschichte nicht mehr in der Lebenswirklichkeit der Menschen präsent sind. Die marxistische Theorie zeigt an dieser Stelle, dass die industriellen Formen, die die handwerklichen Traditionen und Formen in weiten Bereichen abgelöst haben, nicht nur in Hinblick auf die Produktionsbedingungen zu einer Entfremdung führen, sondern auch in Hinblick auf die Konstitution von kultureller Identität.¹⁵ Viele dieser Bauweisen sind auch das Ergebnis eines langen Optimierungsprozesses in Hinblick auf das lokale Klima und die verfügbaren Baumaterialien entstanden. Einen guten Überblick dazu bietet der Katalog zur Ausstellung 'Learning from Vernacular'¹⁶, welche die Ergebnisse eines Projekts von Prof. Frey Pierre an der EPFL Lausanne mit anschaulichen Modellen und Analysen weiterführend darstellt.

¹⁴ Den Begriff 'autochthones Bauen' hat Günter Pfeifer geprägt: Klima und Raum. Autochthone und kybernetische Strukturen, SUSTAINABLE BY DESIGN, Symposien, April 2011, Münster School of Architecture, <https://www.youtube.com/watch?v=MGq8yD9AnGA>

Begriffsdefinition: "Autochthone Art: Als autochthone (von altgriechisch *autós*, deutsch ‚selbst‘ und *chthón*, deutsch ‚Erde‘), einheimische oder indigene Art bezeichnet man in der Biologie Lebewesen, die im aktuellen Verbreitungsgebiet (Region, Biotop) entstanden sind (sich evolutionär gebildet haben) oder dort ohne menschlichen Einfluss im Zuge von natürlichen Arealerweiterungen eingewandert sind. In der Botanik spricht man beispielsweise bei Bäumen von autochthonen Arten oder bei Rebsorten von autochthonen Sorten." https://de.wikipedia.org/wiki/Autochthone_Art

¹⁵ Umberto Eco: "Form as Social Commitment" S. 123ff. The open work | Umberto Eco; translated by Anna Cancogni; with an introduction by David Robey. Translation of: *Opera aperta*. Translated by Anna Cancogni, Cambridge, Massachusetts, 1964.

¹⁶ Pierre Frey, Patrick Bouchain: "Learning from Vernacular : Pour une nouvelle architecture vernaculaire"; Lausanne, 2004.

Europäische Tradition des Holzbaus - Fachwerk und Blockbau

Holz ist schon immer einer der wichtigsten Baustoffe. In vorindustrieller Zeit war es der vorherrschende und baukulturell prägende Baustoff für Wohngebäude. So war die Fachwerkbauweise die baukulturell und technologisch wichtigste Bauform in vielen Städten Deutschlands (Beispiele vor allem im Süden sind Nürnberg, Freiburg, Tübingen, Heidelberg, Frankfurt, Mainz u.v.a.), Skandinaviens, Chinas, Japans und Koreas. Durch die Einführung neuer Baustoffe wie Beton, Stahlbeton, Stahl und industriell hergestellte Mauerwerksziegel, ist diese Tradition seit dem neunzehnten Jahrhundert abgerissen. Dies führte auch dazu, dass die Forschung in dem Bereich des zeitgenössischen Holzbaus lange vernachlässigt wurde. In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich das Interesse am Holzbau deutlich verstärkt, weil in der Schweiz, Österreich, Skandinavien und Kanada verstärkt an neuen Holzbauweisen gearbeitet wurde, die sich auch für mehrgeschossige Bauten eignen. Dennoch gibt es im Holzbau enorme Innovationspotenziale, die vor allem in Hinblick auf die ökologischen Vorteile abgerufen werden sollten. Dazu sind nicht nur technische Studien notwendig, sondern auch die Entwicklung von neuen Entwurfsmethoden und Gebäudetypologien, die dem Holzbau und seinen Eigenheiten Rechnung tragen.

Mit Beginn des Mittelalters und der Entstehung der Zünfte entwickelte sich seit dem 12. Jahrhundert eine bis heute anhaltende Handwerkstradition, die die Be- und Verarbeitung des Baustoffes Holz in den verschiedensten Richtungen über Jahrhunderte vorangetrieben hat. Mit zunehmender Werkzeugtechnologie infolge immer wieder auftretender Kriege konnte die Bearbeitung des Holzes in immer besserem Maße betrieben werden. Daraus entstand eine traditionelle Handwerkskunst, die sich einer Vielzahl an standardisierten Verbindungen der einzelnen Holzbauteile bediente und bereits im 15./16. Jahrhundert mehrgeschossige Wohngebäude und somit ganze Städte in Mitteleuropa entstehen ließ. Auch Holzverbindungen, die ohne metallische Verbindungsmittel hergestellt wurden, waren bis zur vorindustriellen Zeit die verbreitete Holzbautechnik.

Es dauerte allerdings noch ein paar Jahrhunderte mehr, bis diese Handwerkskünste und deren Verbindungen in diversen Fachbüchern textlich und bildlich aufgezeichnet wurden. Mitte/Ende des 19. Jahrhunderts im Zeitalter der Industrialisierung und beflügelt durch die Gründerzeit in den 1870er Jahren entstanden beeindruckende und sehr anschauliche Holzbaubücher (z. B. „Bautechnik Stade“), welche die historisch ausgeführten Zimmermannsverbindungen im Detail dokumentierten. Ausgehend von dieser großen Vielfalt an bewährten Holz-Knoten-Verbindungen wie Zapfen, Kämme, Schwalbenschwänze, Versätze usw. soll untersucht werden, welche dieser Verbindungen sich im modernen Bauwesen einfach und praxistauglich umsetzen lassen.

Die traditionellen Zimmermannsverbindungen dienten in früheren Jahrhunderten ausschließlich der Sicherstellung der Standsicherheit eines Bauwerks. Neben diesem rein statischen Aspekt müssen diese Verbindungen heutzutage alle Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit (Verformungen/Deformationen) der einzelnen Bauteile sowie des Gesamtbauwerks erfüllen und gleichermaßen ihre Tragsicherheit im Brandlastfall unter Beweis stellen.

Eine traditionelle Zimmermannsverbindung kann heute nur dann wirtschaftlich erfolgreich eingesetzt werden, wenn der maschinelle Abbund mittels modernster CNC-Maschinen diese Ausarbeitung zulässt. Ein handwerkliches Aus- und/oder Nacharbeiten ist aufgrund der hohen Personalkosten sowie der großen Ansprüche an die Verbindungen hinsichtlich Passgenauigkeit und der damit verbundenen Lastabtragung nicht zielführend.

Asiatische Bauweisen (am Beispiel Japans)

Es gibt eine lange Tradition für Skelettbauten aus Holz, vor allem im asiatischen Raum (China, Japan, Korea). Wichtiger Bezug für diese Forschung ist die Wohnarchitektur der Edo- oder Tokugawa-Zeit (1603-1868) in Japan. Sie ist ein Beispiel für eine handwerkliche Bautradition, die eine starke Wirkung auf die kulturelle Identität des Landes hatte. In der Tokugawa-Zeit wurden die Wohngebäude als reine Skelettbauten konstruiert, die durch vergleichsweise leichte Trennwände und vor allem Schiebewände (shoji) getrennt und verbunden werden konnten.

Die Wohnarchitektur entstand nach strikten handwerklichen Maßgaben, die sowohl die Konstruktion, als auch die Größe und Nutzung von Räumen in einem engen System definierten. Die Bauweise stellte gleichermaßen die Nutzbarkeit der Räume, wie auch die Gebrauchstauglichkeit und technische Eignung sicher. Durch diese homogenisierende Bautradition und durch das staatliche Verbot von Auslandskontakten wurde das traditionelle Bau-system in Hinblick auf Technik (vor allem den Holzbau) und die Raumwirkung (Architektur) in einem inkrementellen iterativen Prozess weiterentwickelt (im Gegensatz zu epochalen Neuerungen). Noch heute ist das prototypische Bild von japanischer Architektur durch diese Bauten geprägt. Eine umfassende Darstellung und Analyse der architektonischen, technischen und kulturellen Implikationen findet sich bei Heino Engel¹⁷. Im Gegensatz zu Repräsentationsbauten (Tempel, Schlösser) zielte diese Tradition nicht auf individuelle Architekturen, sondern eine Art Common-Sense des handwerklichen Bauens ab.

Jared Diamond erklärt in 'Collapse - How societies choose to fail or succeed' wie verschiedene traditionelle Gesellschaften an der Herausforderung einer nachhaltigen Wirtschaft scheitern oder sich an diesen weiterentwickelt haben. Als ein positives Beispiel nennt er die Holz-Bau-Tradition der Tokugawa Zeit, in dem eine drohende Entwaldung der Insel durch die Bautätigkeit und für Feuerholz, durch strikte Limits für den Verbrauch und die Bewirtschaftung der Wälder vermieden wurde.¹⁸ Auch wurde der Holzverbrauch durch die inkrementelle Weiterentwicklung der Konstruktionen gesenkt.

Interessant für diese Studie ist, dass die gesamte Primärkonstruktion innerhalb einer konstruktiven Logik abgebildet werden konnte. Auch sind die Gebäude als reine Skelettbauten entwickelt, was eine Herausforderung in Hinblick auf die Aussteifung darstellt, aber auch die Wohnpraxis mit hochflexiblen Grundrissen und Raumnutzungen begünstigte.

¹⁷ Heino Engel, *Japanese House: A Tradition for Contemporary Architecture*, North Clarendon, VT, 1964.
¹⁸ Jared Diamond, 'Collapse - How societies choose to fail or succeed'; New York 2005. Seite 298 ff

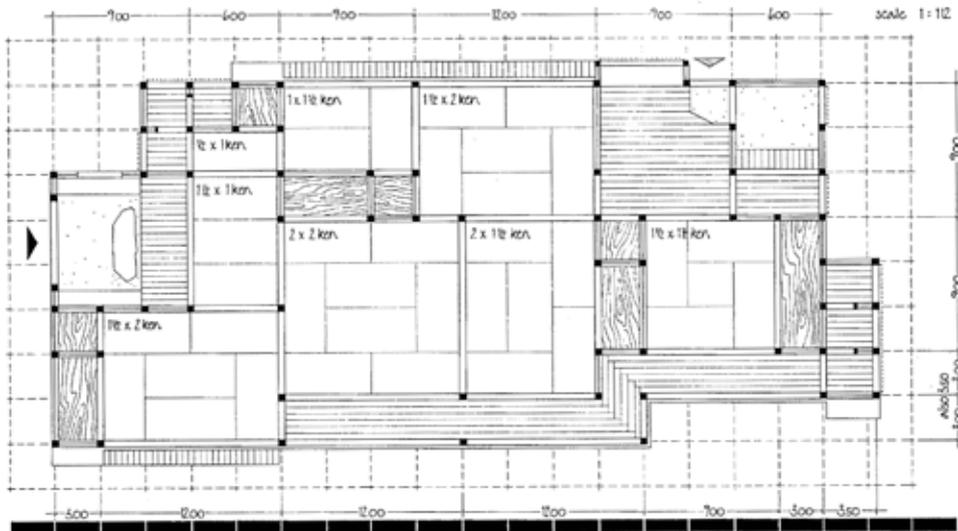
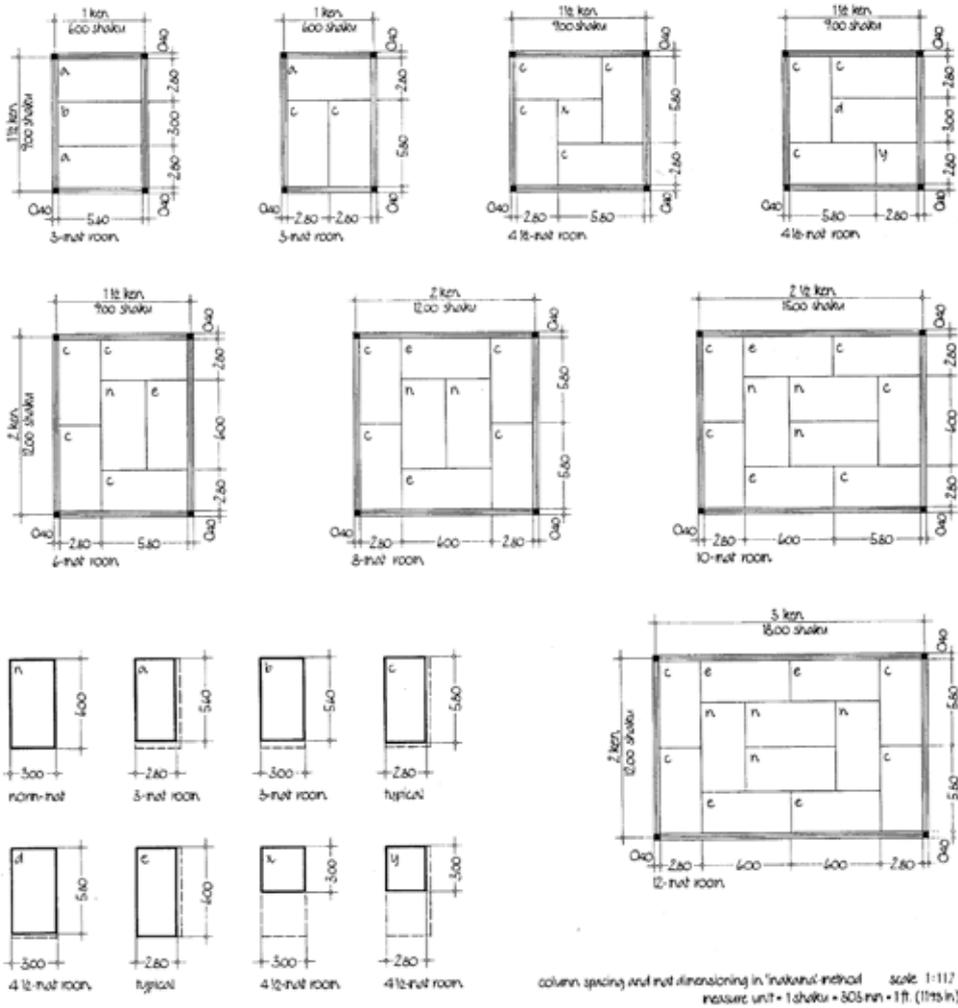


Abbildung 3:
The Japanese House: A Tradition
for Contemporary Architecture,
Engel, Heino; North Clarendon,
Vermont, 1964.

1 design in 'mukohi' method: column spacing on grid pattern, with columns placed on grid center
 module for grid system = 3.00 shaku = 110 mm = 3.6 ft
 measure unit = 1 shaku = 303 mm = 1 ft (11 15 in)
 total floor area = 52.15 tsuho = 105.2 sq m = 114.5 sq ft



STATUS QUO - AKTUELLE BAUSYSTEME FÜR WOHNUNGSBAU

Als Grundlage der Entwicklungsarbeit werden andere Bausysteme untersucht, die für den Wohnungsbau entwickelt wurden oder auch für den Wohnungsbau eingesetzt werden können. In diesem Kapitel werden aktuell am Markt verfügbare Bausysteme dargestellt und analysiert, die sich in Materialität und/oder der Flexibilität mit dem zu entwickelnden System vergleichen lassen. Ziel ist es, die Vor- und Nachteile der Systeme herauszuarbeiten und die Systeme mit dem zu entwickelnden System zu vergleichen. Die Studie kann an dieser Stelle keinen vollständigen Überblick über den Markt bieten, sondern muss sich auf einzelne Systeme beschränken, die repräsentativ auch für andere stehen.

Bei den Systemen, die einen niedrigen Integrationsgrad aufweisen, d.h. die nur einen kleinen Teil der Baukonstruktion und Gebäudetechnik abdecken, ergibt sich eine höhere Varianz zwischen den einzelnen Projekten bzw. Anwendungsfällen, weil ein größerer Teil der Gebäude eine individuelle Anpassung erfährt. Für die Studie und die Analyse wurden dann jeweils einzelne Anwendungsfälle beschrieben, die einen repräsentativen Charakter haben und/oder einen günstigen Anwendungsfall darstellen.

LUKAS LANG BUILDING TECHNOLOGIES

Hersteller / Systemgeber

Lukas Lang Building Technologies GmbH

Firmiengasse 7

1130 Wien

T +43 (0)1 512 60 78-0

F +43 (0)1 512 60 78-90

office@lukaslang.com

<https://www.lukaslang.com>

Planer

Lukas Lang, Architekt

Geschichte / Unternehmen

1995 beginnen der Unternehmer Hans-Christoph Prutscher und der Architekt Lukas Lang die Systementwicklung. 2003 und 2005 erste Demonstrationsbauten. Seit 2008 Beteiligung Hans-Peter Haselsteiners (Strabag).

Allgemeine Beschreibung

Ein Baukastensystem in Holzskelettkonstruktion mit kraftschlüssigen Stahlknoten und -verbindungen. Das System ist innerhalb des Rastermaßes von 1,40m flexibel. Die Deckenplatten werden auf deckengleichen Unterzügen gelegt, welche durch spezielle Metallverbindungen an den Stützen befestigt werden. Die Fassade besteht aus raumhohen Elementen, die vor das Skeletttragwerk gehängt werden.

Abbildung 7:
Lukas Lang Building Technologies GmbH



Integrationsgrad

- Schlüsselfertiges Bauen, alle Subsysteme integriert
- Das System ist komplett durchgeplant und besteht aus einem Katalog kombinierbarer Elemente und Komponenten.

Vorfertigungsgrad

Ca. 50%:

- Tragwerk wird mit allen Verbindern montagefertig angeliefert.
- Fassade und Ausbau folgen in Elementen
- Technik wird vor Ort installiert und verbunden

Einsatzbereich

- Einfamilienhäuser
- mehrgeschossiger Wohnungsbau
- Hotelgebäude
- Bürogebäude
- temporäre Gebäude

Tragwerk

Globales Tragwerk:

- Skelettbau, metallische Verbindungsmittel bestehend aus Trägern und Stützen

Vertikale Lastabtragung:

- Rund-Stützen, Träger, Decken aus Brettsperrholz

Horizontale Lastabtragung/Aussteifung:

- Decken wirken als Scheiben
- Aussteifung durch Stahlseile/ Auskreuzung

Lokales Tragwerk/Verbindungsmittel, Anschluss-details:

- Stahlknoten und Balkenschuhe aus Stahl

Abbildung 8:
Lukas Lang Building Technologies GmbH



Material

- Träger und Stützen aus Brettschichtholz BSH
- Decken aus Brettspertholz
- Knoten und Stützen aus Stahl, beschichtet

Ausbau

- Wandtafeln und Deckenelemente vorgefertigt
- Bauteilkatalog

Fassade

- Fassaden als vorgefertigte Tafeln angeliefert und inkl. Fenstern und fertigen Oberflächen eingebaut

Geometrie

- Das System basiert auf einem Rastermaß von 140cm. Alle Grundrisse sind auf einem Vielfachen des Rasters aufzubauen.

Rückbaubarkeit

Rückbaubare Konstruktion mit geschraubten Verbindungen an den metallischen Knotenpunkten. Die Trennung von tragenden und raumbildenden Bauteilen ermöglicht, dass in der Skelett-Konstruktion Ausbau und Fassade leicht austauschbar sind. Die Modularisierung des Bausystems ermöglicht eine Wiederverwendung von Bauteilen in neuen Gebäuden.

Flexibilität

- Die Skelett-Konstruktion ermöglicht leichtes Versetzen von Trennwänden und Austausch von Fassaden.

Besonderheiten

- Die Planung wird durch eigene Software-Module unterstützt.

Abbildung 9:
Lukas Lang Building Technologies GmbH; Montage Fassade.

**Referenzbeispiel**Temporäres Parlament Wien

Für das Tragwerk wurden rd. 1.350m³ Holz benötigt, die in ca. 500 Holzsäulen, 5.500 Holzträger und 6.600 Deckenelemente verbaut wurden. 150.000 Schrauben, um die Elemente miteinander zu verbinden. Zusätzlich ca. 500 Stahlsäulen und rd. 80 Stahlträger. 1.274 Fassadenelemente, davon ca. 690 Fensterelemente und 19 Eingangsportal. Im Innenausbau wurden ca. 2.800 m Innenwand mit rd. 340 Innentüren und 8.500m² Doppelboden verbaut.

Kritische Würdigung / Relevanz für diese Forschung

Das Bausystem ‚Lukas Lang Building Technologies‘ ist am ehesten mit der Absicht des zu entwickelnden Bausystems zu vergleichen, indem auch alle Teile des Bauwerks vorgefertigt und alle Subsysteme integriert werden.

Es lassen sich zwei wesentliche Unterschiede feststellen:

- Das System basiert auf einer großen Anzahl an Stahlverbindern (Trägeranschluss, Stützenkopf, Aussteifungen).
- Die Bauteile sind in einen strengen Maßsystem normiert und nur als Vielfaches dieser vorgegeben Grundmaße können die Gebäude geplant und errichtet werden.

Abbildung 10:

Lukas Lang Building Technologies GmbH; Temporäres Parlament, Wien, Bauherr Parlamentgebäudesanierungsgesellschaft m.b.H., Auftraggeber STRABAG AG, Baufertigstellung 21.04.2017.



ZÜBLIN LENO

Hersteller / Systemgeber

Züblin Timber
 MERK Timber GmbH Industriestraße 2
 86551 Aichach
 Germany
 T +49 9201 799 636
 www.zueblin-timber.de

Planer

Diverse, projektabhängig

Geschichte / Unternehmen

Züblin Timber ist eine Beteiligungsgesellschaft der Ed. Züblin AG, an der wiederum die österreichischen Strabag AG beteiligt ist. Aus diesem Zusammenhang heraus versteht auch die Züblin Timber sich im Kern als Baufirma und konzentriert sich in ihrer Tätigkeit auf das Baugeschäft. Dadurch unterscheidet sich die Züblin von anderen Mitbewerbern, die ähnliche Produkte und Dienstleistungen anbieten, sich aber eher als Hersteller begreifen. Vor kurzem wurde die Merk Holzbau von der Ed. Züblin AG aufgekauft und firmiert seit 2017 unter Züblin Timber.

Kern der Produktion am Standort Aichach ist eine Anlage zur Herstellung von Brettsperrholz, die in den 90er Jahren entwickelt und 1995 auf den Markt gebracht wurde. Damals wurde das Brettsperrholz unter dem Produktnamen „Steco“ vermarktet. In 1995 war Züblin Timber (Merk) mit 6.000m³ Produktionsleistung der Weltmarktführer. Inzwischen ist der Weltmarkt auf 600.000m³ in 2017 angewachsen. Für 2020 rechnet Züblin Timber mit einem weiteren Zuwachs auf dann 1.000.000m³. Durch die Einführung von massiven Holzelementen, die für Wände und Decken wurde perspektivisch neue Märkte für den Holzbau erschlossen: Insbesondere der für diese Studie wichtige mehrgeschossige Wohnungsbau. So waren in Deutschland mehrgeschossige Holzgebäude aufgrund der restriktiven Brandschutzvorschriften auf Gebäude mit drei Wohngeschossen beschränkt (Gebäudeklasse III).

Allgemeine Beschreibung

Bei Züblin Timber werden grundsätzlich beide Bauweisen (2D und 3D) umgesetzt. Die Wahl des Systems hängt von Bauaufgabe, Entwurf und Ausstattungsgrad ab.

Modulbau (3D)

- HoheTransportvolumen(Kosten)
- Sinnvoll bei hohem Installationsanteil (Hotels,Bäder)
- hohePräzision,niedrigeFehlerquote

Elementbau (2D)

- geringereTransportkosten
- Montageaufwand,Kran-Zeiten,Fehlerquote

Integrationsgrad

Das System „Leno“ wird vom Hersteller als Bausystem vermarktet und weist eine Reihe von Merkmalen auf, die eine Einordnung als Bausystem zuließen:

- Standardisierte Materialien mit Prüfzeugnissen
- erprobte Planungs- und Fertigungsprozesse mit einem potentiell hohen Integrationsgrad
- Detail- und Bauteilkatalog mit Lösungsmöglichkeiten für die typischenBauteile und Anschlüsse.

Gleichzeitig handelt es sich um ein offenes System, das zum einen bei jedem Projekt unterschiedlich eingesetzt und detailliert werden kann (und meist auch wird). Zum anderen lassen sich auch andere Komponenten und Bauweisen (Stahlteile, Holzstützen, Brettschichtholz/Leimbinder, Holz-Beton-Decken) integrieren und kommen regelmäßig in den Konstruktionen zum Einsatz. Vor allem aber wird jedes Projekt individuell geplant und gefertigt, weswegen sowohl der Wiederholungseffekt als auch die Automatisierung der Fertigung gering sind.

Dennoch werden Ausführungsplanung und Werkstattplanung durch den Hersteller unterstützt und auf die Fertigung hin optimiert. Dadurch werden die Planung und die Fertigung optimiert.

Vorfertigungsgrad

Ca. 30

Aus den Rohwänden und Decken werden im nächsten Arbeitsschritt montagefertige Elemente oder auch Raummodule gefertigt. Der Grad der Vorfertigung variiert dabei von Projekt zu Projekt. Bei den am weitesten ausgebauten Elementen werden die Wand-Elemente mit Fenstern, Außenfassade und Innenverkleidung ausgebaut und auf der Baustelle montiert. Häufiger werden aber die äußeren und inneren Schichten erst auf der Baustelle aufgebracht, um den Aufwand für die Verpackung zu reduzieren und die Elemente robuster zu halten für Transport und Einbau.

Einsatzbereich

- Einfamilienhäuser (Leno-System)
- mehrgeschossiger Wohnungsbau
- Hotelgebäude
- Bürogebäude

TragwerkGlobales Tragwerk:

- Massivbau mit tragenden Wänden und Decken aus Brett-Sperrholz (BSP)

Lokales Tragwerk/Verbindungs-mittel, Anschluss-details:

- Befestigung mit metallischen Verbindern (MERK-Verbindungstechnik) meist Vollgewindeschrauben.

Material

- Primärbaustoff: Brett-Sperrholz (BSP) und Brett-Schicht-Holz (BSH)
- Sekundärbaustoff: unterschiedlich, projektabhängig.

Ausbau und Fassaden

- Unterschiedlich, projektabhängig.
- meist Elementbauweise mit Fenstern und Fassade im Werk

Geometrie

- Unterschiedlich projektabhängig,
- kein festes Raster.
- Maximal Maße nur durch Transport begrenzt weil Abbund bis 25m möglich

Rückbaubarkeit

- Unterschiedlich projektabhängig
- keine lösbaren Verbindungen.

Zwar kommen vor allem Schraubverbindungen zum Einsatz, diese werden aber versenkt im Material und verdeckt verbaut, sodass eine zerstörungsfreier Rückbau meist nicht möglich ist.

Flexibilität

- Gering, die Bauweise mit massiven flächigen Bauteilen und nicht-lösbaren Verbindungen ist nicht

Besonderheiten

- Standardisierte Bauteile
- Nachweise und Unterstützung durch Software des Herstellers: Software für die Bemessung von Bauteilen aus Brettsperrholz als DC-Statik-Modul

Abbildung 12:
Beispielkonstruktionsdetails Wandverbindungen. Anschluss Innenwand-Außenwand; Wandstoß; Eckverbindung Außenwand

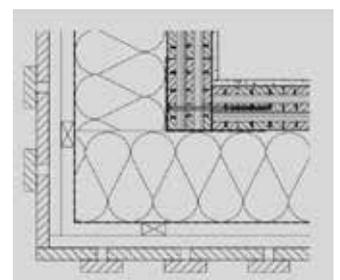
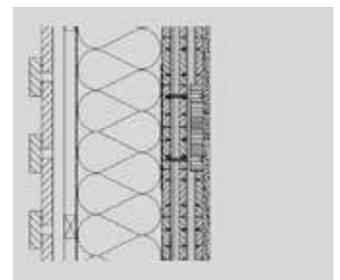
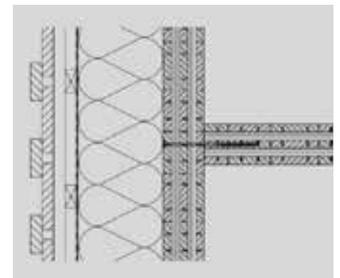


Abbildung 11:
LENO-Brettsperrholz. Massive großflächige Elemente ohne Rasterbindung.



Referenzbeispiel

Wohnpark Speyer West

- Ort: Speyer, Deutschland
- Baujahr 2016
- Architekt Christoph Schneider, München
- Ingenieur Ingenieurbüro von Fragstein, Landau
- Verwendete Produkte LENO-Brettsperrholz, Fassade
- Leistung Schlüsselfertige Erstellung des Gebäudes inkl. der Planungsleistung
- Typ Mehrgeschosser
- Auftragswert ca. 4,9 Mio. €

ZÜBLIN war von Beginn an eng in die Planung des Projekts einbezogen und auch für die Koordination der planerischen Zusammenarbeit zuständig. Für den in Holzmassivbauweise um einen aussteifenden Stahlbetonkern errichteten, 4- und 5-geschossigen Wohnpark wurden 5.200m² LENO-Brettsperrholz verbaut.

Kritische Würdigung/Relevanz für diese Forschung

Züblin Timber versucht nicht eine generelle und übertragbare Systemlösung für unterschiedliche Bauaufgaben zu entwickeln, sondern bestimmte technische Details und Planungsprozesse so weit zu standardisieren, dass sich der Aufwand in der Planung und Ausführung individueller Bauvorhaben drastisch verringert. Dieses Vorgehen ist weniger als ein Bausystem in dem in diesem Vorhaben definierten Sinne zu verstehen als vielmehr als eine Optimierung von Prozessen in Hinblick auf die sich wiederholenden Fragestellungen.

Gleichzeitig trägt dieser Ansatz der Tatsache Rechnung, dass im Bauen die Bandbreite an Bauaufgaben und unterschiedlichen Rahmenbedingungen so groß ist, dass sich standardisierte Lösungen nur selten einsetzen lassen und sich bis dato auch eher in Nischenmärkten (zum Beispiel Modulbauten für temporäre Nutzungen oder Einfamilien-Fertighäuser) haben etablieren können.

Für die vorliegende Entwicklung ist dieser Ansatz insofern relevant, als dass das Bausystem derzeit auch als Vorgabe für die Planung verstanden werden kann. Für die Umsetzung eines Gebäudes mit dem Bausystem ist keine spezifische Produktion oder die Herstellung bestimmter Bauteile in großer Zahl erforderlich. Die Ausführung kann von jedem größeren Zimmereibetrieb problemlos umgesetzt werden. Eine solche niederschwellige Implementierung ohne Anfangsinvestition wäre der schnellen Verbreitung des Systems zuträglich.

Abbildung 13:
Wohnpark, Speyer West



KAUFMANN BAUSYSTEME

Hersteller / Systemgeber

Kaufmann Bausysteme
GmbH

Vorderreuthe 57

A 6870 Reuthe

T +43/5514/31440-0

info@kaufmannbausysteme.at

https://kaufmannbausysteme.at

Planer

Unterschiedlich,
projektabhängig

Kaufmann Holzbausystem steht stellvertretend für andere Hersteller und Systeme, die vergleichbare Lösungen anbieten. Raummodule werden nicht nur aus Holz, sondern auch aus Beton und Stahl gefertigt. Das hier gewählte System wurde als Beispiel ausgewählt, weil es auch mit Massivholz (Brett-Sperrholz (BSP)) als Primärbaustoff konstruiert wird.

Geschichte / Unternehmen

Josef Kaufmann gründete 1952 er die Zimmerei und Brett-schichtholzfertigung. Ein halbes Jahrhundert später erfolgte eine strategische Neuausrichtung auf Planung und den Bau von Hallen, Fassaden, Modulen und Hochregalen aus Holz, sowie auf die Umsetzung von Wohnbauprojekten.

Allgemeine Beschreibung

Modulbauweise

Maximale Vorfertigung mit minimalen Arbeiten auf Baustelle:

- Serielle Fertigung und Ausführung aller Installationen im Werk
- Hohe Ausführungsqualität
- Schlüsselfertige Produktion
- Ständige Qualitätskontrolle
- Handwerker aller Gewerke arbeiten Hand in Hand
- Sehr kurze, witterungsunabhängige Montage
- Höchste akustische Standards
- Angeliefert, schnell versetzt und sofort beziehbar

Neben reinen Modulbauten werden auch Kombinationen aus Modulen und Elementen eingesetzt.

Integrationsgrad

Zielvorstellung von Kaufmann Holzbausysteme ist der Modulbau / Schlüsselfertiges Bauen

- Gemeinsame Entwicklung mit Architekt und Bauherr
- Terminplanung
- Logistik und Organisation Transport
- Übergabe an den Bauherrn
- Beratung und Unterstützung als Teil-GU oder Generalunternehmen
- Master- / Ausführungs- / Detail- und Werkstattpläne
- Projektkoordination, Bauleitung, Montageüberwachung

Vorfertigungsgrad

Ca. 80%

- Module werden bezugsfertig angeliefert
- Vor Ort werden sind nur noch die Montage und geringe Modifikationen notwendig

Einsatzbereich

- mehrgeschossiger Wohnungsbau
- Hotels
- Schulen
- Büros
- Kindergärten
- Wohnheime

Tragwerk

- Tragende Raummodule aus Brett-SperrholzMaterial
- Projektabhängig, unterschiedliche Lösungen
- Hauptsächlich: Brett-Sperrholz, häufig kombiniert mit anderen Konstruktionen wie Holz-Beton oder Holz-Ständer-Wänden.

Ausbau

- Projektabhängig, unterschiedliche Lösungen
- Meist Holz-Rahmenbau und Trockenestrich

Fassade

- Projektabhängig, unterschiedliche Lösungen

Geometrie

Die Größe des Moduls ist maßgeblich bestimmt von den Möglichkeiten des Transports, die wiederum auf die Kosten Auswirkungen haben. Im Allgemeinen wird versucht, Transporte mit Begleitfahrzeugen zu vermeiden, weswegen die Module meist nur bis 3,00m Breite gebaut werden.

Die Länge der Module ist beim Holzbau im Gegensatz zum Betonbau nicht unbedingt durch das Gewicht beschränkt, weswegen Module bis 12m und 15m gebaut und transportiert werden können.

Rückbaubarkeit

Rückbaubare Konstruktion mit geschraubten Verbindungen an den metallischen Knotenpunkten. Die Trennung von tragenden und raumbildenden Bauteilen ermöglicht, dass in der Skelett-Konstruktion Ausbau und Fassade leicht austauschbar sind. Die Modularisierung des Bausystems ermöglicht eine Wiederverwendung von Bauteilen in neuen Gebäuden.

Flexibilität

Die Flexibilität der Modulbauten ist durch die Größe und Unterteilung bestimmt (s.o. Einsatzbereich). Wenn die Module einzelne Raumzellen bilden, die durch Trennwände mit tragender oder schallschutztechnisch relevanter Funktion getrennt sind, ist eine Verbindung der Module nicht möglich.

Bei den einseitig oder beidseitig offenen Raummodulen lassen sich auch flexiblere Grundrisse erreichen, die ein Zusammenschalten der Module zu größeren Räumen und andere Grundrissaufteilungen zulassen.

Da Raummodule aber vor allem dann zum Einsatz kommen, wenn kleinere und abgeschlossene Räume gebaut werden (Wohnheime, Hotels), ist die Flexibilität zwischen den Räumen meist gering.

Besonderheiten

Hoher Vorfertigungsgrad und kurze Bauzeit

Abbildung 14:
Montage der Raummodule,
Kaufmann Bausysteme



Abbildung 15:
Fertigung Module Das Bader Hotel,
Parsdorf, Kaufmann Bausysteme



ReferenzbeispielBMW Hotel Alpenhof, Ammerwald

- Bauherr: BMW Group
- Architekt: Olk I RUF ZT GmbH
- Steinebach, AT- 6850 Dornbirn
- Das Projekt wurde als ARGE mit der Zimmerei Michael Kaufmann durchgeführt. Die gesamten Boxen wurden in der Zimmerei Michael Kaufmann gefertigt.
- Technische GF - Michael Kaufmann
- Kaufmännische GF - Ing. Anton Kaufmann

Beschreibung:

Gesamtanzahl 96 Boxen, Abmaße 5,5m x 4,50.

Die Hotelzimmer werden als komplett fertige Module im Werk vorgefertigt und am Bau direkt vom LKW montiert.

Konstruktion:

- Untergeschoß bis zum ersten Obergeschoss aus Stahlbeton
- Die Module/ Boxen werden konstruktiv mit Brettsperrholzplatten (kurz BSP) gefertigt. Brettsperrholzplatten sind großformatige massive Holzplatten die aus mehrschichtig mit kreuzweise verleimten Brettlamellen bestehen.
- Außenwände, Decken-/ und Bodenelemente aus BSP, Industriesicht, Wand und Decken sichtbar, geölt inkl. aller erforderlichen Verbindungsmittel und Stahlteilen
- Bodenaufbau: die konstruktiven Bodenelemente sind zugleich Fußboden.

- Trennwandelement Zimmer/ Bad/ WC aus 3-Schichtplatten Fichte, verglaste Zugangstüre mit satiniertem Streifen
- Bad/ WC: Bodenbelag sowie Wandverkleidungen werden COELAN beschichtet inkl. Fugen und Abdichtungsarbeiten
- Eingangstür Oberfläche in FI inkl. Drücker und Key-Card- System
- Fensterelemente, 3 Fensterelemente mit Kippflügel, 2-fach verglast (U-Glas 1,0 W/m²K)

Allgemeine Leistungen:

- Werkstattplanung
- Statik Holzmodule
- Fassadengerüst
- Spezialtransporte inkl. Montage

Kritische Würdigung/Relevanz für diese Forschung

Die Firmenphilosophie von Kaufmann Bausysteme ist in Hinblick auf den Integrationsgrad vergleichbar mit dem Anspruch von Lukas Lang Building Technologies: Auch hier sollen alle Teile und Subsysteme aus einer Hand gefertigt und geliefert werden. Der Unterschied liegt darin, dass das System offen ist in Hinblick auf die Konstruktion und die Komponenten und eine große Reihe an unterschiedlichen Bauweisen zur Ausführung kommen.

Für unsere Forschung ist vor allem der hohe Integrationsgrad der Planung und der Fertigung interessant. Sollte ein ähnlicher Grad der systematischen Integration erreicht werden, würde das die Marktchancen des System deutlich verbessern.

Abbildung 16:
BMW Hotel Alpenhof, Ammerwald
Kaufmann Bausysteme



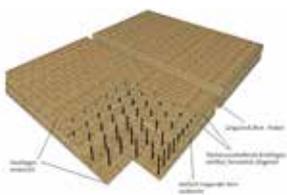
BAUSYSTEME AUS VOLLHOLZ OHNE METALLISCHE VERBINDUNGEN UND OHNE LEIM

Mit einem zu der vorliegenden Systementwicklung vergleichbaren Impuls sind eine Reihe von Herstellern in den letzten Jahrzehnten angetreten, um den Anteil an metallische Verbindungen oder Verleimung im Holzbau zu reduzieren oder deren Einsatz ganz zu vermeiden. Weil insgesamt drei Hersteller mit relevanten Systemen am Markt vertreten sind, kann hier nur ein kurzer Überblick über die jeweiligen Systeme gegeben werden.

Die Entwicklungen beziehen sich dabei meist auf den Primärbaustoff: Brett-Sperrholz oder Brettschichtholz werden ersetzt durch mechanisch gefügte Baustoffe. In allen System wird jedoch die Grundidee des Brett-Sperrholzes fortgeführt, indem aus kleineren Brettern, die in mehreren

gegeneinander verschränkten Lagen geschichtet werden, großformatige Platten für Wände, Decken und Dächer gefertigt werden. Im Unterschied zu Brett-Sperrholz, bei dem die Lagen verleimt werden, werden die Lagen jedoch mechanisch verbunden. Dabei sind zwei Typen zu unterscheiden: Bei der ersten Gruppe von Systemen, werden die Lagen mit Buchendübeln verbunden. Die Dübel werden technisch getrocknet und mit einer geringen Holzfeuchte von ca. 6% eingebaut. Beim Einbau gleicht sich diese an die Holzfeuchte des umgebenden Holzes auf 12% bis 15% an. Die Dübel quellen dabei auf, wodurch ein fester Verbund entsteht.

Abbildung 17:
Holz100, BauteilkatalogW, Ing. Erwin Thoma Holz GmbH, Hasling 35, 5622 Goldegg, Österreich, Version April 2017, Quelle: https://www.thoma.at/cms/wp-content/uploads/2017/02/holz100_bauteilkatalog_april2017-1.pdf, Zugriff 6.12.2018.



Thoma-Holz100

Durch die mechanische Verbindung von Bretterlagen mit Holzdübeln stellt die Firma Thoma einstoffliche Plattenelemente her, die ohne Verleimung oder chemische Behandlung auskommen. Durch hohe Qualitätsmaßstäbe bei der Wahl eingesetzter Hölzer wird eine hohe Tragfähigkeit gewährleistet und auch möglichem Schädlingsbefall vorgebeugt.

Abbildung 18:
Funktionsprinzip Vollholzwand; Systemhandbuch S. , holzius GmbH, Kiefernainweg 96 I-39026 (BZ) – Prad am Stilfserjoch, www.holzius.com, Quelle: <https://www.holzius.com/de/menschen/downloads/>, Zugriff 6.12.2018.



Firma Holzius

Auch die Firma Holzius arbeitet mit geometrisch gefügten Holzprofilen, Wand- und Deckenbauteilen. Hier werden parallele Holzprofile eingesetzt, die durch orthogonal verlaufende Keilleisten zusammengehalten werden (Funktionsprinzip „Verkämmen“ und „Vergraten“). Vorteil dieser Bauweise ist die einheitliche Tragrichtung der Profile für einachsige gespannte Konstruktionen oder Wände, bei denen die Profile alle längs zur Faserrichtung belastet werden.

Abbildung 19:
Das Mondhaus in Alpnach. Regina und Stephan Küng, Alpnach, Seiler Linhart Architekten, Luzern / Sarnen, Küng Holzbau AG, Stephan Küng, Alpnach



Holzpur Holzbaufirma Küng

Bei der Herstellung von Holzpur-elementen der Firma Küng werden Bretter kreuzweise geschichtet und an den Kreuzungspunkten mit Holzdübeln verbunden. So entstehen hochsteife Plattenelemente im weiteren Abbund für den Einsatz von bis zu fünfgeschossigen Gebäuden ohne Stahlverbindungsmittel verarbeitet werden können.

WOODCUBE IBA HAMBURG 2013

Hersteller: Thoma

Einsatzbereich: Einfamilienhäuser, Wohnungsbau, Hotels

Tragwerk: Massivholz; flächig

System: offen

Bauherr: DeepGreen Development

Planer: Institut für urbanen Holzbau, Philipp Koch

Standort: Hamburg, Wilhelmsburg

Baujahr: 2013

Bauzeit: Rohbau 4 Wochen

Nutzung: Wohnen, 8 Wohneinheiten

Geschosse: 5

Für den Einsatz dieser Systeme in einem mit dem entwickelten System vergleichbaren Einsatzbereich (mehrgeschossiger Wohnungsbau) wird das Projekt Woodcube als Beispielgebäude gezeigt.

Beschreibung der Konstruktion

Wände, Decken und Dach bestehen aus vorgefertigten Massivholzplatten der Systembauweise Thoma-Holz100 (Kreuzlagenholz, dessen horizontalen, vertikalen und diagonalen Schichten, mechanisch durch Holzdübel zusammen gehalten werden). Die Verbindung der Elemente untereinander erfolgt dann jedoch mittels metallischen Verbindungsmitteln. Der Erschließungskern, der aus brandschutztechnischen Gründen aus Stahlbeton gefertigt ist, steift das Gebäude aus. Von dort spannen 23 cm dicke Massivholzdecken über 6 m, stützenfrei, bis zu den tragenden Außenwänden. Diese haben einen Wandaufbau von 32 cm inkl. 3 cm Holzfaserdämmplatten. Durch den Verzicht auf Stützen ist eine hohe Flexibilität des Grundrisses möglich. So teilen

nichttragende Metallständer-Leichtbauwände die 1370 m² Wohnfläche in acht unterschiedliche Wohneinheiten mit einer Größe von 70-190 m² ein. Bei sich änderndem Platzbedarf lassen sich die Wände ohne großen Aufwand umsetzen.

Der hohe Vorfertigungsgrad der Elemente ermöglichte ein Errichten des Rohbaus in nur vier Wochen.

Kritische Würdigung / Relevanz für diese Forschung

Für die Entwicklung des Bausystem sind die genannten Anbieter vor allem als Material-Lieferant interessant. Im Sinne der Ökologie ist Vermeidung von Sekundärstoffen wie Klebern und Leimen im Holz wünschenswert. Deswegen wäre es konsequent, statt konventionellen Brettschichtholz BSH und Brettspertholz BSP leimfreie Holz-Holz-Produkte einzusetzen.

In Hinblick auf die Fügung der Bauteile kann das hier vorgestellte Bausystem als komplementär zu den Holz-Holz-Baustoffen gesehen werden: Wenn man leimfreie Holz-Holz-Produkte mit den neu entwickelten form- und kraftschlüssigen Verbindungen kombiniert, dann ergibt sich eine sortenreine Bauweise aus Vollholz.

Abbildung 20:
Woodcube IBA Hamburg 2013

Abbildung 21:
Woodcube Deckenverlegung



SYSTEMENTWICKLUNG

RAHMENBEDINGUNGEN UND DEFINITION DES UNTERSUCHUNGSRAUMS

Die Arbeit ist als explorative Studie angelegt, in der eigene Entwürfe und Projekte betrachtet und die Ergebnisse der Untersuchung qualitativ und quantitativ analysiert werden. Ziel ist dabei nicht nur die Ausarbeitung einzelner Anwendungsfälle, sondern vor allem die Entwicklung eines Bausystems, an die eine Analytik gekoppelt ist. Die Forschung hat technische, baukonstruktive Aspekte. Es wird aber auch die Interaktion zwischen dem Bausystem, dem Entwurf und der Nutzung des Gebäudes mit entwerferischen Mitteln untersucht werden.

Die Untersuchung wurde wie folgt eingeschränkt:

- **Es werden orthogonale System untersucht.**
- **Es werden nur Systeme untersucht, die auf einer homogenen Geometrie basieren: Die Räume haben die gleiche Größe.**
- **Das System wird in Hinblick auf eine Wohnnutzung untersucht.**

DEFINITION DER NUTZUNG: WOHNEN

Das Bausystem wird ausschließlich im Hinblick auf die Eignung für den Wohnungsbau untersucht. Diese Einschränkung dient dazu, die Methodik für die Prüfung der Funktionstauglichkeit geeignet zu vereinheitlichen, indem dem Grunde nach gleiche und relativ gut zu beschreibende Funktionen untersucht werden sollen.

Im Wohnungsbau sieht die Forschung auch den größten Entwicklungsbedarf für flexible Bauformen und Bausysteme. Während sich im Verwaltungsbau schon lange flexible Systeme mit wenigen tragenden und aussteifenden Wänden durchgesetzt haben, die eine unterschiedliche Aufteilung der Geschosse zulassen, werden Wohnungsbauten derzeit meistens in Massivbauweise errichtet und mit tragenden und aussteifenden Wänden, die Anpassung oder Veränderung der Grundrisse erschwert oder verunmöglicht.

In den sich schnell ändernden Anforderungen an Wohnungsbauten spiegelt sich eine zunehmende Diversifizierung der Gesellschaft wider: Die Auflösung und/oder schnellere Umbildung traditioneller Familienstrukturen, Vermischung von Arbeiten und Wohnen, Entwicklung von neuen gemeinschaftlichen Wohnformen. In einem parallel laufenden Forschungsprojekt werden solche neuen gemeinschaftlichen Wohnformen untersucht und die Wohnfunktionen und Nutzungsintensität beschrieben.¹⁹

Die Ergebnisse der vorliegenden Forschung lassen sich in Teilen auch auf Verwaltungsbauten übertragen, wobei im Einzelnen zu prüfen ist, ob die Anforderungen und Lastannahmen denen des Wohnungsbaus entsprechen.

¹⁹ "Wohnformen. Vergleichende Untersuchung zu gemeinschaftlichen und individuellen Wohnbedürfnissen", ZukunftBau Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), SWD-10.08.18.7-17.47; Gesellschaft für empirische Sozialforschung und Kommunikation mbH | Survey Research & Evaluation, Humboldt-Universität, Institut für Sozialwissenschaften, Prof. Dr. h. c. Bernd A. Wegener im Verbund mit DGJ Architektur GmbH, Laufzeit, 2017-2019.

GEOMETRISCHE UND GEBÄUDEKUNDLICHE PARAMETER

In diesem Abschnitt werden die Annahmen in Hinblick auf die geometrischen und gebäudekundlichen Parameter erklärt, innerhalb derer das System entwickelt wurde.

Geometrie // Orthogonalität

In dieser Systementwicklung wurden ausschließlich rechtwinkelige Geometrien untersucht, um die Vergleichbarkeit der Fallbeispiele zu erhöhen. Für eine rechtwinkelige Geometrie gibt es eine Reihe von praktischen Gründen, die die Material-Effizienz eines Bausystems erhöhen. Holz und Holzwerkstoffe werden als rechtwinkelige Stäbe oder rechtwinkelige Platten hergestellt und geliefert. Jede Abweichung von dieser Grundgeometrie führt notwendig zu Verschnitt und höheren Kosten. Aber auch im Entwurf und der Baukonstruktion ergibt die rechtwinkelige Geometrie eine kohärente Struktur vor, die zu immer gleichen Anschluss-Details führen, die sich systematisch innerhalb eines Systems lösen und wiederholen lassen. Die Forschung geht davon aus, dass sich durch eine rechtwinkelige Geometrie die effizientesten Systeme erreichen lassen. Gleichzeitig kann in dieser Forschung kein Nachweis für diese Annahme erbracht werden, weil die vergleichenden Untersuchungen fehlen.

Gleichzeitig ergeben sich aus der Orthogonalität auch Einschränkungen für den Entwurf, sowohl was die mögliche Form und Geometrie der Räume betrifft, als auch die Anpassung an die Geometrie und Größe der verfügbaren Grundstücke. Würden in der Studie Gebäude unterschiedlicher Geometrien (nicht-rechtwinkelig, ungleichmäßig) verglichen, so würden die Analyse-Ergebnisse auf die Unterschiedlichkeit der Geometrien, nicht aber auf die Wechselwirkung von Entwurf, Konstruktion und Nutzung zurückzuführen.

Gebäudehöhe, Geschosshöhe

Das Bausystem wurde für den Wohnungsbau unterhalb der Hochhausgrenze von 22m für die oberste Geschossdecke entwickelt. Es werden derzeit weltweit zahlreiche Hochhäuser in Holzbauweise auch zu Wohnzwecken errichtet. Bei diesen Gebäuden handelt es sich aufgrund der hohen Anforderungen an den Brandschutz und die Standsicherheit aber um Hybridkonstruktionen mit einem unterschiedlich hohen Anteil an Beton und/oder Stahl. Diese Mischungen sollen in der zu entwickelnden Bauweise vermieden werden, weswegen zunächst keine Hochhäuser untersucht wurden.

Wie in den Fallbeispielen in Weimar (dgj236 IBA Weimar) und Frankfurt (dgj228 WGF Wohngruppe Frankfurt) gezeigt werden wird, lässt sich das Bausystem auch mit einem Treppenhaus aus nicht-brennbaren Materialien (Stahlbeton, Mauerwerk) kombinieren. Diese Bauweise ließe sich grundsätzlich auch auf ein Hochhaus übertragen.

Auch das Rechentool ist auf Gebäude unterhalb der Hochhausgrenze (oberste Geschossdecke maximal 22m über Gelände) und damit auf eine Anzahl von ca. 8 Geschossen und 25 m beschränkt. Bei höheren Geschossen reduziert sich die Anzahl der Geschosse entsprechend.

KONSTRUKTIVE ANNAHMEN - BAUSYSTEM UND TRAGWERK

Im Folgenden soll dargestellt werden, welche konstruktiven Annahmen dem Bausystem eingeschrieben sind und inwiefern diese den Versuchsaufbau beeinflussen. Die Setzungen und Definitionen des Bausystems sind auch notwendig, um den Untersuchungsraum geeignet einzugrenzen. Grundsätzlich ließen sich an die Untersuchung weitere Explorationen zu anderen Materialien, konstruktiven und statischen Systemen oder Geometrien anschließen, die dann zu anderen Ergebnissen führen werden. Einige der denkbaren Varianten werden im Folgenden diskutiert.

Materialität Holz - Ökologie und Nachhaltigkeit

Die Untersuchung wird auch durch die Setzung von Holz als Primär-Baustoff bestimmt. Die Wahl von Holz als Primärbaustoff lässt sich aus drei Richtungen argumentieren:

- Ökologie und Nachhaltigkeit
- Technische Eignung für Skelettbau
- Innovationspotential Holzbau

Holz ist als einheimischer, nachwachsender Rohstoff aus ökologischer und ökonomischer Sicht der zukunftsfähigste Baustoff. Holz ist der einzige lokale und nachwachsende Baustoff, der in großen Mengen vorhanden ist und ebenso lokal und nachhaltig produziert wird. In Hinblick auf die Schonung der Ressourcen und den Klimawandel ist Holzbau das geeignetste Baumaterial. Holz belastet die Ressourcen und die Umwelt im Hinblick auf Emissions- und Abfallaufkommen weniger als nicht-nachwachsende Baustoffe. Für die Herstellung und Verarbeitung ist deutlich weniger Primär-Energie erforderlich.²⁰ Die Produktion von Holz ist nicht nur kohlendioxidneutral, sondern wirkt aktiv dem Treibhauseffekt entgegen, weil das atmosphärische Kohlendioxid im Holz gebunden und damit zwischengelagert wird. Bei einer Hybrid-Bauweise wird die Reduktion der CO₂-Emissionen durch die Verwendung von Holz durch die hohen Emissionen bei der Produktion und Verarbeitung der Sekundärstoffe zum Teil aufgehoben. Gerade die Produktion metallischer Verbindungsmittel macht einen großen Anteil an den Gesamtemissionen bei der Herstellung von Holzgebäuden aus.

In einer systematischen Untersuchung „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus 6 Ein- und Mehrfamiliengebäude“²¹ für das Umweltbundesamt UBA hat das Ingenieurbüro EGS Plan insgesamt 400 Variantenkombinationen untersucht, die folgende Parameter kombinieren:

- Baukonstruktion, Material
- Energetischer Standard
- Haustechnik, Energieträger

Ziel der Studie war es, zu untersuchen, welche der genannten Variantenkombinationen Gebäudekonzepte ergeben, die die Klimaziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 erreichen, die einen klimaneutralen Gebäudebestand anstrebt. Das Ergebnis, das in der Folie graphisch aufbereitet ist, zeigt, dass die wenigstens Varianten überhaupt den Zielkorridor erreichen und die Varianten, die auf einer überwiegenden Holzkonstruktion basieren, einen deutlichen Vorteil in Hinblick auf die Erreichung der Klimaziele darstellen.

Vorteile der Holzbauweise:

- Geringer Primär-Energieinhalt und geringe CO₂-Emissionen
- Nachwachsender Rohstoff
- Einfache Verarbeitung
- Geringes Gewicht, weswegen sich Holz besonders für Anpassungen im Betrieb eignet

Mehrfamilienhaus Neubau - Energiestandards Treibhauspotential der Varianten

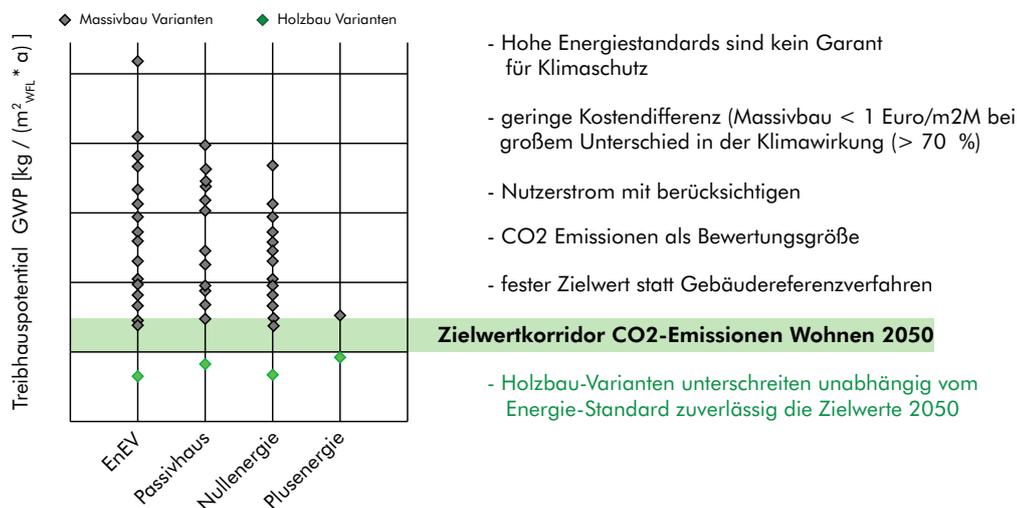


Abbildung 22:
Treibhauspotenzial der Varianten, Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus 6 Ein- und Mehrfamiliengebäude Neubau und Sanierung 400 Variantenkombinationen. Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik, EGS Plan, STZ-EGS.

²¹ Studie „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus 6 Ein- und Mehrfamiliengebäude Neubau und Sanierung 400 Variantenkombinationen“, Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik, EGS Plan, STZ-EGS. www.stz-egs.de, Vortrag Dr. Boris Mahler am Stand des BBSRs auf der bautec am 23.02.2018.

Rahmenbedingungen Tragwerk

Grundsätzlich sind bei einer normativen Bemessung eines Tragwerks drei Themenbereiche zu betrachten, die Einfluss auf die statischen Nachweise haben. Die Lasten, das statische System und das Material.

Die Rahmenbedingungen, die sich auf Grund des definierten Bausystems und der konstruktiv getroffenen Annahmen für das Tragwerk in Bezug auf diese drei Bereiche ergeben, sollen im Folgenden beschrieben werden.

Lastannahmen

Den größten Einfluss auf das Tragwerk, und damit wichtige und entscheidende Rahmenbedingung, sind die Lasten, die auf das Tragwerk einwirken. Für eine normgerechte Bemessung müssen die tragenden Bauteile entsprechend alle auftretenden Lasten und die möglichen Kombinationen (nach DIN EN 1990) daraus abtragen können. Zu den auftretenden Lasten zählen die Eigenlasten als ständig einwirkende Lasten, sowie alle veränderlichen Lasten wie Nutzlasten, Wind-/Schneelasten und Erdbebenlasten.

Eigenlasten/ ständige Einwirkungen

Den größten Einfluss bzgl. der einwirkenden Lasten auf ein Tragwerk hat ein Planer auf die Eigenlasten, da diese die Lasten sind, die ständig auf die Tragstruktur einwirken. Natürlich kann das Eigengewicht des notwendigen tragenden Deckenquerschnitts nicht direkt beeinflusst werden, aber durch die Wahl des tragenden Materials und die Wahl des darüber liegenden Deckenaufbaus kann die Eigenlast entscheidend mitgestaltet werden.

In diesem Zusammenhang hat Holz Vorteile, da es trotz seines geringen Gewichtes durch die besondere Faserstruktur in der Lage ist hohe Lasten abzutragen. Ein Nachteil, der sich allerdings aus dieser leichten Struktur ergibt, ergibt sich in Bezug auf den Schallschutz. Um Schall binden zu können braucht es eine gewisse Masse, da die Bauteile sonst zu leicht angeregt werden. Sind Schallschutzwerte einzuhalten, was im Mehrgeschossigen Wohnbau immer der Fall ist, benötigt eine Holzdecke ein Zusatzgewicht in Form einer Schüttung.

Nutzlasten und Schneelasten

Als veränderliche Lasten für den vertikalen Lastabtrag sind die Nutzlasten und die Schneelasten zu nennen.

Je nach Art der Nutzung können die Nutzlasten einen erheblichen Anteil an der Gesamtlast ausmachen. Für das vorliegende Bausystem betragen die Nutzlasten allerdings nur $2,30 \text{ kN/m}^2$ (Kategorie A2 inkl. Trennwandzuschlag für leichte Trennwände). Bemessungsrelevant wird der Einfluss der Nutzlast erst bei größeren Nutzlasten oder im Brandfall mit hoher Brandwiderstandsdauer. Für den Kaltzustand werden die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit maßgebend.

Schneelasten

Wie die Nutzlasten wirken auch die Schneelasten im Falle eines Flachdaches ausschließlich in vertikaler Richtung auf das Tragwerk ein. Sie wirken dabei als Flächenlasten auf die Dachfläche. Die Größe der anzusetzenden Schneelasten ist dabei von zwei Faktoren abhängig. Zum einen sind das klimatischen Gegebenheiten, die über die Schneelastzonen erfasst sind, zum anderen ist es die geografische Höhe des Standortes, welche die Menge der Schneemassen und damit die Größe der Schneelasten bestimmt. Die folgende Karte gibt Auskunft über die Schneelastzonen in Deutschland.

Je nach Schneelastzone des Standortes gibt es eine mindestens anzusetzende Schneelast. Liegt der Standort entsprechend hoch gelegen, müssen entsprechend höhere Lasten über eine Formel angesetzt werden.

Im Zuge des vorliegenden Projektes ist es das Ziel eine Vorbemessung für unterschiedliche Gebäudeabmessungen und Gebäuderastermaße zu erstellen. Um dahingehend die Bemessung aller ähnlich wirkenden Bauteile zu vereinheitlichen, wurde sich auf die Bemessung der Decken beschränkt. Der tragende Teil des Daches wird in identischer Dimension ausgeführt.

Da in den meisten Gebieten in Deutschland nur sehr geringe Schneelasten anzusetzen sind, liegen diese deutlich unter den Werten der Nutzlasten. Bei gleicher Ausführung wie die Decken ergibt sich bei einem Vergleich der Lasten, dass die Schneelasten – mit Ausnahme einiger sehr hoch gelegener Regionen (Mittelgebirge, Alpenvorland) – für eine Bemessung nicht maßgebend werden.

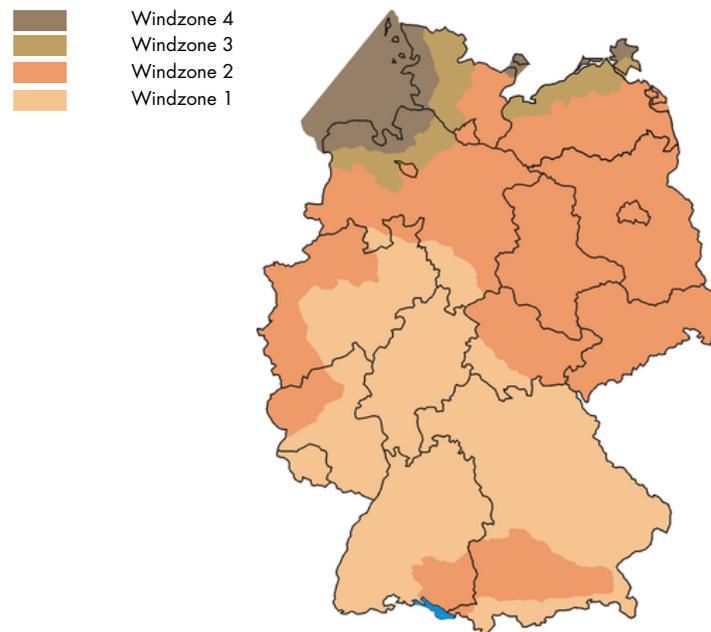


Abbildung 23:
Bild NA.1 - Schneelastzonenkarte
aus DIN EN 1991-1-3/NA:2010-
12

Windlasten

Die Windlast gehört zu den veränderlichen Einwirkungen auf Bauwerke, die vom Klima/Wetter abhängt. Die Druckverteilung um ein Bauwerk ergibt sich aus der Windströmung. Sie wirkt meist als Flächenlast senkrecht zu den Gebäudeoberflächen und setzt sich aus Druck- und Soganteilen zusammen. An einem Bauwerk entsteht an den frontal angeströmten Flächen ein Überdruck (Winddruck) durch die Strömungsverlangsamung. Im Bereich der Dach- und windabgewandten Seitenflächen löst sich die Luftströmung an den Gebäudekanten ab und bewirkt dort einen Unterdruck (Sog). Auch an der Gebäuderückseite wird durch Verwirbelungen ein Unterdruck erzeugt. In den Rechennormen sind Windlasten in Rechenwerte zur Ermittlung der Tragwerkssicherheit überführt. Durch das Wetter ergeben sich starke zeitliche und räumliche Schwankungen die stochastisch in den Normen abgebildet werden.

Abbildung 24:
Windzonen in Deutschland



Die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Windlasten sind Standortfaktoren:

- lokalen Windklima
- Topographie (Exposition des Gebäudes)

Das Windklima wird in Deutschland in den Normen Eurocode 1 oder DIN 1055-4 durch eine Windzonenkarte erfasst, welche zeitlich gemittelte maßgebende Windgeschwindigkeiten für verschiedene geographische Regionen angibt:

Aus den Windzonen ergeben sich folgende Rechenwerte:

Windzonen nach DIN1055-4:2005-03		
Windzone	Windgeschwindigkeit	Geschwindigkeitsdruck
1	22,5	0,32
2	25,0	0,39
3	27,5	0,47
4	30,0	0,56

Die Werte gelten für eine Mittelung über einen Zeitraum von 10 Minuten mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit innerhalb eines Jahres von 0,02 sowie für eine Höhe von 10 m über Grund in ebenem, offenem Gelände.

Der Bezugsstaudruck ergibt sich aus dem Grundwert der Bezugswindgeschwindigkeit in 10m Höhe. Bei sehr hohen Bauwerksstandorten sind die Windgeschwindigkeiten anzupassen. In der Berechnung werden Topographie und Beschaffenheit des Geländes durch Geländekategorien abgebildet.

Die Dimensionen des Bauwerkes wirkt sich auch maßgeblich auf die Windlasten aus. An der Erdoberfläche ist die Windgeschwindigkeit zu vernachlässigen, nimmt aber mit dem Abstand von der Erdoberfläche (Gebäudehöhe) zu.

Abbildung 25:
Windzonen in Deutschland und
Windgeschwindigkeiten.

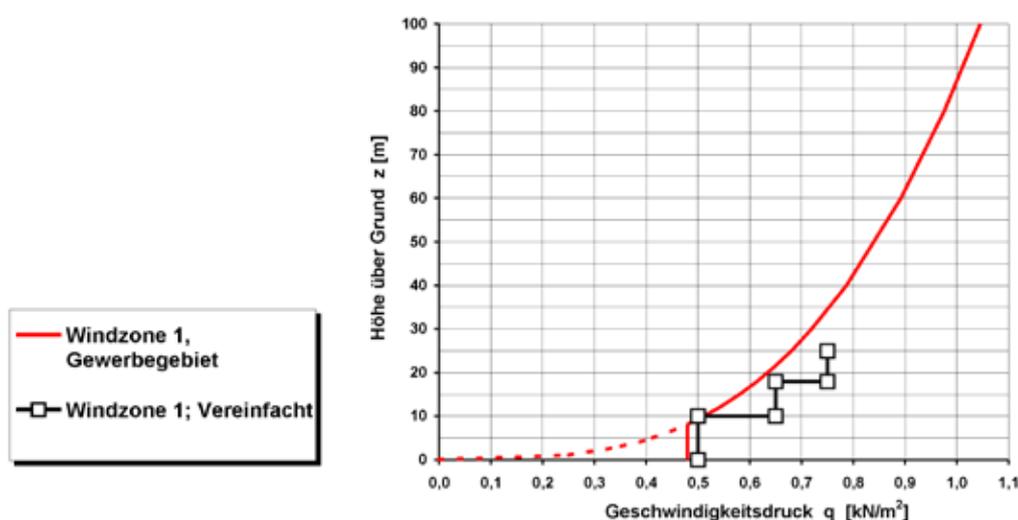


Abbildung 26:
Geschwindigkeitsdruck für Bau-
werkshöhen bis 25 Meter
Tabelle 2 der DIN 1055-4

Auch die geometrische Form des Gebäudes beeinflusst die wirkenden Druck- und Sogkräfte, was mit aerodynamischen Beiwerten berücksichtigt wird. Der Parameter Bauwerksgeometrie kann, wenn keine normierten Beiwerte in der Norm definiert sind, durch Windkanalversuche erfasst werden, evtl. zusammen mit dem Einfluss der örtlichen Bebauung.

Die (resultierende) Windkraft ergibt sich aus dem Produkt von Geschwindigkeitsdruck, aerodynamischen Kraftbeiwerten und Bauwerksflächen. Die Druckbeiwerte können maximal nur 1,0 betragen, schwanken meist zwischen 0,6 und 0,8. Die Sogbeiwerte sind in ihrer Größenordnung physikalisch nicht begrenzt und können im Bereich von Dachkanten z. B. $-2,0$ oder weniger betragen. Sogkräfte sind häufig für Windschäden an Bauwerken ursächlich.

In dem Rechentool zu dem Bausystem sind die Windlasten als Näherungswert berücksichtigt. Die tatsächlichen Windlasten können aber aufgrund der regionalen und topographischen Unterschiede deutlich von dieser Näherung abweichen.

Erdbebenlasten

Als Lastfall ist auch der Erdbebenfall zu nennen. Da Erdbeben aber flächenmäßig nur in einem sehr begrenzten Bereich in Deutschland auftreten und damit seltener zu berücksichtigen sind, wurden die Erdbebenlasten für die groben Voruntersuchungen in diesem Forschungsvorhaben ausgeblendet.

Durch die Berücksichtigung der Windlasten für die Aussteifung werden entsprechende Bauteile auch schon mit in die Holzmenge eingerechnet. Gerade im Gebiet der Eifel, der Schwäbischen Alb bis zum Bodensee und im Bereich um Freiburg herum, können die Erdbebenlasten doch erheblich höher sein als das durch Windlasten der Fall ist.

Im Falle möglicher Erdbebenbelastung sind daher genauere Untersuchungen notwendig. Es kann in diesem Fall nicht davon ausgegangen werden, dass die angegebenen Bauteile und Holzmenge für die Aussteifung des Gebäudes ausreichen.

Tragsysteme

Die wahrscheinlich wichtigste Rahmenbedingung in Bezug auf das Tragwerk ergibt sich aus den gewählten Tragsystemen. Die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Tragsysteme und welche Möglichkeiten sich hier bieten, wird im Folgenden beschrieben.

Abmessungen

Entscheidender Faktor bei jeder Tragwerksbemessung ist die Spannweite bzw. die Länge des Tragsystems. Sie geht direkt in jede Schnittgrößenbestimmung (also Bestimmung der Querkraft, des Momentes, der Durchbiegung, etc.) mit ein, teilweise in zweiter, teilweise sogar in vierter Potenz. Bei einer Verdopplung der Spannweite ergeben sich so bspw. 16-mal höhere Durchbiegungen, was entsprechend großen Einfluss auf die Querschnittsabmessungen hat. Für die Entwicklung eines Bausystems ist daher die sinnvolle Eingrenzung der Spannweiten wichtig. Hierzu zeigt die Tabelle (Abbildung 35) notwendige Unterzughöhen in Abhängigkeit von Decken- und

Unterzug

Material	GL24h	Trägerbreite	240 [mm]
Brandbeanspr.	30 [min]	Anford. GZG	l/300
			$f_{\text{grenz}} = 8,00$

Spannweite Decken l_{DE} [m]	Spannweite Unterzug l_{UZ} [m]											
	2,50	2,65	2,85	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,30	5,70	6,00	
erf. Höhe h_{QS} für alle Nachweise	2,50	200	200	240	240	280	320	400	440	480	520	560
	2,65	200	240	240	240	280	360	400	440	480	520	560
	2,85	200	240	240	240	280	360	400	480	520	560	600
	3,00	200	240	240	240	320	360	400	480	520	560	600
	3,50	240	240	240	280	320	360	440	480	520	600	640
	4,00	240	240	280	280	320	400	440	520	560	640	680
	4,50	280	280	280	320	360	400	480	560	600	640	720
	5,00	280	280	320	320	360	440	520	560	600	680	720
	5,30	280	320	320	360	400	440	520	600	640	680	760
	5,70	280	320	320	360	400	440	520	600	640	680	720
	6,00	320	320	360	360	440	480	520	600	640	720	760

Abbildung 27:

Unterzughöhen [mm] in Abhängigkeit von Decken- und Unterzugspannweiten (Auflast $g_k = 3,60$ kN/m²; Nutzlast $q_k = 2,30$ kN/m²; Brandforderungen R30; Vorgabe Enddurchbiegung $w < l/300$; Grenzfrequenz $f_{gr} = 8,00$ Hz), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH.

Unterzugspannweiten

Die Tabelle macht ersichtlich, dass eine Verdopplung der Unterzugspannweite einen mit unter mehr als doppelt so hohen Querschnitt erforderlich macht. Die in der Tabelle aufgezeigten Querschnitte machen auch deutlich, dass für eine Unterzugspannweite von 6,00 m unter den hier angenommenen Lasten bei einem 240mm breiten BSH-Träger GL24h mindestens eine Querschnittshöhe von 560mm erforderlich ist. Eine solche Unterzughöhe ergibt aus architektonischer Sicht jedoch keinen Sinn, da sie zu unnötig hohen Raumhöhen führt.

Für die Abgrenzung planerisch sinnvoller Rastermaße sind somit nicht nur

die reinen Querschnittsabmessungen maßgebend. Vielmehr ist es ein sinnvolles Abwägen mehrerer einwirkender Komponenten.

Ein- und Mehrfeldsysteme

Für die einzelnen Bauteile sind des Weiteren unterschiedliche Tragsysteme möglich. Für die Decken und Unterzüge kommen hier Einfeld-, Zweifeld- oder allgemein Mehrfeldträgersysteme in Frage. W

Der Vorteil eines Zwei- oder Mehrfeldträgersystems gegenüber einer Einfeldträgerlösung besteht vor allem in den geringen Durchbiegungen. Im All-

Abbildung 28:
erf. Deckenquerschnittshöhen [mm]
in BSP – maßgebende Nachweise,
2019, Pirmin Jung Deutschland
GmbH

Nachweis	Spannweite Decke l_{DE} [m]							
	2,50	2,65	2,85	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
GZT_kalt	120	120	120	120	120	120	120	140
GZT_warm	120	120	120	120	120	120	120	120
GZG	120	120	120	120	140	160	180	220
alle NWs	120	120	120	120	140	160	180	220

gemeinen wird bei der Bemessung einer Decke im Wohnbereich der Grenz-
zustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend.

Zu den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit gehört unter anderem der Nachweis der Deckendurchbiegung. Was die Durchbiegung anbelangt, so sind Mehrfeldsysteme deutlich im Vorteil, da durch die Durchlaufwirkung die Verformung verringert wird. Aus diesem Gesichtspunkt würde der Planer sich sicherlich für das Mehrfeldsystem entscheiden. Ein weiterer Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, der Schwingungsnachweis, der für den Wohnungsbau von entscheidender Bedeutung ist, hängt jedoch nur von der Feldspannweite ab. D.h. hier bringt ein Wechsel von Einfeld- auf Mehrfeldträger keinen Vorteil.

Die Nachteile, die aus der Wahl eines Zwei- oder Mehrfeldträgersystems entstehen sind jedoch die Folgenden: Auf Grund der Durchlaufwirkung entstehen an den inneren Auflagern 20 bzw. 25% höhere Lagerlasten. Diese höheren Lasten müssen von den Unterzügen und schließlich aufsummiert von den Stützen abgetragen werden. Des Weiteren sind die Auflagerlasten damit nicht an allen Auflagern identisch, d.h. die Unterzüge unter den Auflagern werden unterschiedlich stark belastet. Bei Wahl einheitlicher Unterzug- und Stützenquerschnitte, was im Zuge einheitlicher Detailausbildung sinnvoll erscheint, sind somit letztlich nicht alle Unterzüge gleich stark ausgenutzt. Dasselbe gilt in Folge für die Stützen.

Ein weiterer Punkt, der aus statischer Sicht gegen die Ausbildung von Mehrfeldsystemen für Decken und Unterzüge spricht, liegt im Schnittgrößenverlauf.

Beim Einfeldsystem ist die größte Momentbelastung in Feldmitte zu finden, bei Mehrfeldsystemen jedoch direkt über den inneren Auflagerpunkten. Jede Querschnittsschwächung an diesen Punkten beeinflusst die Bauteilbemessung erheblich. Bei Verzicht auf metallische Verbindungen oder verstärkende Stahlteile sind zur Lastübertragung von Stütze zu Stütze aber durchstoßende Zapfen erforderlich. Das wiederum schwächt einen durchlaufenden Mehrfeldunterzug im Bereich der größten Belastung deutlich. Um das zu vermeiden, fällt die Wahl der Decken- und Unterzugsysteme auf die Einfeldträgervariante.

Ausrichtung von Decken und Unterzügen

Für die Rasterabmessungen sollen im Forschungsprojekt sowohl ungerichtete als auch gerichtete Systeme untersucht werden. Bei den ungerichteten Systemen sind die Rasterabmessungen in beiden Raumrichtungen identisch, was auch die Ausrichtung des Decken- bzw. Unterzugtragsystems in x- oder y-Richtung zulässt. Anders sieht es bei den gerichteten Systemen aus. Hier unterscheiden sich die Rasterabmessungen in die beiden Raumrichtungen. Für das Tragsystem muss also eine sinnvolle Entscheidung erfolgen, ob die Decken oder die Unterzüge über die größere Rasterabmessung zu spannen sind.

Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich der notwendigen Decken- und Unterzugquerschnitte für eine Grundrissfläche eines Rasters von ca. 12,5m². Hierfür werden drei unterschiedliche Rastermaße verglichen.

Abbildung 29:
Holzvolumenvergleich, gerichtete/
ungerichtete Systeme (oben mit
Brandanforderung R0; unten mit
Brandanforderung R90), 2019,
Pirmin Jung Deutschland GmbH.

Brandanforderung R0

Bauteil	Rastermaß	QS-Breite	QS-Höhe	Holz-Volumen
gerichtetes System - Decke spannt kurz				
Decken (BSP)	2,5 m	1.000 mm	120 mm	1,50 m ³
Unterzüge (GL24h)	5,0 m	240 mm	440 mm	0,53 m ³
gesamt	12,5 m ²		560 mm	2,03 m ³
ungerichtetes System				
Decken (BSP)	3,5 m	1.000 mm	140 mm	1,72 m ³
Unterzüge (GL24h)	3,5 m	240 mm	320 mm	0,27 m ³
gesamt	12,3 m ²		460 mm	1,98 m ³
gerichtetes System - Decke spannt lang				
Decken (BSP)	5,0 m	1.000 mm	220 mm	2,75 m ³
Unterzüge (GL24h)	2,5 m	240 mm	280 mm	0,17 m ³
gesamt	12,5 m ²		500 mm	2,92 m ³

Brandanforderung R90

Bauteil	Rastermaß	QS-Breite	QS-Höhe	Holz-Volumen
gerichtetes System - Decke spannt kurz				
Decken (BSP)	2,5 m	1.000 mm	140 mm	1,75 m ³
Unterzüge (GL24h)	5,0 m	240 mm	440 mm	0,53 m ³
gesamt	12,5 m ²		580 mm	2,28 m ³
ungerichtetes System				
Decken (BSP)	3,5 m	1.000 mm	140 mm	1,72 m ³
Unterzüge (GL24h)	3,5 m	240 mm	320 mm	0,27 m ³
gesamt	12,3 m ²		460 mm	1,98 m ³
gerichtetes System - Decke spannt lang				
Decken (BSP)	5,0 m	1.000 mm	220 mm	2,75 m ³
Unterzüge (GL24h)	2,5 m	240 mm	320 mm	0,19 m ³
gesamt	12,5 m ²		540 mm	2,94 m ³

Die Tabelle zeigt, dass bei großen Deckenspannweiten der erforderliche Deckenquerschnitt unverhältnismäßig stark ansteigt (von 120mm bei 2,5m Spannweite und keinen Brandanforderungen auf 220mm bei 5,0m Spannweite), was ein größeres Volumen an benötigtem Holz verursacht. So beträgt das benötigte Holzvolumen bei großen Deckenspannweiten im dargestellten Beispiel zw. 28% und 43% - je nach Brandanforderung - mehr als beim Spannen der Decken über die kurze Seite. Bei reiner Betrachtung des Holzvolumens erscheint es folglich logisch, die Decken immer über die kürzeren Spannweiten tragend auszubilden, die Unterzüge entsprechend über die langen Seiten.

Allerdings zeigt der Vergleich auch, dass bei den Varianten unterschiedliche konstruktive Höhen (Summe aus Unterzug- und Deckenquerschnittshöhe) entstehen. Eine Ausrichtung der Decken über die kurze Spannweite ergibt deutlich höhere Unterzüge. Dadurch werden die Räume höher, das Raumvolumen und damit der zu beheizende Rauminhalt steigt, die Gebäude werden insgesamt höher.

Je nachdem, welches Kriterium für die Planung wichtiger erscheint, kann die Entscheidung über Decken- und Unterzugausrichtung folglich unterschiedlich ausfallen.

Material

Warum für die Untersuchung des Bausystems der Baustoff Holz als Primär-Baustoff definiert wurde, wurde bereits im Abschnitt 3.3 'Materialität Holz/Ökologie und Nachhaltigkeit' diskutiert.

Grundsätzlich besitzt Holz durch seine Struktur aus einzelnen Holzfasern ein anisotropes Werkstoffverhalten. Damit ist es in der Lage längs zur Faser große Kräfte abzutragen, quer dazu - in Querdruck oder gar Querszugrichtung - beträgt die Festigkeit jedoch nur einen Bruchteil der Längstragfähigkeit. Als Naturmaterial besitzt Holz zudem ein gewisses Maß an Fehlstellen - zum Beispiel Äste, Rindeneinschlüsse oder Harzgallen - die den homogenen Faserverlauf stören und damit die Festigkeit verringern. Um annähernd gleichbleibende Festigkeitseigenschaften gewährleisten zu können, werden die einzelnen Holzbretter nach solchen Fehlstellen visuell sortiert. Um zudem den Einfluss solcher Fehlstellen zu minimieren, werden einzelne Bretter miteinander zu sogenanntem Brettschichtholz verleimt. Das Verleimen homogenisiert die Eigenschaften, weshalb BSH bei gewissen Belastungen und je nach Lageraufbau bessere Festigkeitswerte aufweist, als normales Vollholz.

Für das definierte Bausystem des Skelettbaus lassen sich nun für die einzelnen Bauteile unterschiedliche Rahmenbedingungen erkennen.

Die Deckenebenen sollen sowohl horizontale als auch vertikale Lasten abtragen, d.h. sie werden sowohl parallel (Scheibenbelastung) als auch rechtwinklig zur Bauteilachse (Plattenbelastung) belastet. Als reine Holzbaulösungen kommen hier Balkendecken mit einer entsprechend befestigten oberen Plattenlage, Brettstapelelemente oder Brettsperrholzelemente in Frage.

Balkendecken sind in Bezug auf die vertikale Lastabtragung eher nachteilig, da die tragende Struktur in Form der Balken nur in bestimmten Abständen vorhanden ist. Dies verursacht unnötig hohe Querschnitte. Ein weiterer Nachteil der Balken- oder Rippendecke ist in der Aussteifung zu sehen. Um als Scheibe wirken zu können braucht es eine obere Beplankung, die allerdings mit metallischen Verbindungsmitteln erfolgt oder durch Verleimung hergestellt werden muss. Die Verleimung der einzelnen Rippen mit der Beplankungslage ist eher aufwendig und damit teuer. Zwar gibt es neuartige stiftförmige Verbindungsmittel aus Holz (siehe hierzu Kapitel 4.5.3.2), die zur Befestigung von Beplankung auf Holzständern oder -rippen dienen können, diese sind allerdings für tragende und damit auch aussteifende Zwecke bislang nicht zugelassen.

Brettstapeldecken sind zwar durch den vollen Holzquerschnitt, der in Tragrichtung zu Verfügung steht, im Hinblick auf Vertikallasten gut geeignet. Ähnlich wie bei den Balkendecken ist jedoch für die Aussteifung eine obere

Plattenlage, die schubsteif angeschlossen werden muss, von Nöten. Die Befestigung der Plattenwerkstoffe erfolgt entweder über metallische Verbindungsmittel oder über vollflächige Verklebung, was wiederum aufwendig ist.

Somit eignet sich vor allem Brettsperrholz (BSP) als Material für die Decken, da es aus kreuzweise verlegten und verleimten Brettlagen besteht. Die äußeren Lagen des BSP werden in Deckenspannrichtung ausgerichtet, was der Lastabtragung der vertikalen Lasten zu Gute kommt. Die horizontalen Lasten können durch die Verleimung der unterschiedlich ausgerichteten Brettlagen aufgenommen werden. Außerdem lassen sich Brettsperrholzelemente mit heutigen CNC-Fräsen sehr genau abbilden, was eine Grundvoraussetzung für den Bau vorgefertigter und vereinheitlichter Bausysteme ist.

Bei den Unterzügen und Stützen handelt es sich um stabförmige Bauteile. Die Unterzüge werden hauptsächlich rechtwinklig zur Bauteilachse auf Biegung beansprucht, die Stützen hauptsächlich auf Druck längs zur Bauteilachse. Letztlich verursachen beide Belastungsarten hauptsächlich Kräfte bzw. Spannungen in Faserrichtung. Daher eignen sich hier hauptsächlich Vollholz (VH) und Brettschichtholz (BSH). Vollholz ist auf Grund der gängigen Abmessungen eines „schlagreifen“ Baumes nur bis zu bestimmten Maßen erhältlich. Ab bestimmten Abmessungen muss daher auf das in fast allen Maßen erhältliche BSH zurückgegriffen werden. BSH besitzt zudem durch Verleimung mehrerer Brettlagen miteinander bessere und homogenere Festigkeitseigenschaften, was den Einsatz auch ab bestimmten Belastungsgrößen erforderlich macht. Aus diesem Grunde wird für das weitere Vorgehen prinzipiell von BSH als Material für die Unterzüge und Stützen ausgegangen.

Bei geringen Spannweiten und weniger als drei Geschossen wäre der Einsatz von Vollholz (KVH oder BSH) als Stützenmaterial durchaus sinnvoll. Für die Rahmenbedingungen bewegen sich die Lasten noch in Bereichen, die von Vollholz mit seinen begrenzten Abmessungen abgetragen werden kann

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft, welche Lasten in Abhängigkeit von Decken- und Unterzugspannweite von den Stützen abzutragen sind. Für die Lasten in den grünen Bereichen lässt sich Vollholz bis zu einer üblichen Geschosshöhe von ca. 3,20 m problemlos einsetzen.

Abbildung 30:
Stützlasten [kN] ungerichtete Systeme (beispielhaft), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH

Stützlasten F_d [kN] in Abhängigkeit der Geschossigkeit ($F_d = 1,35 \times G_k + 1,5 \times Q_k$)									
Spannweite Decke	[m]	2,65	2,85	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	
Spannweite	[m]	2,65	2,85	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	
Unterzug	1	33	38	42	58	76	100	125	
Geschossanzahl	2	65	75	83	115	153	199	249	
	3	98	113	125	173	229	299	374	
	4	130	150	166	230	306	398	499	
	5	163	188	208	288	382	498	624	
	6	195	226	250	346	458	597	748	
	7	228	263	291	403	535	697	873	
	8	260	301	333	461	611	796	998	

Abbildung 31:
Stützlasten [kN] gerichtete Systeme (beispielhaft), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH

Spannweite Decke	[m]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Spannweite	[m]	2,65	2,85	3,00	3,50	4,00	4,50	5,30	5,70	6,00
Unterzug	1	65	71	74	87	99	112	132	143	150
Geschossanzahl	2	131	141	148	173	199	224	265	285	301
	3	196	212	223	260	298	336	397	428	451
	4	262	282	297	347	398	448	529	571	602
	5	327	353	371	434	497	560	662	714	752
	6	393	423	445	520	596	673	794	856	903
	7	458	494	520	607	696	785	927	999	1053
	8	524	564	594	694	795	897	1059	1142	1203

Da die Lasten für das Bausystem bei größeren Spannweiten und mehr Geschossen aber schnell erheblich größer werden (siehe Tab. unten), zeigt sich, dass der grundsätzliche Einsatz von BSH als Stützenmaterial für das Bausystem Sinn ergibt.

Die aussteifenden Wandscheiben werden im ausführungsfähigen Gebäude in einen Rahmen aus Unterzügen und Stützen integriert. Sie erfahren damit hauptsächlich Belastungen in der Ebene der Bauteilachsen, was einer Belastung als Scheibe gleichkommt. Die vertikalen Lasten werden über den Rahmen, genauer gesagt über den über der aussteifenden Wandscheibe befindlichen Unterzug und die seitlichen Stützen abgetragen.

In Frage kommen als Wandelemente zum einen Holztafelemente oder BSP-Elemente. Um als Scheibe wirken zu können benötigt die Holztafelwand eine schubsteife Beplankung. Da diese aber - wie bei den Decken bereits beschrieben - durch metallische Verbindungsmittel angebracht oder aufgeleimt werden muss, erweisen sich Holztafelwände im vorliegenden Fall als nicht sinnvoll. Daher wird für die aussteifenden Wandscheiben auf BSP-Elemente zurückgegriffen.

Rahmenbedingungen Brandschutz

Für jedes Tragwerk, das in Deutschland oder der EU geplant und gebaut wird, sind vor allem auch Vorkehrungen für den Brandschutz zu treffen. Was das Tragwerk an sich anbelangt, so muss hierbei gewährleistet werden, dass die tragende Struktur dem Feuer eine gewisse Zeit stand hält. Diese Zeitspanne, die von den Parametern Gebäudehöhe, Anzahl und Größe der Nutzeinheiten und der Zugänglichkeit des Gebäudes für die Feuerwehr abhängt, soll den Nutzern die Möglichkeit geben unbeschadet aus dem Gebäude zu flüchten. Durch welche Maßnahmen die Tragstruktur in der Lage ist die geforderte Zeitspanne zu überbrücken, hängt stark vom gewählten Material des Tragwerkes bzw. den Aufbauten der einzelnen Bauteile ab.

Welche Anforderungen sich für ein Holzgebäude, wie es in diesem Forschungsvorhaben geplant wird, ergeben, soll in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

Anforderungen Bundesländer

Nach deutschem Recht ist jedes Bundesland berechtigt die Vorschriften in Sachen Brandschutz selbst zu definieren bzw. eigene Abweichungen vom Muster zu formulieren.

Seit Anfang 2017 gibt es hierzu die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB). Diese enthält im Teil A technische Baubestimmungen, die bei der Erfüllung der Grundanforderungen an Bauwerke zu beachten sind. Darunter fällt als wesentlicher Bereich auch der Brandschutz (Teil A 2).

In diesem Zusammenhang verweist die MVV TB wiederum auf die Muster-Bauordnung (MBO). Dieses Dokument soll den Ländern als Vorlage für die landeseigene Bauordnung dienen. Der Umsetzungsprozess die MVV TB in Landesrecht zu überführen ist dabei noch im Gange. Nach aktuellem Stand haben alle Bundesländer die entsprechenden Regelungen bereits eingeführt.

Die MBO ist dabei in allen Bundesländern weitgehend als Grundlage herangezogen worden. Dennoch gibt es unterschiedlich ausgeprägte Abweichungen von den Mustervorlagen, da – wie bereits erwähnt – jedes Bundesland berechtigt ist, eigene Formulierungen zu wählen und entsprechende Abweichungen zu definieren.

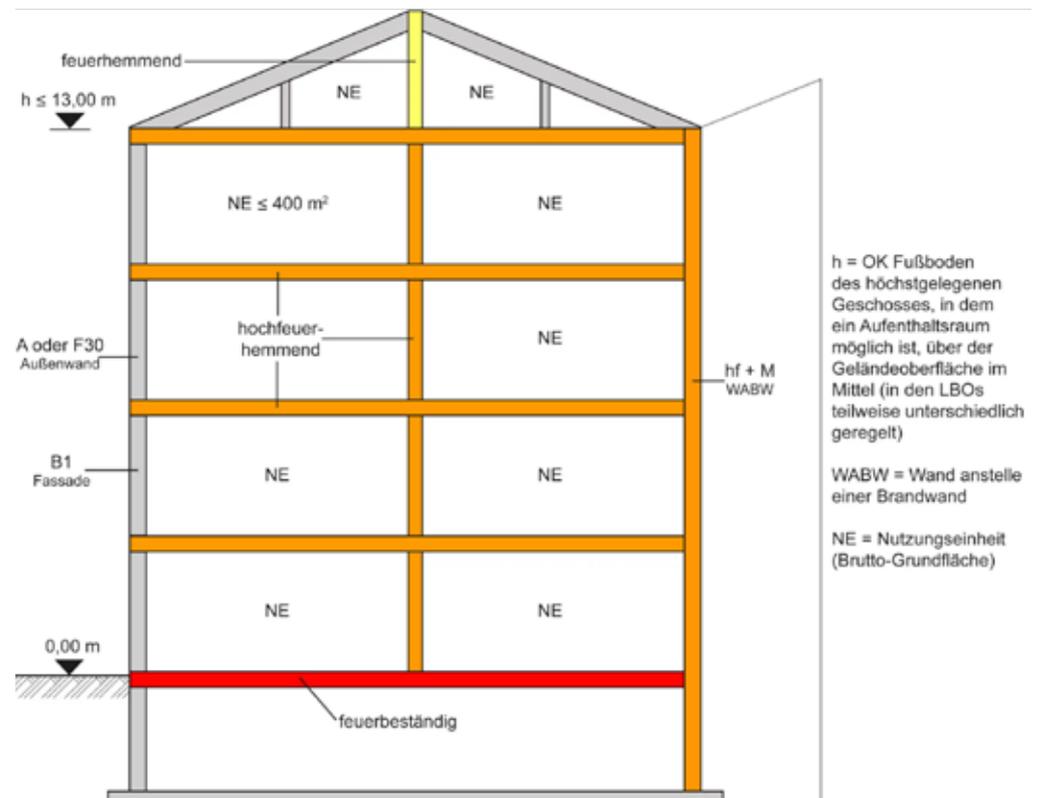
Da die Umsetzung der Musterdokumente in Landesrecht ein stetig wähernder, dynamischer Prozess ist, muss für die Planung eines jeden Gebäudes die jeweils zum Zeitpunkt der Erstellung gültige Landesbauordnung (LBO) herangezogen und überprüft werden (die beschriebenen Vorschriften gelten lediglich zum Zeitpunkt der Texterstellung).

In diesem Zusammenhang ist zum Beispiel auch davon auszugehen, dass die bis dato in vielen Bundesländern noch bestehend Kapselanforderungen für Bauwerke der Gebäudeklassen 4 und 5, nach und nach verschwinden wird. Somit wird es – wie bereits in Baden-Württemberg, Berlin, Hamburg, Hessen und Nordrhein-Westfalen – dann möglich sein, auch in Gebäudeklasse 4 und 5 tragend aus Holz zu bauen, ohne diese Tragstruktur durch nicht brennbare Bekleidungen zu kapseln.

Anforderungen Gebäudeklassen

Wie bereits erwähnt ist ein entscheidendes Kriterium für die Anforderungen an die einzelnen Gebäudebestandteile durch die Gebäudeklasse (GK) gegeben. Nach der Musterbauordnung (Mai 2016) gibt es fünf unterschiedliche Gebäudeklassen. Wie Gebäude in die einzelnen Klassen eingeteilt werden wird aus der folgenden Übersicht deutlich. Eines der Kriterien zur Einstufung in die Gebäudeklassen ist durch die Fußbodenhöhe des obersten bewohnbaren Geschosses gegeben. Die Höhe wird dabei in Bezug auf die mittlere umliegende Geländehöhe gemessen. Liegt das Geschoss oberhalb von 7m so wird ein Gebäude mindestens in Gebäudeklasse 4 eingestuft. Das entspricht der GK, ab der in vielen Bundesländern bis dato tragende Holzstrukturen noch zu kapseln sind.

Abbildung 32:
beispielhafte Anforderungen für GK4 aus (Baunetzwissen, <https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/grundlagen/gebäudeklassen-3134967/gallery-1/5>, , 07.03.2019)



Ob ein Gebäude freistehend oder in einer Baulücke zwischen weiteren Gebäuden errichtet ist, kann ebenfalls über die Einstufung in die GK entscheiden. Allerdings ist dieses Kriterium nur für die Einstufung in GK 1 oder 2 wichtig, wo die Anforderungen an die Bauteile noch sehr gering sind und die Bemessung nicht entscheidend beeinflussen.

Die zwei weiteren Kriterien zur Einteilung in Gebäudeklassen sind zum einen die Anzahl der Nutzeinheiten und zum anderen die Größe der einzelnen Nutzeinheiten bzw. die Größe aller Nutzeinheiten zusammen.

Je nach Gebäudeklasse ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für die einzelnen Bestandteile der Tragstruktur. Ausgedrückt werden die Anforderungen in Zeitspannen, in denen das entsprechende Bauteil nicht versagen darf. „Fh“ steht dabei beispielsweise für feuerhemmend und bedeutet, dass ein Unterzug die Anforderung R30 erfüllen muss. D.h. er muss für 30 Minuten dem Feuer standhalten. Ob der gewählte Bauteilquerschnitt dazu in der Lage ist, muss in der Statik entsprechend nachgewiesen werden.

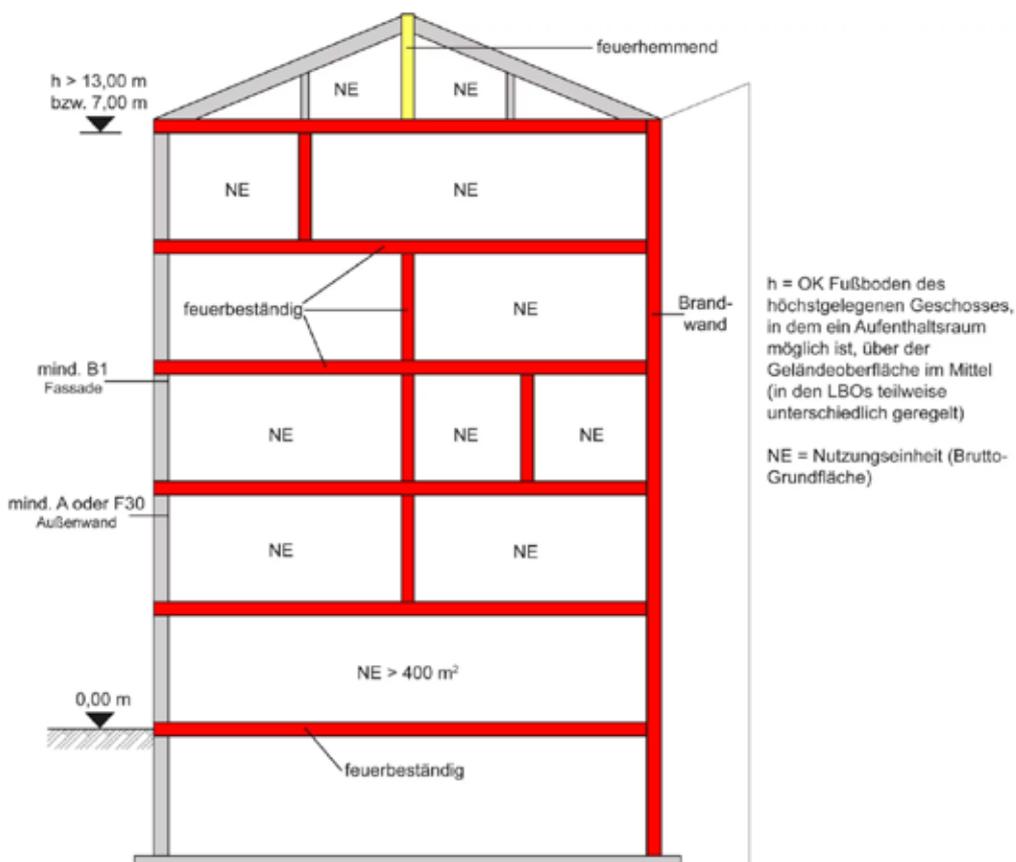


Abbildung 33: beispielhafte Anforderungen für GK 5 (Baunetzwissen, <https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/grundlagen/gebäudeklassen-3134967/gallery-1/5>, , 07.03.2019)

Holz ist unter Brandbeanspruchung ein gut einzuschätzendes Material. Durch seine besondere Zusammensetzung bildet es unter hoher Temperaturbelastung eine Kohleschicht aus. Diese Kohleschicht ist sehr porös und wirkt isolierend, d.h. diese Schicht sorgt dafür, dass sich der restliche Holzquerschnitt hinter der Kohleschicht nur in sehr begrenztem Maße erhitzen kann. Dadurch ist es möglich für Holz eine gewisse Abbrandrate - in Millimetern pro Minute - anzugeben. Für unterschiedliche Holzarten bzw. unterschiedliche Holzwerkstoffe liegen unterschiedliche Abbrandraten zu Grunde. Bei Kenntnis über die geforderte Feuerwiderstandsdauer kann somit für jedes Bauteil bestimmt werden, wie viel des jeweiligen Bauteils in der entsprechenden Zeitspanne abbrennt. Daraus wiederum lassen sich die Abmessungen des „Restquerschnittes“ bestimmen. Dieser Restquerschnitt besitzt wie der Querschnitt im „kalten“ Zustand einen gewissen Widerstand gegen Verformungen, aus dem sich die Spannungen im Holzquerschnitt bestimmen lassen. Diese Spannungen dürfen die Festigkeiten des Holzes im Brandfall nicht überschreiten. Nach diesem Vorgehen kann umgekehrt bestimmt werden, welche Bauteilabmessungen unter den gegebenen Einwirkungen und unter Berücksichtigung der geforderten Feuerwiderstandsdauer für die Erfüllung der „Heißnachweise“ notwendig ist.

Eine weitere Möglichkeit die tragende Struktur vor Feuereinwirkung zu schützen, besteht darin, das Bauteil durch entsprechende Materialien zu beplanken. Eine Kapselung von Bauteilen verhindert im Brandfall, dass das entsprechende Bauteil dem Feuer direkt ausgesetzt ist. Für eine bestimmte Zeitdauer, die stark von der Art und Dicke der Bekleidung abhängt, kann dadurch für den Heißnachweis weiterhin von den vollen Querschnittsabmessungen ausgegangen werden. Hält die Bekleidung einer Stütze beispielsweise nur 21 Minuten dem Feuer stand, für den Stützenquerschnitt sind aber 30 Minuten Widerstand gefordert, so muss für die restlichen 9 Minuten der Abbrand an der Stütze berechnet und der Restquerschnitt entsprechend der Einwirkungen nachgewiesen werden.

Die Rahmenbedingungen, die sich somit aus der Einteilung in eine gewisse Gebäudeklasse ergeben, drehen sich also hauptsächlich um die Frage, ob gekapselt werden muss oder nicht. In den Gebäudeklassen 1-3 ist in keinem Bundesland eine Kapselung erforderlich. Die Querschnitte sind hier also auf Abbrand zu bemessen. Bis GK 3 sind dabei maximal 30 Minuten Feuerwiderstand gefordert. Den Abbrand innerhalb von 30 Minuten verkraften (fast) alle betrachteten Bauteile, daher entfällt hier die Fragestellung ob besser auf Abbrand zu bemessen oder zu kapseln ist. Ab GK 4 wird diese Frage allerdings interessanter bzw. relevanter. Durch entsprechende Beplankung der tragenden Bauteile kann die Bemessung auf Abbrand entfallen. Bei Stützen mit 90 Minuten Brandanforderung kann das 40 bis 80mm Querschnittsreduzierung (pro Richtung) bedeuten, was einem erheblichen Holzvolumen entspricht.

GLOBALES UND LOKALES TRAGWERK: BESCHREIBUNG DER VORGEHENSWEISE

Unter dem globalen Tragwerk sind alle Bauteile zu verstehen, die zum Lastabtrag des Bauwerks statisch bemessen werden müssen. Die Bauteile werden dabei grundsätzlich auf ihre Tragfähigkeit für den vorliegenden Fall geprüft bzw. bemessen. Es lässt sich bei diesen Bauteilen zwischen den Bauteilen für den vertikalen und den Bauteilen für den horizontalen Lastabtrag unterscheiden. Im Folgenden werden diese unterschiedlichen Lastabtragungen für das im Forschungsvorhaben gewählte Bausystem genauer beschrieben.

Für die Planung von Holzgebäuden ist eine umfassende, detaillierte und integrale Planung erforderlich. Dafür gibt es im Holzbau eine lange Tradition. Bereits im Mittelalter wurden die Fachwerkbauten vorab gänzlich geplant, dann abgebunden/gezimmert und anschließend montiert. Diese Tatsache macht den Holzbau aufwändig und spannend zugleich. Als planender Ingenieur muss bereits beim Festlegen des statischen Systems sehr großes Augenmerk und größter Wert auf die vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten und auf die Vorelementierung der Bauteile gelegt werden.

Können im Zuge der üblichen Holzbauplanungen (mit dem Einsatz metallischer Verbindungsmittel) entsprechende Anschlusskräfte durch das Einbringen zusätzlicher Verbindungsmittel übertragen werden, so ist dies beim Einsatz der historischen Verbindungsmöglichkeiten nahezu ausgeschlossen. Hierbei können keine „zusätzlichen“ Verbindungsmittel mehr nachträglich eingeplant werden, hier entscheiden sich die zu übertragenden Kräfte fast ausschließlich über die vorhandenen Querschnittsgrößen der Bauteile.

Dies bedeutet, dass beim ersten Ermitteln der auftretenden Lasten aus dem Primär- oder Sekundärtragwerk umgehend die Knotenkräfte und die daraus resultierenden Spannungen am Anschlusspunkt ermittelt werden müssen. Diese Vorgehensweise ist vielen Planern unbekannt und wird durch eine maximal anzustrebende Vorelementierung der Holzbauteile noch verstärkt. Die Ermittlung der Stabquerschnitte im Holzbau kann nur im Zusammenspiel aus Stab- und Detailstatik erfolgen.

Vertikaler Lastabtrag

Bei der gewählten Hybridbaukonstruktion aus einer Kombination von Skelett- und Holzmassivbau werden folgende Bauteile zur vertikalen Lastabtragung herangezogen:

- Decken
- Unterzüge
- Stützen

Der vertikale Lastfluss verläuft dabei über die Decken, welche die Eigen- und Nutzlasten der einzelnen Gebäudeebenen auf die Unterzüge verteilen. Die Unterzüge verlaufen dabei jeweils rechtwinklig zu den einachsigen tragenden Deckenelementen aus Brettsperrholz und leiten die Lasten an die Stützen weiter. Die Stützen befinden sich jeweils in den Kreuzungspunkten der Rasterachsen und tragen die Lasten aus je zwei Unterzügen, aufsummiert über alle Geschosse des Gebäudes, bis ins Fundament ab.

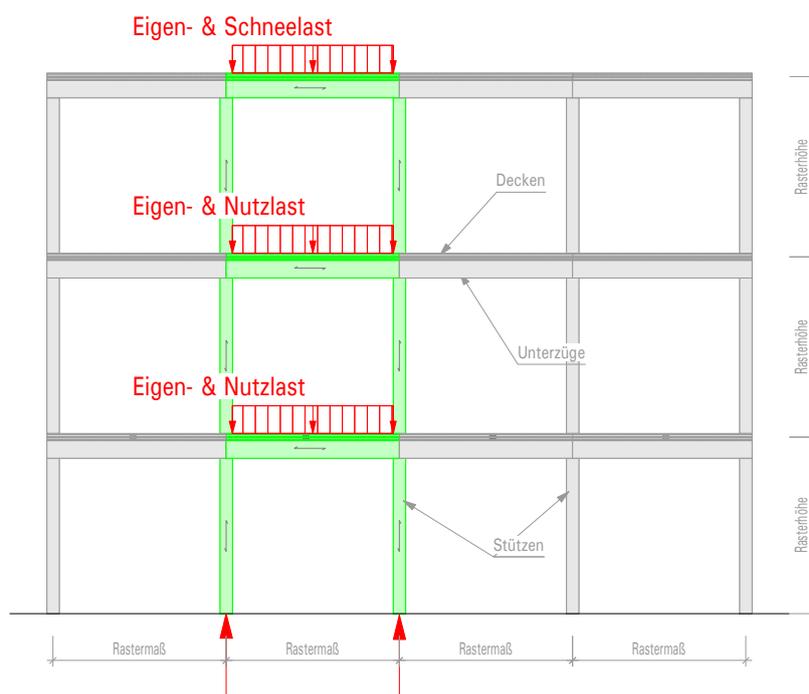
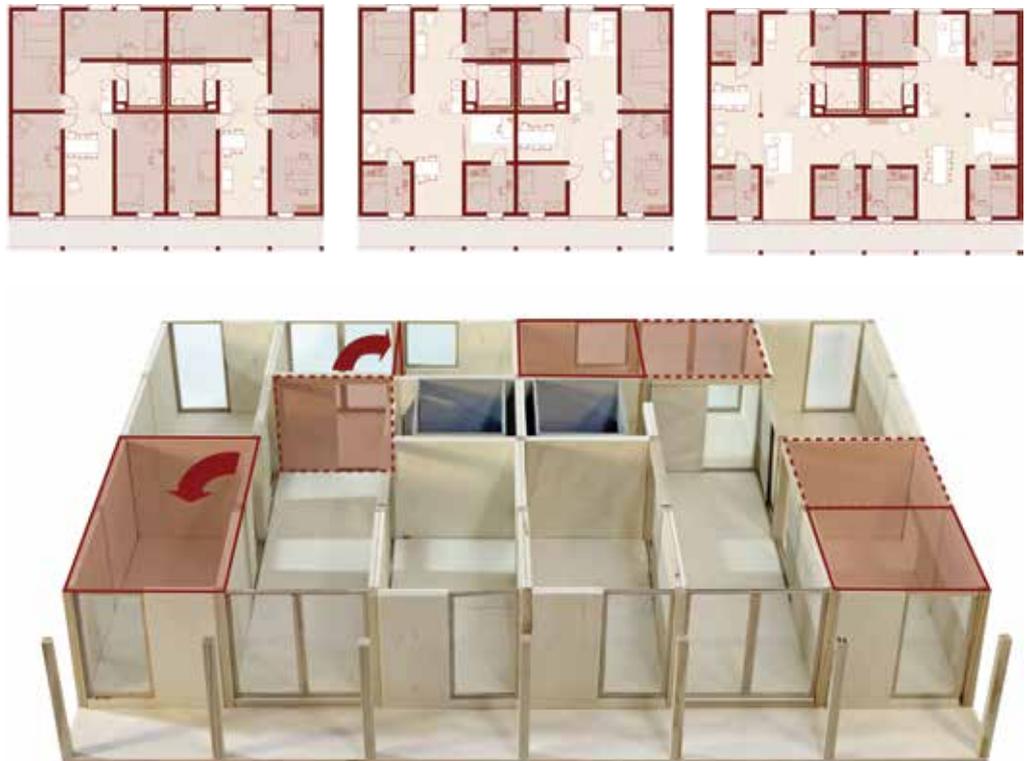


Abbildung 35:
vertikaler Lastfluss, 2019, Pirmin
Jung Deutschland GmbH

Globales Tragwerk:**Gegenüberstellung von Holz-Skelettbau und Holz-Massivbau**

Bei der Entwicklung des Tragwerks wurde deutlich, dass das Bausystem als reiner Skelettbau, Hybrid-Konstruktion oder Massivbau interpretiert werden kann. Wesentlicher Teil der Entwicklungsarbeit bestand darin, die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Bauweisen zu beschreiben und zu evaluieren. Ein wichtiger Parameter ist dabei die Holzmenge, die für die globalen Tragsysteme verglichen wird. Diese wird im Folgenden exemplarisch für eine Wohneinheit von 84qm verglichen. Andere Parameter sind die Nutzbarkeit und Flexibilität des Gebäudes, aber auch Brandschutz, Schallschutz und thermische Bauphysik wurden in der Forschung untersucht.

Abbildung 36:
DGJ Architektur, Modell des Bau-
systems Maßstab 1/25, Foto Hans
Drexler, 2018.



Skelettbau und flexibles Wohnen

Holz ist - aus Baumstämmen gewonnen - zunächst ein linearer, stabförmiger Baustoff, der die Konstruktion von Skelettbauten nahelegt.²² Im Sinne der Definition von Groák²³ (analog bei Schneider, Till) von flexiblem Wohnen als einer physisch und baulich veränderbaren Struktur bietet der Skelettbau die besten Voraussetzungen. Deren Vorteil ist in der Trennung von Raumbildung und Tragwerk zu sehen. So ermöglicht das tragende Skelett, dass sowohl Innen- als auch Außenwände versetzt und verändert werden können.

Bedenkt man die rasante Veränderungen der Lebensweisen und Wohnformen, wie den Rückgang der Anzahl von typischen Familienstrukturen, sinkende Haushaltsgrößen, sowie den demographischen Wandel, so sind spezifische Wohnungsgrundrisse weder zukunftsfähig noch nachhaltig.

Für die ‚Fallstudie 3‘ (IBA Heidelberg) ergibt sich bei einem tragenden Holz-Skelett, aussteifendem Kern und Decken aus Brettsperrholz (BSP), sowie Trennwände und Fassaden als Holztafel-Konstruktion eine Holzmenge von 24,3m³ pro Wohneinheit mit 84m² WFL. Für den Ausbau (nicht-tragende Wände) und Fassaden werden Holztafel- und Holzrahmenbau eingesetzt, die kostengünstig hergestellt werden können.

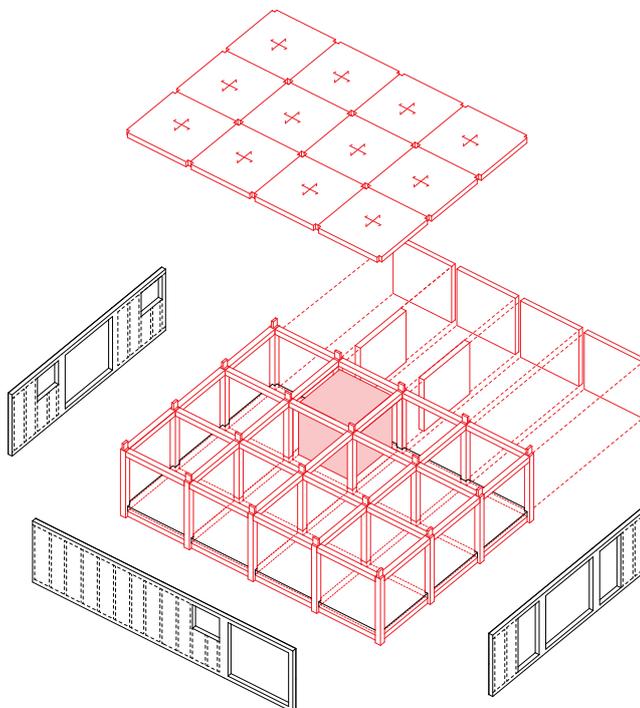


Abbildung 37:
Diagramm globales Tragwerk
Variante „Skelettbau“. Entwurf Tragwerk: DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure; Graphik: DGJ Architektur.

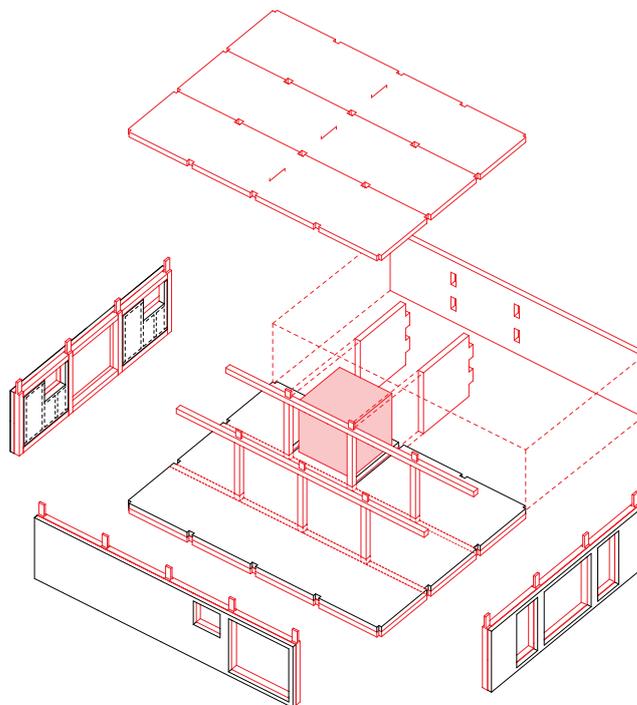
²² Konrad Merz.; Konstruieren: Vom Stab zur Platte; in ARCH+ 193: Holz; Herausgeber: Nikolaus Kuhnert, Anh-Linh Ngo, Günther Uhlig; Aachen, Berlin, 2009.

²³ Steven Groák, The Idea of Building: thought and action in the design and production of buildings, London: E & FN Spon, 1992, p. aus: Tatjana Schneider und Jeremy Till greifen in ‚Flexible Housing‘ die Definition von Steven Groák auf: Flexibles Wohnen als eine Wohnumgebung, die sich physisch verändern lässt. In diesem Sinne sind die gegenständlichen Entwürfe als flexibles Wohnen einzuordnen, weil die BewohnerInnen die Möglichkeit haben, das Wohnumfeld physisch umzugestalten. Adaptives Wohnen wird als eine Anpassungsfähigkeit in Hinblick auf unterschiedliche soziale Nutzungen beschrieben, ohne dass physisch verändert wird.

Hybridkonstruktionen: Kombination von Skelett- und Massivbau

Mitte der Neunziger Jahre kam mit dem Brettsperrholz eine Holz-Massiv-Konstruktion auf den Markt, die besonders für höhere Gebäude entscheidende Vorteile hat, weil die massiven Wandtafeln leistungsfähiger für die vertikale Lastabtragung und die Queraussteifung des globalen Tragwerks sind. Auch bei der Entwicklung unseres Bausystems können die Vorteile der beiden Bauweisen kombiniert werden: Teile der Skelett-Struktur werden durch tragende und aussteifende Brettsperrholzplatten ersetzt, was eine leistungsfähige Abtragung der horizontalen Lasten ermöglicht. So werden jeweils ein Teil der Wände um die in allen Geschossen übereinander angeordneten Bäder und ein Stück der Wohnungstrennwand so geplant, dass die Stützen durch tragende Wandstücke ersetzt werden. Die horizontale Aussteifung wird durch Wand-Scheiben aus Massivholz (Brettsperrholz) erreicht, die mittels Zapfen an die Stützen angeschlossen werden. Bei einer Hybrid-Konstruktion aus teilweise massiven Wänden ergibt sich für die ‚Fallstudie 3‘ (IBA Heidelberg) eine Holzmenge von 28,2m³ und damit 14% mehr als bei der Skelettkonstruktion.

Abbildung 38:
Diagramm globales Tragwerk
Variante „Hybrid“. Entwurf Tragwerk:
DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure;
Graphik: DGJ Architektur.



Holz-Massivbau

Im Zuge der Entwicklungsarbeit hat sich herausgestellt, dass durch die Einführung der Brettsperrholz-Elemente eine Konstruktion entsteht, die Aspekte eines reinen Skelettbaus (nur stabförmige Trag-Elemente) mit Aspekten einer Massivkonstruktion für Decken und aussteifende Wände kombiniert. Dies führt an den Schnittstellen zu Redundanzen. Die Wandscheibe könnte vertikal alle Lasten aufnehmen und somit nicht nur die Stütze, sondern auch den Träger ersetzen. Denkbar wäre es also, dass das System, basierend auf dem Raster, auch als Massiv-Holzbau umgesetzt wird. Nachteil der massiven Innenwände ist die geringe Anpassungsfähigkeit.

Die Massivkonstruktion für Decken und aussteifende Wände ist materialintensiver, auch wenn die einzelnen Wände durch den gleichmäßigen Lastabtrag in der Wandstärke reduzieren lassen. Für die ‚Fallstudie 3‘ (IBA Heidelberg) ergibt sich eine Holzmenge von $31,9\text{m}^3$ pro Wohneinheit, was 24% über der Holzmenge des Skeletts und der Holztafeln liegt.

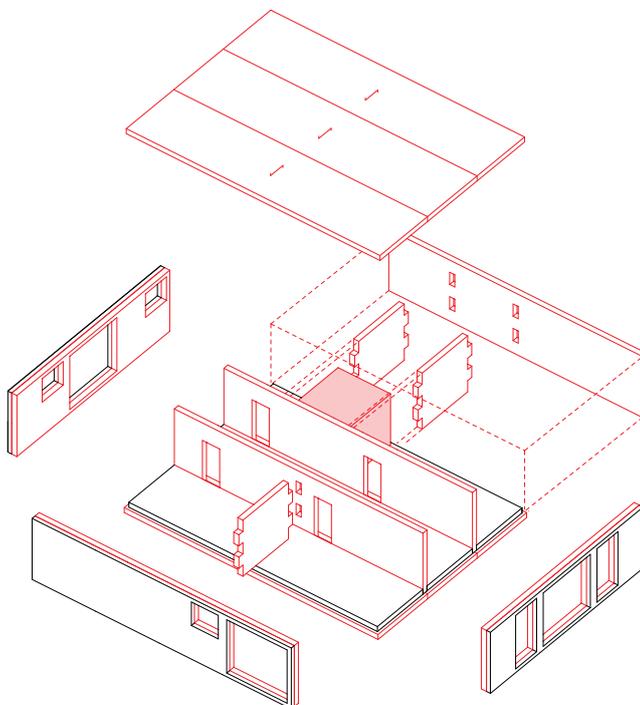
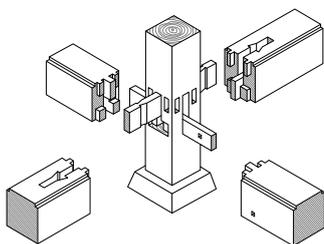


Abbildung 39:
Diagramm globales Tragwerk
Variante „Massiv-Holzbau“. Entwurf
Tragwerk: DGJ Architektur und
Pirmin Jung Ingenieure; Graphik:
DGJ Architektur.

Abbildung 40:
Yatoi hoza sashi, dreidimensionaler Knotenpunkt des Ashikatame Träger (Hauptträger), ; Graphic DGJ Architektur nach Sato, Hideo; Nakahara, Yasua; Nii, Koichi Paul (Übersetzer) The Complete Japanese Joinery; Vancouver, 2000.

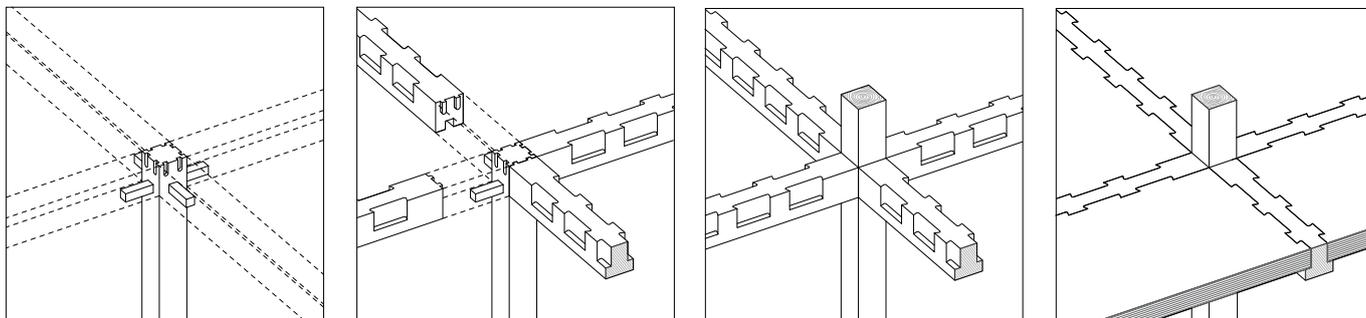


Lokales Tragwerk

Ausgehend von der großen Vielfalt an tradierten Holz-Knoten-Verbindungen wie Zapfen, Kämme, Schwalbenschwänze, Versätze usw. wurde untersucht, welche Verbindungen sich im modernen Bauwesen einfach und praxistauglich umsetzen lassen. Dabei werden zwei unterschiedliche Ansätze untersucht und verglichen:

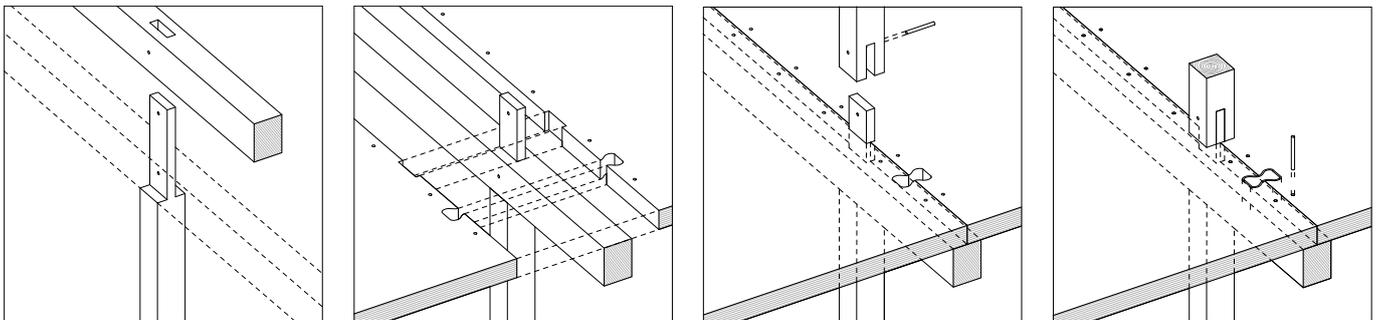
Die integrierten Anschlüsse verschneiden die geometrischen Räume der zu verbindenden Bauteile und gewährleisten den Kraftschluss durch eine geometrische Verschränkung der Bauteile (form- und kraftschlüssige Verbindungen). Grundidee der Konstruktion war zunächst form- und kraftschlüssige Verbindungen beim Zuschnitt und Abbund der Bauelemente herzustellen, die eine Verwendung von Verbindungsmitteln überflüssig machen (press-fit or friction-fit joints). Im ersten Schritt wurde ein japanischer Knoten "Yatoi hoza sashi" nachempfunden, der zwei Hauptträger in einem geometrischen Raum mit der Stütze verschneidet und die Verbindung zwischen Trägern und Stütze, aber auch die Langsverbindung der Träger untereinander mittels eines Langszapfens herstellt, der die durch Keile oder Querszapfen in der Lage gesichert wurde. Die Auflagerlast wird dabei nicht nur über die Langszapfen, sondern vor allem über eine Brüstung vom Träger auf die Stütze übertragen, mit der der Träger passgenau in die Stütze eingreift. Das Prinzip dieser Knoten ist, dass die geometrischen Räume überlagert und die Bauteile in der Schnittmenge mit vergleichsweise komplexe Geometrien verschnitten werden.

Abbildung 41:
3D-Modell des Bausystems Anschluß Träger an Stützen - integrierte Anschlüsse, DGJ, 2016.



Im Gegensatz dazu steht der Ansatz, differenzierte Konstruktionen zu entwickeln, welche die geometrischen Räume der Bauteile weitestgehend trennen. Im Knotenpunkt überlagern sich die Ebenen der einzelnen Bauteile nicht, sodass sie durch sekundäre Verbindungsmittel zusammengefügt werden. Die Komplexität der Geometrien kann so reduziert werden und damit auch der Herstellungs- und Montageaufwand.

Abbildung 42:
3D-Modell des Bausystems An-
schluß Träger an Stützen - differen-
zierte Anschlüsse, DGJ, 2016.



TOLERANZEN

Eine Herausforderung, die insbesondere bei der Entwicklung von Details auf der Ebene des lokalen Tragwerks auftritt, sind die auftretenden Toleranzen und die Frage, wie diese aufgenommen werden können. Toleranzen gehören zum Bauen allgemein dazu, sind aber bei Gebäudeteilen, die vorgefertigt auf die Baustelle kommen und daher schwer oder gar nicht anpassbar sind, von besonderer Bedeutung. Im Folgenden wird beschrieben, welche normativen Vorgaben es hierbei für den Holzbau gibt und wie an den einzelnen, für das entwickelte Bausystem relevanten Stellen damit umgegangen wird.

Normative Vorgaben für den Holzbau

Ganz allgemein werden in der DIN 18202 Toleranzen für den Hochbau beschrieben. Hierbei geht es um Grenzabweichungen für Maße im Grund- und Aufriss. Für vorgefertigte Bauteile im Holzbau werden die einzuhaltenden Maße in der DIN 18203-3 genauer definiert, wobei hier auch auf die DIN EN 336, die Norm für "Bauholz für tragende Zwecke - Maße, zulässige Abweichungen" verwiesen wird. Die dort angegebenen Werte für die zulässigen Abweichungen liegen alle im geringen Millimeterbereich, was zeigt, dass im Holzbau normativ schon höchste Genauigkeit gefordert wird. Die zulässigen Toleranzen liegen damit im Bereich der Toleranzen im Stahlbau, übersteigen diese teilweise sogar.

Abbildung 43:
Zulässige Abweichungen für tragende Holzbauteile
Tabelle 2 aus DIN EN 336:12-2013

Für Dicken und Breiten $\leq 100\text{mm}$	(-1,0 bis +1,0)mm
Für Dicken und Breiten $> 100\text{mm}$ und $\leq 300\text{mm}$	(-1,5 bis +1,5)mm
Für Dicken und Breiten $> 300\text{mm}$	(-2,0 bis +2,0)mm

Gerade was Brettsperrholz anbelangt, liegen von den einzelnen Herstellern zusätzlich noch Europäisch Technische Bewertungen (ETA) vor. In diesen werden die Abmessungen des Bauteils und die Toleranzen, die hierbei auftreten können bzw. dürfen, teilweise nochmal genauer definiert. Die herstellereigenen Angaben zu den Toleranzen beschreiben dabei meist Maßabweichungen, die über die normativ zulässigen Grenzwerte hinausgehen. Es wird also eine noch größere Genauigkeit beschrieben. Der Hauptgrund für immer genauere Vorfertigung ist in der heutigen CNC-Abbundtechnik zu sehen, die durch Laservermessung und Computersteuerung in der Lage ist, die geforderten Genauigkeiten auch unter Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte zu gewährleisten.

Trotz der Genauigkeit heutiger Abbundmaschinen erfordern die zulässigen Toleranzen auch im Holzbau bei der Planung von Anschlusspunkten gewisse Vorkehrungen. So können bspw. die geringen Abweichungen von wenigen

Millimetern durch aufsummieren über mehrere hintereinandergeschaltete Bauteile trotzdem dazu führen, dass eine Passverbindung nicht mehr ausführbar ist. Bei der Entwicklung tragender Anschlussdetails ist somit der Bauablauf so zu planen, dass entweder die Passgenauigkeit auch auf der Baustelle gewährleistet werden kann, oder der Anschlusspunkt die normativ zulässigen Ungenauigkeiten verkraftet, in dem er trotzdem tragfähig bleibt.

Betrachtung der einzelnen Anschlussstellen im Bausystem

Für das geplante Bausystem werden im Folgenden die einzelnen zu berücksichtigenden Anschlusspunkte und die entsprechend notwendigen Anforderungen beschrieben. Die größte Herausforderung im Planungsprozess besteht dabei darin, flächige mit stabförmigen Bauteilen zu verbinden und dabei zu berücksichtigen, dass diese Bauteile meist von unterschiedlichen Herstellern abgebunden werden.

Ein Grundprinzip um den auftretenden Ungenauigkeiten Herr zu werden, ist das Bilden von Bauabschnitten, was durch die Rasterung gut einzuhalten ist. So können sich in den Grundrissabmessungen Maßungenauigkeiten nur bis zu einem bestimmten Maß aufsummieren. Ein Gebäudeabschnitt ist dabei so zu verstehen, dass das Gebäude nach einer gewissen Rasteranzahl unterteilt ist. Die einzelnen Abschnitte funktionieren statisch sowohl was die vertikale als auch was die horizontale Lastabtragung anbelangt, für sich. Mögliche Ungenauigkeiten können also im Bereich dieser Trennung des Gebäudes wieder egalisiert bzw. ausgeglichen werden.

Verbindung BSP-Wand an Stütze

Die erste zu betrachtende Verbindung besteht zwischen den Stützen und den zwischen den entsprechenden Stützen einzubauenden BSP-Wandelementen. Diese Verbindung muss die Schubkräfte aus den BSP-Elementen in die Stützen einleiten können, damit diese die aussteifenden Lasten schließlich in die darunterliegenden Geschosse bzw. die Fundamente ableiten können.

Da nicht auf metallische Verbindungsmittel zurückgegriffen werden kann, wurde als eine mögliche Lösung für diesen Anschlusspunkt eine formschlüssige Schubnocke angedacht. Hierbei greifen wie bei einer Verzahnung Nocken in Negativformen ein.

In Bezug auf die Toleranzen ist eine solche Verbindung allerdings kritisch zu sehen. BSP-Wandelement und BSH-Stützen werden meist von unterschiedlichen Herstellern geliefert und entsprechend auch direkt von diesen abgebunden. Die Nocken bzw. die Negativformen dazu müssen exakt ineinanderpassen, um die Kräfte sicher und vor allem ohne große Verformungen übertragen zu können.

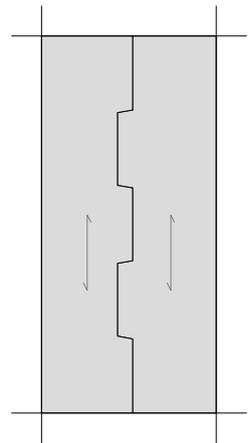
Eine bezüglich der Toleranzen genauere Lösung stellen sogenannte X-Fix-Verbinder dar. Diese schwalbenschwanzförmigen Verbinder werden aus Furnierschichtholz hergestellt und bestehen aus zwei keilförmigen Einzelteilen. Durch das Einschlagen der beiden Teile in die in den Bauteilen vorgefräste Negativform werden die angrenzenden Bauteile passgenau aneinander gezogen.

Damit sich in beiden Bauteilen die Negativformen passgenau gegenüberliegen, wird die erste Hälfte der Negativform zunächst nur in eines der beiden Bauteile gefräst (bspw. in die Kanten der BSP-Wandelemente). Die zweite Hälfte kann dann entweder beim Zimmerer im Werk erfolgen, in dem er die beiden Bauteile nebeneinanderlegt und mit einer Frässhablone die Form ausgearbeitet, oder in dem tatsächlich vor Ort erst die Bauteile in die richtige Lage gestellt werden und dann ebenfalls mit der Schablone die zweite Hälfte der Fräsung erfolgt. Das letztliche Fügen mit den keilförmigen Einzelteilen ist in beiden Fällen nur noch Formsache.

Der Vorteil der X-Fix Verbinder ist, dass die Decken durch das Einschlagen der Verbindungsmittel ohne Weiteres aneinander gepresst werden. Im Vergleich dazu müssen bei geschraubten Verbindungen die angrenzenden Bauteile zuerst mit Spanngurten aneinandergespreßt werden, bevor die Schrauben eingebracht werden können, die die Bauteile fixieren.

Nachteil der Verbindung mittels X-Fix-Verbindern ist allerdings, dass die Verbindung nur gelöst werden kann, indem die Verbinder mit einem Spezialwerkzeug ausgehebelt werden, was den Demontageaufwand wiederum erhöht.

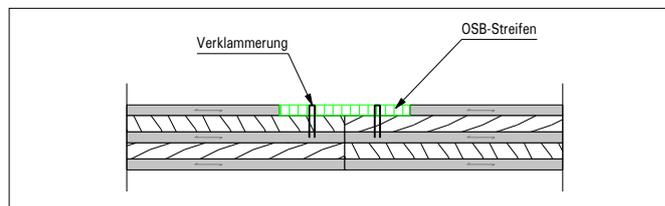
Abbildung 44:
Nocken als formschlüssige Schub-
verbindung, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH



Verbindung der Deckenelemente

Um als Scheibe wirken zu können, müssen die einzelnen BSP-Deckenelemente schubsteif miteinander verbunden werden. Eine einfache und für einen konventionellen Bau sehr praktikable Lösung hierfür besteht darin, die Deckenelemente oberseitig einige Millimeter auszufräsen und anschließend einen OSB-Plattenstreifen als Verbindungsstück auf beiden Elementen anzuklammern.

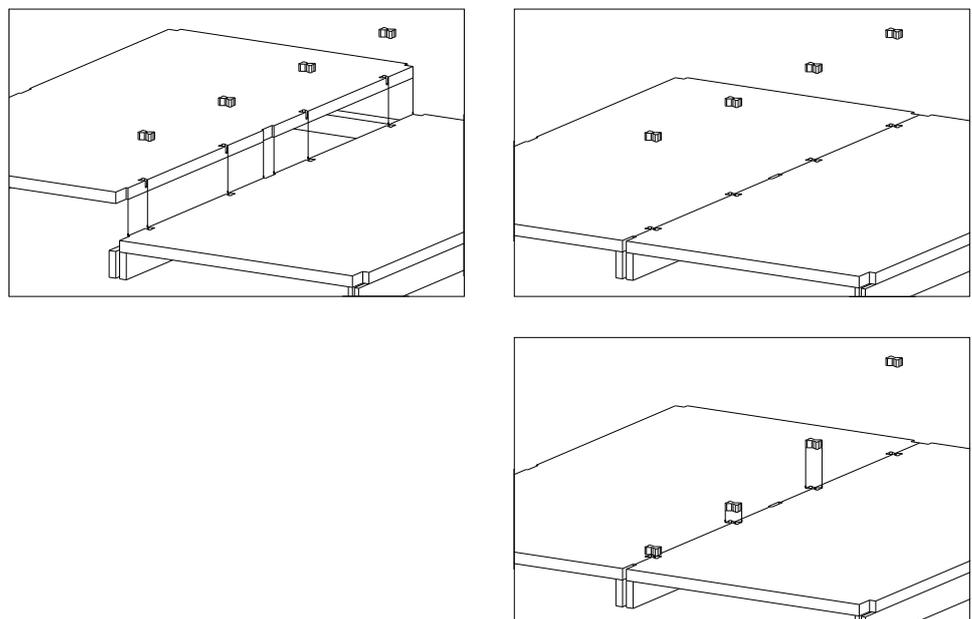
Abbildung 45:
konventionelle Verbindung zweier
BSP-Deckenelemente, 2019, Pir-
min Jung Deutschland GmbH



Um nun weiterhin ein Bausystem zu haben, das in seiner tragenden Struktur ohne metallische Verbindungsmittel auskommt, war der erste Gedanke, die Klammern durch Holznägel zu ersetzen. Diese besitzen jedoch bislang keine bauaufsichtliche Zulassung.

Als eine sehr wirksame und baupraktisch einfach und gut umzusetzende Alternativlösung, stellte sich die Verbindung mit X-Fix-Verbindern heraus. Wie beim Anschluss BSP-Wand an Stütze schon beschrieben, werden die Deckenelemente durch das Einschlagen der beiden keilförmigen Teile in die in den Deckenelementen vorgefräste Negativform passgenau aneinander gezogen. An allen Außenauflagern eingeplante Toleranzen von 10-20mm erlauben so die Ausbildung von Deckenscheiben über den gesamten Grundrissbereich.

Abbildung 46:
möglicher Montageablauf bei der
Verbindung zweier BSP-Deckenele-
mente; von oben nach unten: alle
X-Fix-Negativformen sind bereits in
den Deckenelementen eingefräst;
die Elemente werden zueinander
ausgerichtet; auf der Baustelle kön-
nen die X-Fix-Verbinder passgenau
eingebracht werden, 2019, Pirmin
Jung Deutschland GmbH



Verbindung Decke an Unterzug

Die Verbindung der Decken an die Unterzüge dient zum einen der Lage-sicherung der Deckenelemente, zum anderen aber auch der Übertragung von Schubkräften aus den Deckenscheiben in mögliche, unter dem Unterzug liegende, aussteifende BSP-Wandscheiben. Im konventionellen Bau würde man die Decken mittels Voll- oder Teilgewindeschrauben am Unterzug befestigen. Eine einfache Variante ohne metallische Verbindungsmittel besteht aus Buchendübeln. Diese werden ebenso wie die metallischen Verbindungsmittel in regelmäßigen Abständen eingeplant. Wie die alternativ verwendeten Schrauben, werden die Dübel auf Abscheren beansprucht und gewährleisten so die Kraftübertragung.

Um auf der Baustelle die Passgenauigkeit zwischen den anzuschließenden Bauteilen zu gewährleisten, werden die Dübellöcher in den Decken bereits im Werk vorgebohrt, im Gegenstück jedoch nicht. Die in den Decken vorgebohrten Löcher dienen auf der Baustelle als Führung um die exakte Lage der Löcher durch Durchbohren in den Unterzug zu übertragen. Anschließend können die Dübel eingeschlagen werden und Form- und Kraftschluss der Verbindung sind damit gegeben. Evtl. aufgekommene Ungenauigkeiten in den Bauteilabmessungen können so vermieden werden. Die folgenden Abbildungen stellen den Bauablauf grafisch dar:

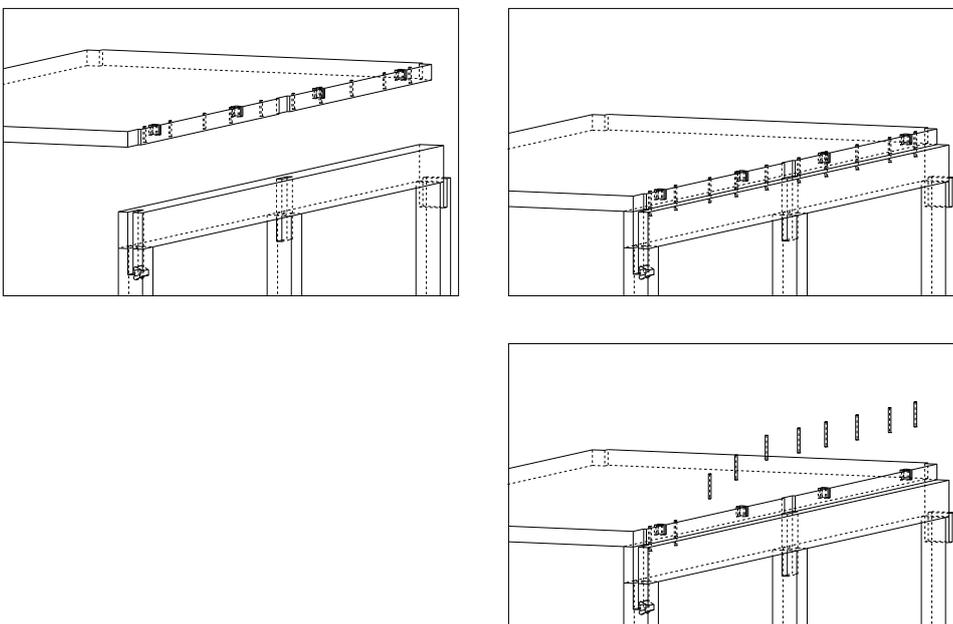
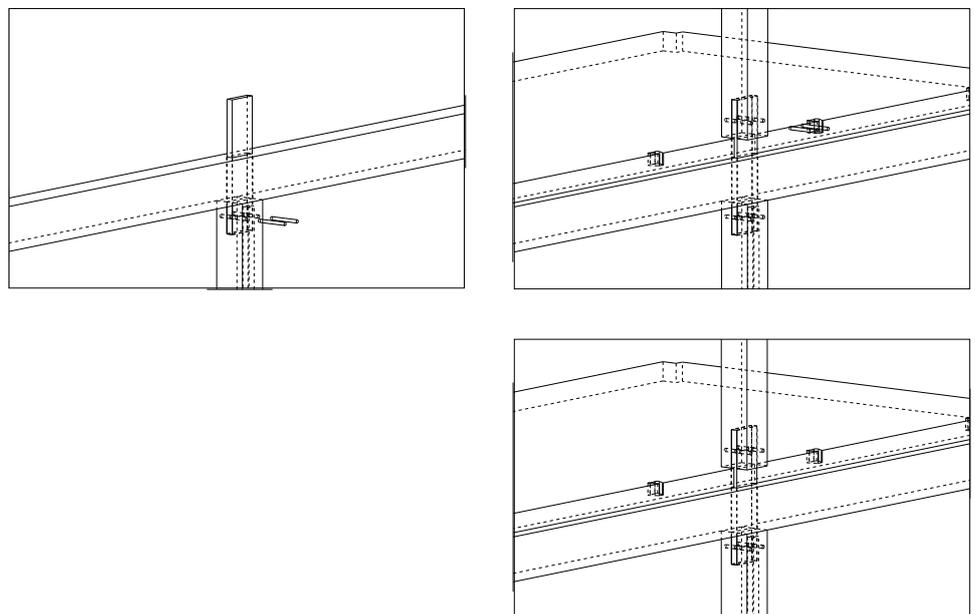


Abbildung 47: möglicher Montageablauf bei der Verbindung BSP-Deckenelemente an Unterzug; von oben nach unten: Dübellöcher in BSP-Elementen bereits vorgebohrt; auf der Baustelle werden die Bohrungen bis in den Unterzug vertieft; anschließend Buchendübel einschlagen, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH

Verbindung Unterzug an Stütze

Wie bereits beschrieben kann die Kraftübertragung aus den Stützen der oberen Geschosse in die Stützen der darunterliegenden Geschosse nicht über Querdruck erfolgen. Hierfür wurde ein Detail mit einer durchstoßenden Lasche entwickelt. Ebenfalls durch Buchendübel verbindet die Lasche so die beiden übereinanderstehenden Stützen. Je nach Anforderungen kann diese Verbindung sowohl Druck- als auch Zugkräfte übertragen. Um an dieser wichtigen Stelle keine Passungenauigkeiten bzgl. der Laschen-Dübel-Verbindung zu erhalten, wird die Lasche zunächst im Werk mit der unteren Stütze verbunden. Im oberen Bereich werden allerdings noch keine Löcher vorgebohrt. Nach dem Auflegen und Verbinden der Unterzüge und der Deckenelemente kann anschließend die obere Stütze auf die Lasche aufgesetzt werden. Im Fußbereich der oberen Stütze sind die Dübellöcher bereits vorgebohrt und dienen jetzt nach exakter Ausrichtung als Führung für das Durchbohren der Lasche. Eventuell vorhandene Höhentoleranzen können durch Zulagen ausgeglichen werden. Nach Einbringen der Dübel in die dafür vorgesehenen Löcher liegt auch an diesem Anschlusspunkt eine passgenaue Verbindung vor. Die folgenden Abbildungen zeigen den Montageablauf:

Abbildung 48:
möglicher Montageablauf bei der Verbindung zwischen übereinanderstehenden Stützen; von oben nach unten: Lasche bereits ab Werk mit unterer Stütze verbunden; auf der Baustelle wird obere Stütze über der Lasche ausgerichtet; vorbereitete Bohrungen im Fuß der oberen Stütze werden vor Ort in die Lasche übertragen; anschließend werden die Dübel eingebracht, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH



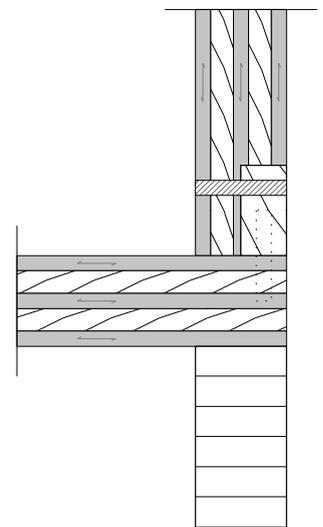
Verbindung BSP-Wand an Decke

Die größte Herausforderung im entwickelten Bausystem besteht in der tragfähigen Verbindung eines Deckenelementes mit einer darüberstehenden Wandscheibe. Die Wand muss hier in der Lage sein im Aussteifungsfall Schubkräfte an die Decke weiterleiten zu können. Die Decke wiederum leitet diese an den darunterliegenden Unterzug bzw. die darunter stehende Wandscheibe weiter.

Eine Möglichkeit besteht darin, eine Bohrschablone aus Metall herzustellen und über diese in Decke und unterseitiger Schmalseite der BSP-Wand identische Bohrungen gewährleisten zu können. Die Schablone muss dabei vor dem Bohren über eine Markierung an Decke bzw. Wand exakt ausgerichtet werden.

Eine weitere Möglichkeit könnte in einer zusätzlichen Schwelle bestehen. Diese kann problemlos in gleicher Weise wie die Decken auf die Unterzüge montiert werden. Die Verbindung von Wand an Schwelle kann wiederum ähnlich wie das Verbinden der oberen Stütze an die Lasche geschehen. Im BSP-Wandelement sind entsprechende Löcher schon vorgebohrt. Nach dem Ausrichten der Wand über der Schwelle, können die Bohrungen bis in die Schwelle vertieft werden. Problem dieser Anschlusslösung ist der geringe Restquerschnitt der Schwelle. Durch die vielen Bohrungen in derselben können nur geringe Schubkräfte übertragen werden.

Abbildung 49:
mögliche Verbindung zwischen
BSP-Wand und darunterliegender
BSP-Decke, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH



Bilanz

Mit den oben beschriebenen Detaillösungen ist man in der Lage die fertigungs- und evtl. witterungsbedingten Maßungenaugigkeiten auszugleichen. Die Verbindungen können teilweise im Werk schon vorbereitet werden, sodass der Aufwand auf der Baustelle geringgehalten werden kann. In situ sind letztlich nur noch Bohrungen zu vertiefen bzw. Dübel oder X-Fix-Verbinder einzuschlagen. Im Vergleich zum Eindrehen etlicher Schrauben erscheint der Aufwand mindestens vergleichbar, an einigen Anschlusspunkten sogar deutlich geringer (Verbinden der Deckenelemente oder Anschluss Stütze an Stütze).

Allen Verbindungen gemein ist allerdings der Aufwand bei der Demontage, da alle Dübel- oder X-Fix-Verbindungen nur durch Aufbohren gelöst werden können.

BRANDSCHUTZ UND TRAGWERK (HEISSBEMESSUNG)

Die Brennbarkeit des Primärbaustoffs erfordert eine besondere Beachtung des Brandschutz. Im einfachsten Fall kann das Holz sich selbst vor dem Abbrand schützen. Holz bildet eine relativ stabile Kohleschicht beim Brand, die wiederum den Abbrand verzögert. Dies wird bei der Heißbemessung von Bauteilen genutzt, indem die Querschnitte größer dimensioniert werden, als für das Tragverhalten erforderlich, so dass im Brandfall der tragende Restquerschnitt die Standsicherheit für den definierten Zeitraum gewährleistet. Die form- und kraftschlüssigen Verbindungen können dabei grundsätzlich wie ein homogenes Bauteil betrachtet werden. In der Praxis ist jedoch darauf zu achten, dass die Fugen so dicht sind, dass der Brand nicht in diese eindringen kann.

Grundsätzlich nehmen die tragenden und aussteifenden Bauteile aufgrund der schlechten Entflammbarkeit einer geschlossenen Holzfläche erst nach fünf bis zehn Minuten am Brandgeschehen teil, das bis dahin vor allem durch die Möblierung und Ausstattung genährt wird. In den meisten Fällen sind die Wohnungen bis dahin evakuiert, womit das primäre Schutzziel des Brandschutz erreicht ist. Soll die Teilnahme an der Konstruktion verhindert werden, weil dies normativ vorgeschrieben ist und/oder höhere Risiken für die Evakuierung bestehen (höhere Gebäude, komplexere Grundrisse), so kann die Primär-Konstruktion aus Holz durch eine Verkleidung in Kapselbauweise so ertüchtigt werden, dass die brennbaren Bauteile für einen definierten Zeitraum (30min., 60min., 90min.) vor dem Brand geschützt wird.

Für die unterschiedlichen Bauteile lassen sich folgende allgemeine Aussagen für den Brandschutz und das Tragwerk treffen, die sich aus den unterschiedlichen Anforderungen ergeben (vgl. dazu: 3.3 Rahmenbedingungen Brandschutz). Grundsätzlich ist die Heißbemessung im entwickelten Rechentool integriert, weswegen die erforderlichen Querschnitte in dem Rechentool automatisch angegeben werden.

Decken

Bei Decken wird der Heißnachweis lediglich bei Spannweiten kleiner 3 Meter und unter 90 Minuten Feuereinwirkung maßgebend. Die Decken entsprechend brandschutztechnisch zu bekleiden ist also höchstens in diesen Fällen sinnvoll.

Abbildung 50:
erf. Deckenquerschnittshöhe [mm]
in Abhängigkeit von Spannweiten
– maßgebene Nachweise (oben
mit Brandanforderung R30; unten
mit Brandanforderung R90), 2019,
Pirmin Jung Deutschland GmbH

Decke									
Brandbeanspr.		30 [min]		Anford. GZG		l/ 300		$f_{\text{grenz}} = 8,00$	
Nachweis	Spannweite Decke l_{DE} [m]								
	2,50	2,65	2,85	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	
GZT_kalt	120	120	120	120	120	120	120	140	
GZT_warm	120	120	120	120	120	120	120	120	
GZG	120	120	120	120	140	160	200	220	
alle NWs	120	120	120	120	140	160	200	220	
Brandbeanspr.		90 [min]		Anford. GZG		l/ 300		$f_{\text{grenz}} = 8,00$	
Nachweis	Spannweite Decke l_{DE} [m]								
	2,50	2,65	2,85	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	
GZT_kalt	120	120	120	120	120	120	120	140	
GZT_warm	140	140	140	140	140	160	180	180	
GZG	120	120	120	120	140	160	200	220	
alle NWs	140	140	140	140	140	160	200	220	

Unterzüge

Bei den Unterzügen zeigt sich, dass die Bemessung im Brandfall auch für GK5 unter den betrachteten geometrischen Anforderungen nie maßgebend wird. Hier bestimmen immer die Nachweise für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Querschnittsabmessungen. Eine Brandschutzbekleidung der Unterzüge ist daher nicht sinnvoll. Jedoch muss entsprechend der Anforderungen des jeweiligen Bundeslandes evtl. dennoch eine solche Beplankung vorgesehen werden.

Stützen

Für die Stützen ergibt sich ein komplett anderes Bild. Hier kann die Heißbemessung schon bei 30 Minuten Brandanforderung und kurzen Rastermaßen maßgebend werden. Das hängt allerdings von einer weiteren geometrischen Komponente, der Geschosshöhe, ab. Diese beeinflusst die Länge der Stütze, was wiederum Einfluss auf die Knicklänge hat. Im Brandfall und dem damit verbundenen Querschnittsverlust steigt der Einfluss der Knicklänge auf die Bemessung erheblich an. Ein weiterer Faktor, der nur bei den Stützen zum Tragen kommt, ist die Anzahl der Geschosse. Während die Decken und

Unterzüge unabhängig von der Anzahl der Geschosse immer nur die Lasten aus einem Geschoss abtragen müssen, summiert sich die Bemessungslast der Stützen über die Geschosse auf.

Durch die Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Stützenbemessung lässt sich nur schwer eine Aussage treffen, wann eine Beplankung Sinn ergibt und wann nicht. Dies muss im Einzelfall genauer betrachtet werden.

Es lässt sich allerdings sagen, dass sich der Einfluss einer brandschutztechnischen Beplankung hauptsächlich bei schlanken Stützen bemerkbar macht. Je schlanker die Stütze, desto negativer wirkt sich die Querschnittsreduzierung auf Grund der Brandeinwirkung auf die Knicklänge aus.

VERSUCHE TESTAUFBAU 1:1 - UNTERSUCHUNG AM MODELLVORHABEN UND DEMONSTRATOR

Modellvorhaben / Praxistests

Das zu entwickelnde Bausystem soll an einem Wohngebäude erprobt werden. Das Projekt dgj228 Wohngruppe Friedberger Landstraße in Frankfurt am Main wurde dazu als Modellvorhaben ausgewählt.

Bei dem Wohngebäude wurde die Entwurfsplanung (Architektur und Tragwerk) abgeschlossen. Die ausführungsfähige Planung befindet sich derzeit in der Abstimmung mit der Bauaufsicht. Die Dimensionierung des Tragwerks hängt maßgeblich von den Anforderungen des Brandschutzes ab, weil in dem gegenständlichen Fall eine Heißbemessung der Bauteile auf Abbrand umgesetzt werden soll. Eine solche Ausführung liegt allerdings derzeit außerhalb der hessischen Bauordnung, die für tragende und aussteifende Bauteile eine Ausführung in hoch-feuerbeständiger Bauweise (F90-BA oder F60-BA) vorschreibt. Diese Bauweise lässt sich nur mit einer zusätzlichen Brandschutzverkleidung der Holzbauteile herstellen. Im Moment befindet sich die Hessische Bauordnung HBO in Überarbeitung und in den letzten Beratungen im Landtag, weswegen mit einer baldigen Änderung der gesetzlichen Grundlage gerechnet werden kann.

Im Zuge der Ausführungsplanung für das Tragwerk eines Gebäudes werden die Anschlusspunkte der Bauteile, die zuvor in der Bearbeitung der Stabstatik bemessen wurden, näher betrachtet. Dies lässt sich auch mit der Untersuchung des lokalen Tragwerks beschreiben. Letztlich wird hierbei analysiert, wie beispielsweise die Lasten vom Sekundär- ins Primärtragwerk weitergeleitet werden bzw. wie die Schnittstellen zwischen zwei Positionen verbunden/überbrückt werden können.

Da die Ausbildung dieser Anschlusspunkte mitunter die Dimensionen der einzelnen Bauteile des globalen Tragwerks beeinflussen, muss auch das lokale Tragwerk frühzeitig in die Planung integriert werden. Gegebenenfalls sind Verstärkungen in den Anschlussbereichen nötig.

Der Anschluss der massiven Wandelemente an die Träger erfolgt mit Schwalbenschwanzverbindungen. Diese Verbindung ist aufwendig in der Herstellung, erlaubt aber auch die Übertragung von Scher-, Druck und Zugkräften. Die Montage der Bauteile wird beschleunigt, indem direkt beim Versetzen der Verbund im Tragwerk entsteht, ohne dass sekundäre Elemente wie Holzdübel oder Schwalbenschwanzverbinder eingebaut werden müssen. Entsprechend einfach ist auch die spätere Demontage des Systems. Nachteil ist, dass die Fügung und Montage ein ungewöhnlich hohes Maß an Genauigkeit erfordert.

Interessant ist an dieser Stelle auch die Diskussion der Schwächung der tragenden Querschnitte durch die geometrischen Anschlüsse. Hier wurde in der Entwicklung des Systems eine Synergie zwischen dem Brandschutz und dem Tragwerk gesucht. So wird bei der Heißbemessung des Querschnitts nicht das ganze Holzvolumen für den Lastabtrag angesetzt, sondern eine Schicht angenommen, die im Brandfall langsam abbrennt und somit die Standsicherheit des Restquerschnitts für die geforderte Zeitdauer gewährleistet.

Anders sind die form- und kraftschlüssigen Anschlüsse zu beurteilen, wenn statt einer Heißbemessung der Brandschutz durch eine Brandschutzverkleidung umgesetzt wird. In diesem Falle muss die Schwächung der Querschnitte berücksichtigt werden, weil der gesamte Querschnitt eine tragende Funktion hat. Die Einschnitte führen dann zu größeren Dimensionen der Bauteile.

Im Modellvorhaben wurden die Verbindungen zwischen Stütze und Träger sowie Träger und Decke im Verlauf der Planung zunehmend ausdifferenziert, d.h. in eigenen geometrischen Räumen getrennt. In vertikaler Richtung werden die Kräfte durch das Auflegen der Elemente erreicht, die mit Buchendübeln in der Lage gesichert sind. Die Scheibenwirkung der Deckenelemente wird erzielt, indem die Deckenelemente untereinander mit Schwalbenschwanzverbindern angeschlossen werden. Die Differenzierung hat zwei Vorteile: Zum einen gestaltet sich der Abbund für die einzelnen Bauteile aufgrund ihrer einfacheren Geometrie weniger kompliziert. Zum anderen erlaubt die Trennung der Bauteile, die Maßgenauigkeiten zwischen den einzelnen Teilen des Tragwerks individuell auszugleichen, indem die horizontale Passgenauigkeit zunächst nicht für den Kraftschluss entscheidend ist. Die vertikale Genauigkeit kann mittels Zulagen egalisiert werden.

Nachteil der Fügung ist, dass die Verbindung mit Buchendübeln nur gelöst werden können, indem die Buchendübel ausgebohrt werden, was den Demontageaufwand deutlich erhöht.

Bauteiltest und Demonstrationsbau (Demonstrator)

Parallel zu der Forschungsarbeit wurde ein Demonstrationsbau (Demonstrator) geplant und hergestellt, an dem der Stand der System-Entwicklung überprüft wurde. Bei dem Demonstrator wurde das gesamte Tragsystem und die Anschlusspunkte exemplarisch umgesetzt, so dass an diesem Beispiel die Tauglichkeit des Systems beurteilt werden kann. Mit dem Bau des Demonstrators wurde zu Ende April begonnen und er wird zu Mitte Mai 2018 fertiggestellt.

Der Demonstrator wurde genutzt, um die Umsetzbarkeit der Fügungen zu testen und zu optimieren. Dabei wurden die Verbindungen beim Demonstrator handwerklich hergestellt.

Dabei ging es vor allem um die Umsetzbarkeit der geometrischen (integralen) Fügung im Bauprozess. Die Entwicklung des Bausystems war zu diesem Zeitpunkt noch auf eine integrierte Formulierung der Knotenpunkte und Anschlüsse der Decken und Träger ausgelegt. Die Wände wurden mit Federn an die Stützen angeschlossen.

Abbildung 51:
Demonstrations-Bau (Demonstrator) (DGJ Architektur, 2018).



VERSUCHE ZUM LOKALEN TRAGWERK UND HOLZ-HOLZ-VERBINDUNGEN

Ausbildung von Musterdetails

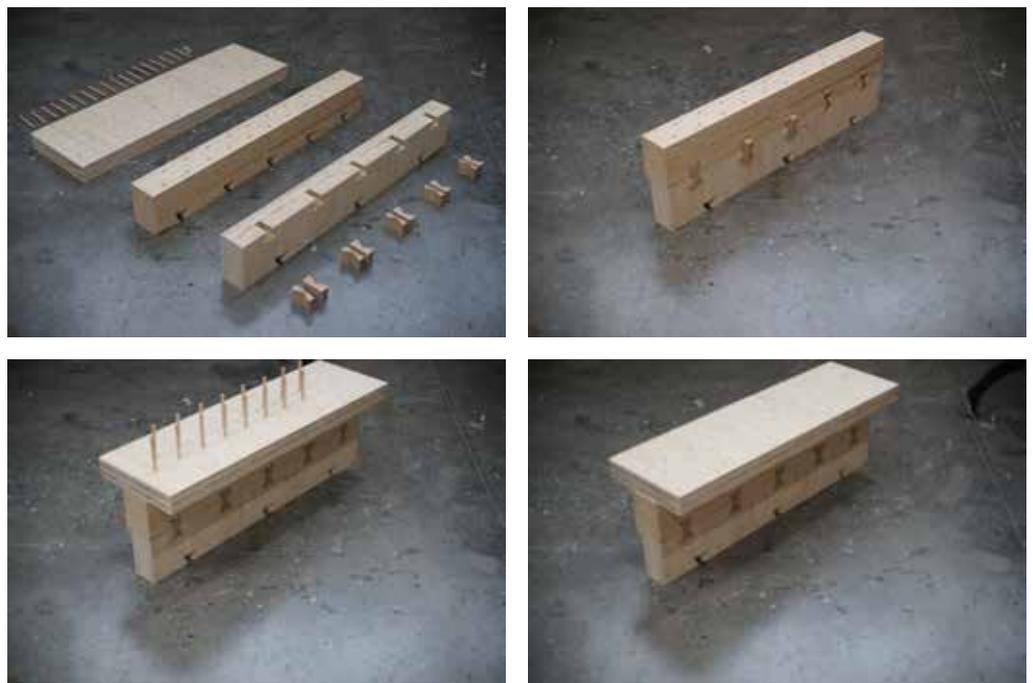
Bei der Entwicklung des lokalen Tragwerkes wurden an einigen Punkten Details entwickelt, die sowohl den Abbund als auch den Montageablauf betreffend durchaus als komplex bezeichnet werden können.

Um sicherzustellen, dass die geplanten Detailausbildungen auch in Realität umsetzbar sind, wurden von der Firma Brüggemann Musterdetails erstellt. Zwei dieser Detailpunkte sollen hier im Folgenden herausgegriffen und genauer beschrieben werden.

Es ist dabei zu beachten, dass es sich um einen Zwischenstand in der Systementwicklung handelt. Im weiteren Verlauf der Forschung und auch in Folge der Erkenntnisse aus den Musterversuchen wurden die Detailausführungen abgeändert. So werden beispielsweise keine Mehrfeldträger wie im zweiten Musterdetail dargestellt im Bausystem übernommen.

Der erste Detailpunkt, der hier genauer betrachtet wurde, ist der schubsteife Anschluss zwischen BSP-Wandscheibe und Unterzug bzw. zwischen Unterzug und BSP-Deckenelement. Die Verbindung von BSP-Wandscheibe zu Unterzug erfolgt über X-Fix-Verbinder. Dazu sind im BSP und im Unterzug jeweils die Negativformen auszufräsen, was in den jeweiligen CNC-Abbindanlagen der Hersteller erfolgen kann. Unterzug und Decke sind über zwei versetzte Reihen von Buchendübeln miteinander verbunden.

Abbildung 52:
Montageablauf Detailpunkt
Wand-Unterzug-Decke (einzelne
Schritte von links oben nach rechts
unten; links oben die Einzelteile für
den Anschlusspunkt), Fotos DGJ



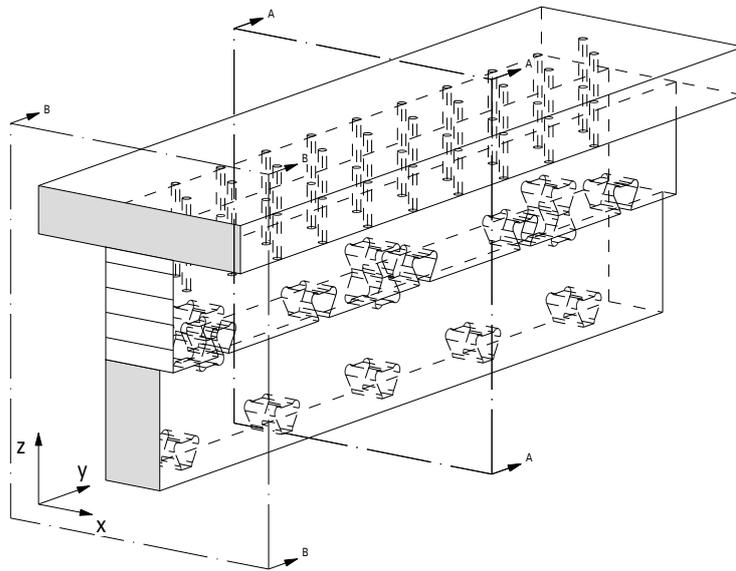


Abbildung 53:
Detailpunkt Wand-Unterzug-Decke
- Isometrie, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH

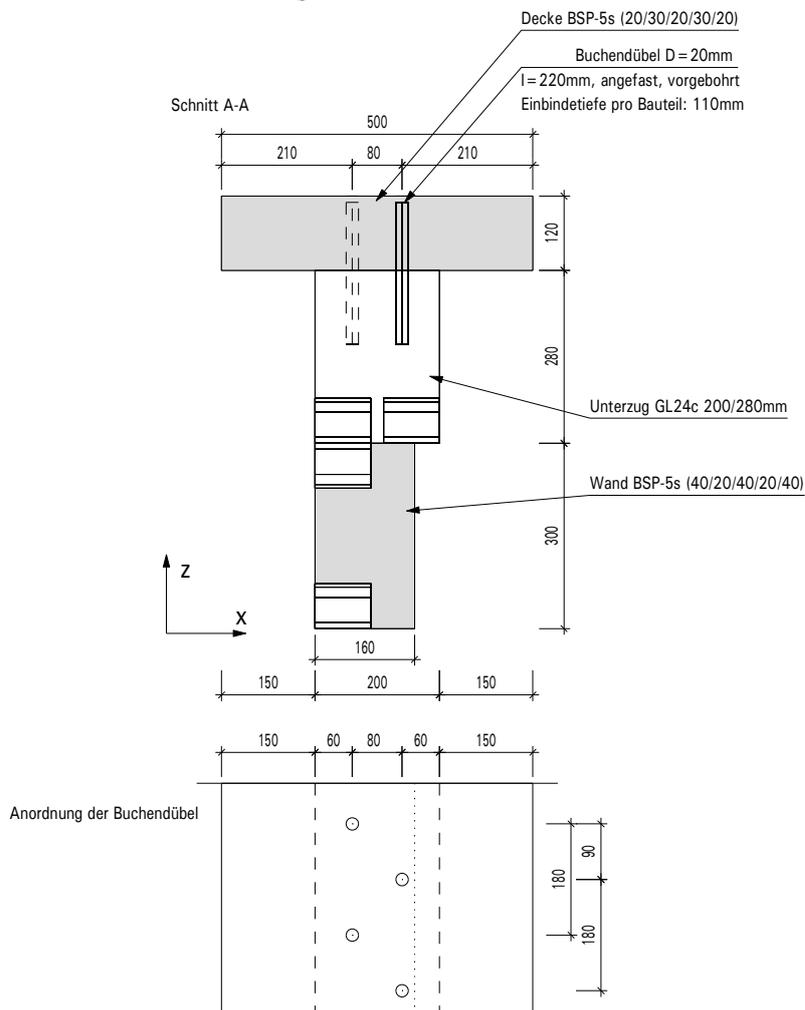
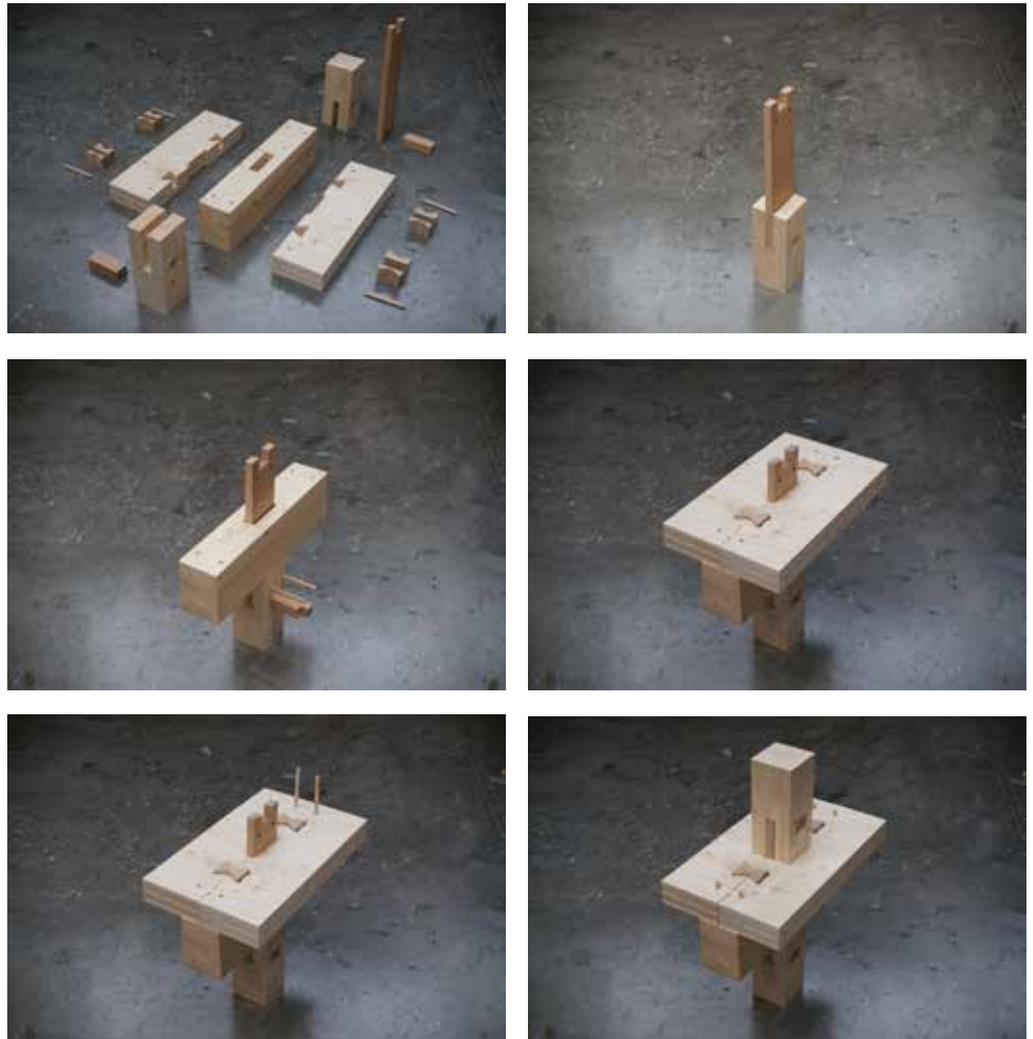


Abbildung 54:
Detailpunkt Wand-UNterzug-Decke
- Schnitt A-A zur Isometrie, 2019,
Pirmin Jung Deutschland GmbH

Das zweite Musterdetail entspricht dem Knoten im Kreuzungspunkt zweier Rasterachsen. An diesem Punkt treffen nicht nur zwei übereinanderstehende Stützen aufeinander, hier liegen auch die Unterzüge auf den Stützen auf. Hinzu kommt die Auflagerung der Decken auf den Unterzügen. Die folgende Darstellung zeigt das Detail, wie es zu Testzwecken nachgebaut wurde. Es ist darauf hinzuweisen, dass dabei weniger Dübelverbindungen ausgeführt wurden, als für einen realen Lastfall notwendig wären. An dieser Stelle stand in erster Linie der Montageprozess im Fokus des Versuchs.

Abbildung 55:
Montageablauf Detailpunkt Stütze
auf Stütze (einzelne Schritte von
links oben nach rechts unten; links
oben die Einzelteile für den Knoten-
punkt), Fotos DGJ



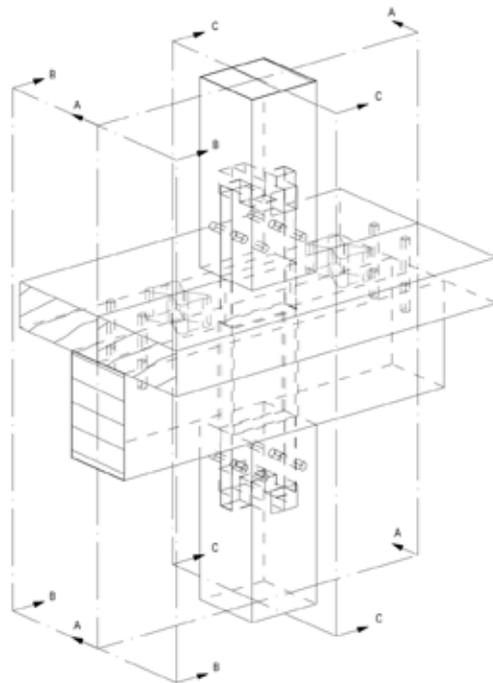


Abbildung 56:
Detailpunkt Stütze auf Stütze -
Isometrie, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH

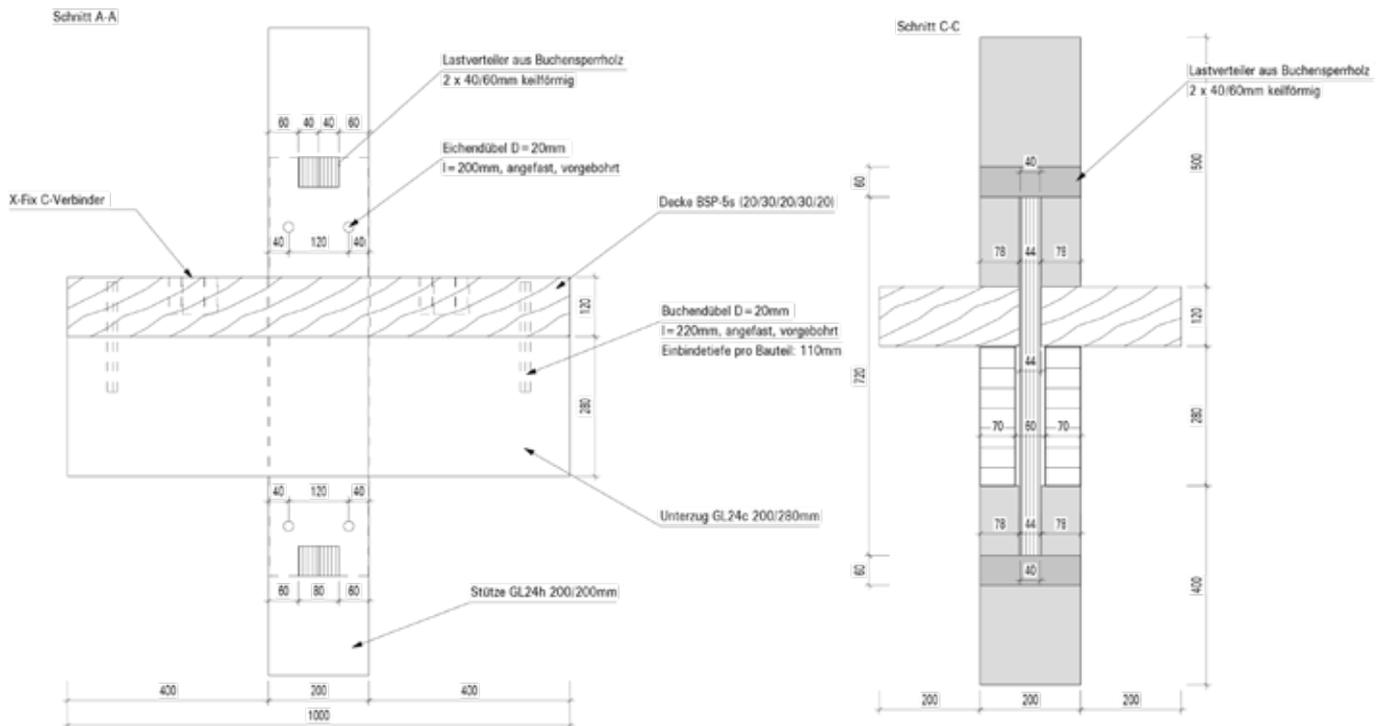


Abbildung 57:
Detailpunkt Stütze auf Stütze -
Schnitte A-A und C-C zur Iso-
metrie, 2019, Pirmin Jung Deutsch-
land GmbH

Die Schnitte verdeutlichen die Komplexität des Anschlusspunktes. Die Stütze muss eingeschlitzt werden, um die Lasche aus Buchenfurnierschichtholz aufnehmen zu können. Die Lasche aus Buchen-FSH ist wiederum ausgeklinkt um die Lastverteiler oben und unten aufnehmen zu können. Die Buchendübel dienen im Musterdetail der Lagesicherung zwischen Lasche und Stütze, in Realität können über die Dübel mögliche Zugkräfte weitergeleitet werden. Der Unterzug und die Deckenelemente sind im Bereich der Lasche ausgeklinkt, um diesen Platz zu bieten. Die Deckenelemente sind zum einen über Buchendübel mit dem Unterzug verbunden. X-Fix-Verbinder sorgen oberhalb des Unterzuges für den Verbund der Deckenelemente untereinander, um als ganze Deckenscheibe wirken zu können.

Arbeitsschritte und Prozessdauern für Abbund und Montage

Aus der Dokumentation der Abbund- und Montageprozesse konnten für die zur Herstellung der reinen Holzverbindungen notwendigen Arbeitsschritte durchschnittliche Angaben zum Zeitaufwand abgeleitet werden. Auf Grundlage der Gebäudedimensionen des Modellvorhabens wurde eine überschlägige Hochrechnung für den gesamten Zeitaufwand aufgestellt.

		Verbindung	Prozess	Dauer Einzelverbindung	Anzahl	Dauer gesamt
Musterstück 1	Abbund	Decke an Unterzug	d=20mm; Tiefe 120mm	8 s	600	1,33 h
			d=20mm; Tiefe 110mm	8 s	600	1,33 h
		Unterzug an Wand	Fräsen für X-Fix-Verbinder Unterzug	75 s	420	8,75 h
			Fräsen für X-Fix-Verbinder Wand	75 s	420	8,75 h
						20,17 h
	Montage	Decke an Unterzug	Einschlagen der Buchendübel	20 s	600	3,33 h
		Unterzug an Wand	Einbringen X-Fix-Verbinder	5 s	420	0,58 h
						3,92 h
Gesamtdauer Abbund und Montage:						24,08 h
Musterstück 2	Abbund	Stütze auf Stütze	Bohrung für Buchendübel	17 s	270	1,28 h
			Aussparung Deckenelemente	25 s	135	0,94 h
			Aussparung für Buchenlasche	240 s	270	18,00 h
			Aussparung für Lastverteiler	120 s	270	9,00 h
						29,21 h
	Montage	Stütze auf Stütze	Einschlagen der Buchendübel	20 s	270	1,50 h
			Einbringen der Lastverteiler	5 s	270	0,38 h
						1,88 h
Gesamtdauer Abbund und Montage:						31,09 h

Diese Ergebnisse können dabei ausdrücklich nicht als Grundlage für eine Planung der Herstellungs- und Planungsprozesse herangezogen werden und dienen ausschließlich zum Vergleich reiner wertschöpfender Arbeitsschritte zur Herstellung der Holzverbindungen. Zusätzlich notwendige Arbeiten wie Maschinen- und Baustelleneinrichtung, Positionierung der Bauteile und gegebenenfalls projektbedingte Einschränkungen im Prozessablauf werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Des Weiteren sind die Bedingungen der Herstellung der Musterstücke nur bedingt übertragbar. So stehen beispielsweise für das Einschlagen der Buchendübel bisher keine Geräte zur Verfügung, weswegen die Dübel nur manuell eingeschlagen werden können. Es ist demnach mit einer erheblichen Ermüdung der ArbeiterIn und in Folge einer Verlangsamung zu rechnen, wenn eine größere Anzahl von Dübel in Folge eingetrieben werden sollen.

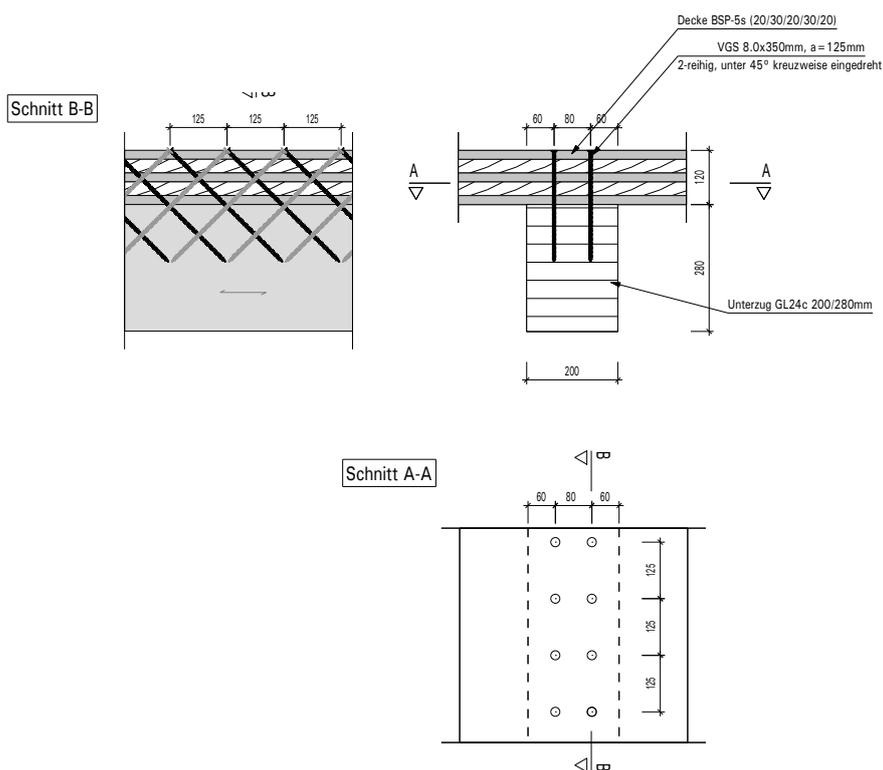
Dennoch erlauben die Betrachtungen eine Einschätzung, inwieweit sich die Verwendung von Holzverbindungen zeitlich und im Montageaufwand niederschlägt und Vorteile gegenüber einer Ausführung mit konventionellen Verbindungsmitteln aus Stahl entstehen.

Vergleich zur Ausführung mit Stahl-Verbindungsmiteln

Entsprechend der bei der Entwicklung der Musterdetails angesetzten Lastannahmen wurden für dieselben Bauteilanschlüsse Ausführungsvarianten mit Stahlverbindungsmiteln erstellt.

Für den Anschluss der Deckenelemente an die Unterzüge kommen dabei diagonal in zwei Reihen eingebrachte Vollgewindeschrauben zum Einsatz. Bei einem Abstand von 125 mm werden je Meter 16 Schrauben benötigt. Zum Vergleich werden 11-12 Buchendübel je Meter eingesetzt.

Abbildung 58:
Detailpunkt Decke an Unterzug
Ausführung mit Stahlverbindungs-
mitteln, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH



Die schubsteife Verbindung zwischen Unterzügen und Wandelementen wird durch Nagelplatten hergestellt. Wie für die X-Fix-Verbinder wird ein Abstand von 400 mm, dementsprechend 2,5 Stück je Meter angesetzt.

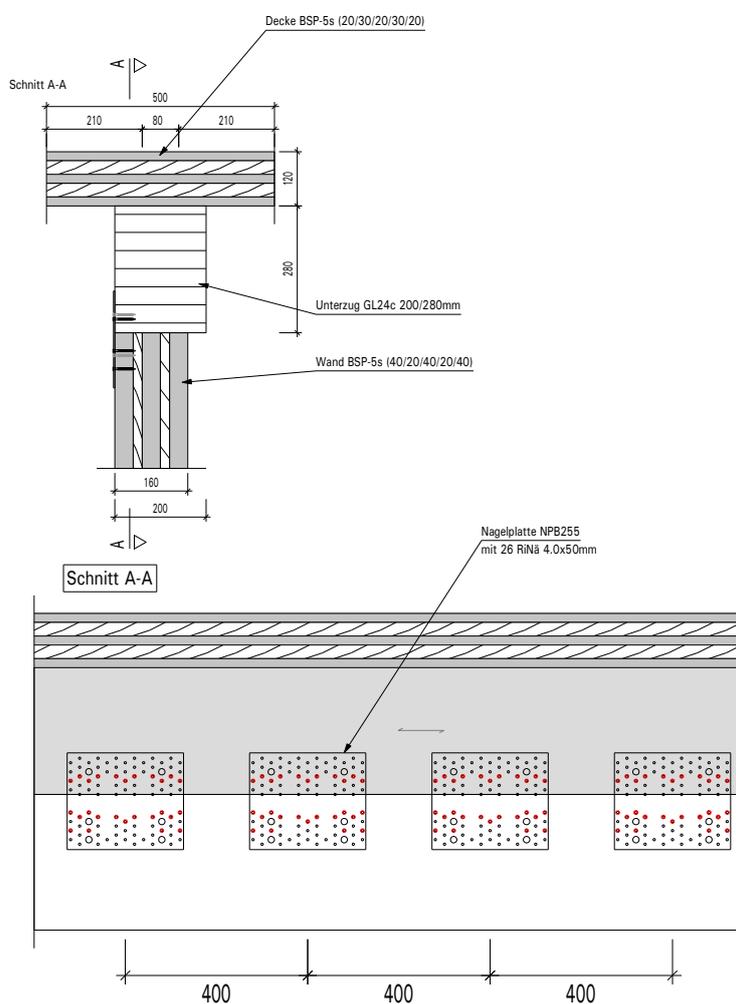
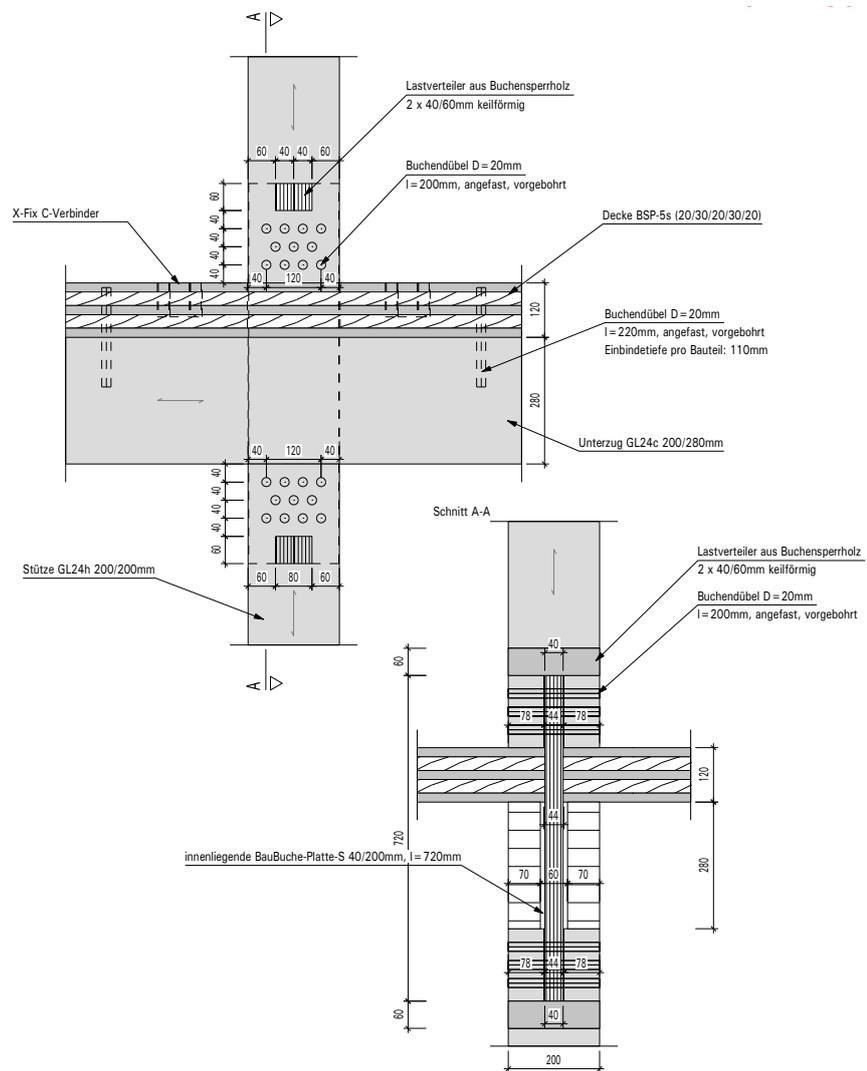


Abbildung 59:
Detailpunkt Wand an Unterzug
Ausführung mit Stahlverbindungs-
mitteln, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH

Es lässt sich aus dem Vergleich ableiten, dass der Material- und Montageaufwand für die Holzverbindungen grundsätzlich geringer ausfällt. Die Anzahl der Verbindungsmittel ist auf ein gesamtes Gebäude skaliert erheblich geringer bzw. ist mit einer deutlich schnelleren Montage vor Ort zu rechnen. Andererseits entfallen bei der Ausführung mit Stahlverbindungen die vorbereitenden Arbeitsschritte im Abbund.

Die abweichende Ausführung bei der Herstellung des Musterstücks für den Anschluss der Stützen besteht in der Anzahl tatsächlich notwendiger Dübelverbindungen. Während je Anschluss 11 Holzdübel benötigt werden, kann die Verbindung in konventioneller Bauweise durch drei Stahldübel hergestellt werden. Ebenso ist kein Lastverteiler notwendig, da die Lastübertragung nicht über die schmale Auflagefläche der Buchenlasche erfolgt.

Abbildung 60:
Detailpunkt Stütze auf Stütze
Ausführung mit Holzverbindungs-
mitteln, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH



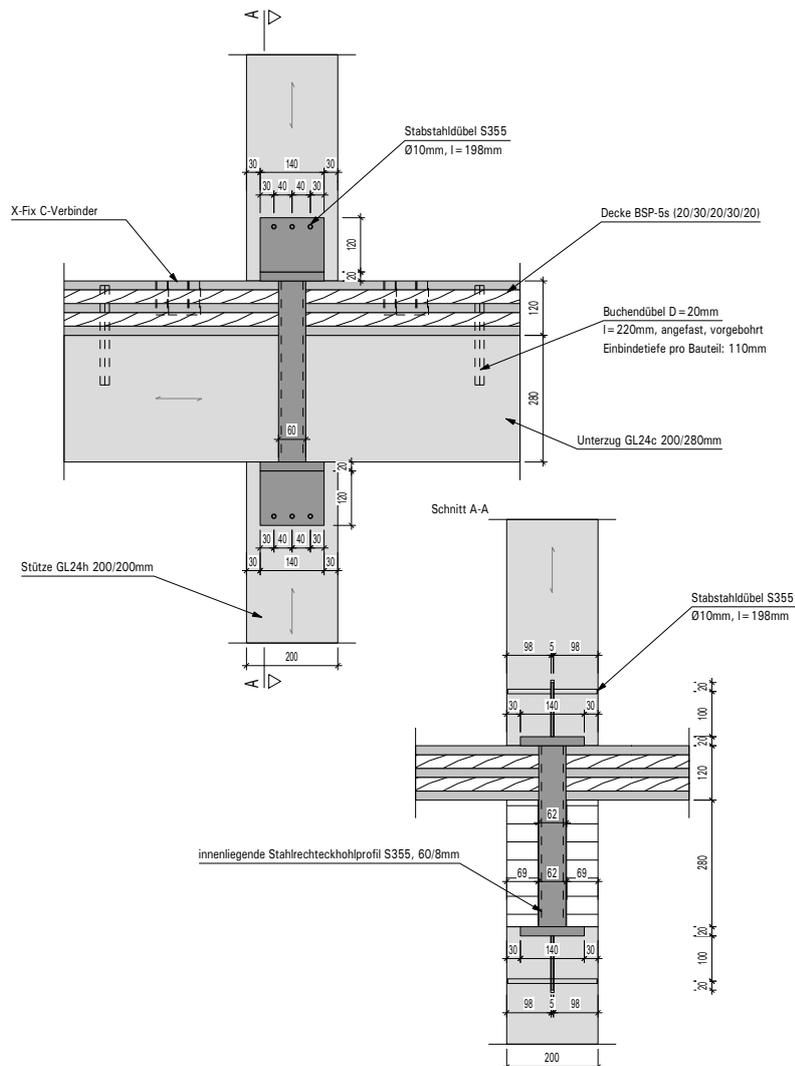


Abbildung 61:
Detailpunkt Stütze auf Stütze
Ausführung mit Stahlverbindungs-
mitteln, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH

In der Ausführung der Holzverbindung gestalten sich Herstellungs- und Montageprozesse demnach wesentlich komplexer. Zwar sind auch für die Stahlverbindungen ähnliche vorbereitende Bearbeitungsschritte im Abbund notwendig, diese können aber als vergleichsweise einfach betrachtet werden und erfordern keinen besonderen Mehraufwand.

Der Montageaufwand ist zumindest ähnlich hoch bzw. gering einzuschätzen. Das Einbringen der Verbindungsmittel nimmt in beiden Fällen wenig Zeit und Arbeitsschritte in Anspruch. Dennoch ist auf ein gesamtes Gebäude bezogen davon auszugehen, dass sich die höhere Anzahl der Holzverbindungsmittel auf die Montagezeit auswirkt.

VERSUCHE ZU HOLZNAGELVERBINDUNGEN

Maßgeblich beeinflusst wird die gesamte Tragstruktur des Bausystems durch die Anschlusspunkte zwischen den einzelnen Bauteilen. Je nach Belastungsrichtung und Belastungsgröße ergeben sich hier unterschiedliche Arten der Detailausbildung. Von besonderem Interesse sind beim Verzicht auf metallische Verbindungsmittel Anschlusspunkte, von denen Aussteifungslasten abzutragen sind. Diese müssen meist Belastungen in zwei entgegengesetzte Richtungen aufnehmen können. Im Erdbebenfall, in dem diese Belastungen in sehr kurzer Zeit und in mehreren Wiederholungen auftreten, spricht man von zyklischen Belastungen. Da Erdbebenlasten um ein vielfaches höher sein können als Aussteifungslasten aus Windbelastung, sollen die Verbindungen aber eine gewisse Duktilität aufweisen. Durch diese Duktilität kann Energie dissipiert werden, d.h. ein gewisser Anteil der Belastung wird durch die Verformung abgebaut. Dieser Energieabbau erlaubt die Bemessung der aussteifenden Anschlüsse auf einem geringeren Lastniveau, was wiederum schlankere Bauteile bzw. Anschlusspunkte zulässt. In dem Zusammenhang erscheint ein neues Produkt - der LignoLoc Holznagel der Firma Beck - von großem Interesse.

Dieser aus verdichtetem Buchenholz gefertigte Nagel kann mit einem für diesen Anwendungsfall speziell entwickelten Druckluftnagler schnell verarbeitet werden. Laut Herstellerangaben wird beim Einschließen der Holznägel das Umgebungsholz durch die hohe Hitze, die durch Reibung entsteht, mit dem Holznagel "verschweißt". Dies verspricht eine hohe Haltekraft.

Auch im Hinblick auf die Rückbaubarkeit zeigen sich vergleichsweise positive Eigenschaften, da in dem Fall keine Materialien zu trennen sind. Weitere Vorteile des Holznagels sind die nicht vorhandene Korrosion, geringe Wärmebrücken und die bessere Ökobilanz als bei metallischen Verbindungsmitteln. Verwendung findet der Holznagel bislang hauptsächlich zum Anbringen von Innen- oder Fassadenbekleidungen, für Naturmöbel und für Fußböden sowie zur Fixierung der einzelnen Brettsperholzlagen bis zur endgültigen Verleimung.

Abbildung 62:
Nagelpistole zum Einschließen
der Holznägel und magazinierte
Holznägel
(Beck-Fastener Group, <https://www.beck-lignoloc.com/>, 04.03.2019)



Grundidee für den weiteren Einsatzzweck

Wie bereits beschrieben sind im modernen Holzbau zwei unterschiedliche Arten des Holzbaus wichtig. Zum einen der Holztafelbau, bei dem einzelne stabförmige Holzquerschnitte in gewissem Abstand parallel nebeneinandergelegt und durch ein- oder zweiseitige Beplankung zu einem kompletten Wandelement verbunden werden. Zum anderen der Massivholzbau (BSP, Bresta), bei dem mehrere Brettlagen, die in unterschiedliche Richtungen ausgerichtet sind (vertikal, horizontal – bei gewissen Herstellern auch diagonal), miteinander verbunden werden. In beiden Fällen entstehen fertige Wandelemente.

Im Unterschied zum Massivholzbau, wo die einzelnen Brettlagen verklebt oder durch Buchendübel verbunden werden, sind beim Holztafelbau zur Verbindung der Beplankungslage an die einzelnen Holzstiele immer metallische Verbindungsmittel (Nägeln, Wellennägeln oder Klammern) notwendig.

Die Hauptidee für die Verwendung von Holznägeln besteht darin, die Beplankung tragender und damit auch aussteifender Holztafelwände in Zukunft mit Holznägeln gewährleisten zu können. Bislang liegt für die Holznägeln keine Bauzulassung vor. Daher dürfen sie momentan lediglich im nichttragenden Bereich zur Anwendung kommen.

Ein weiterer sehr wichtiger Verwendungszweck könnte auch die Verbindung einzelner Brettsperrholz-Decken- oder –Wandelemente untereinander sein. Diese Verbindungen werden zur Ausbildung aussteifender Decken- bzw. Wandscheiben benötigt. Herstellungsbedingt können BSP-Decken oder Wände nur bis max. 3,50 m Breite gefertigt werden. Um über die gesamte Geschossfläche eine aussteifende Scheibe ausbilden zu können, müssen die einzelnen Deckenstreifen daher miteinander verbunden werden. Bislang werden zum schubsteifen Verbund solcher Elemente immer metallische Verbindungsmittel eingesetzt – beispielsweise durch Verschraubung einer Verblattung oder Verschraubung eines Plattenwerkstoffes mit den ausgefrästen BSP-Elementen.

Ziel ist es daher eine geometrisch möglichst einfache und auf der Baustelle gut umzusetzende Verbindung zu entwickeln, die analog bisheriger Fertigungsmöglichkeiten ausgeführt werden kann. Für den Einsatz von Holznägeln eignet sich hier die Verbindung über einen OSB- oder Dreischichtplattenstreifen, der in die Ausfräsung zweier benachbarter BSP-Elemente gelegt wird. Die Holznägeln übernehmen dabei die Verbindung zwischen Plattenwerkstoff und BSP-Element. Wie beim Einsatz als Beplankung einer Holztafelwand werden die einzelnen Holznägeln im Belastungsfall horizontal auf Abscheren belastet.

Da bislang keine bauaufsichtliche Zulassung für die Holznägel vorliegt, ist der Einsatz noch auf den nichttragenden Bereich beschränkt. Um das zu ändern und die Holznägel bald möglichst auch für tragende Zwecke verwenden zu können, wurde im Forschungsvorhaben ein Versuch entwickelt. Mit diesem sollen die aufnehmbaren Kräfte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit abgeschätzt werden können. Des Weiteren soll sich dadurch die Praxistauglichkeit der Holznägel herausstellen.

Abbildung 63:
Verbindung zweier BSP-Deckenelemente mit Einleger und Verschraubung, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH

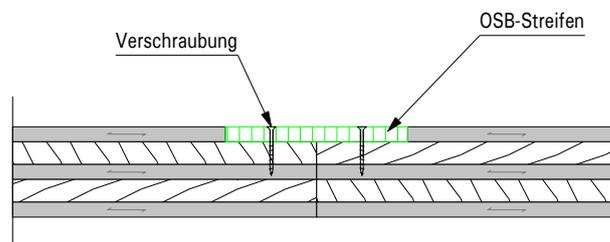


Abbildung 64:
Verbindung zweier BSP-Deckenelemente über Verblattung und Verschraubung (rechts), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH

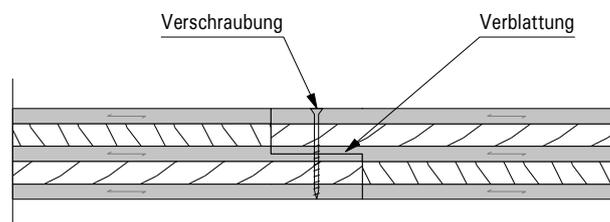
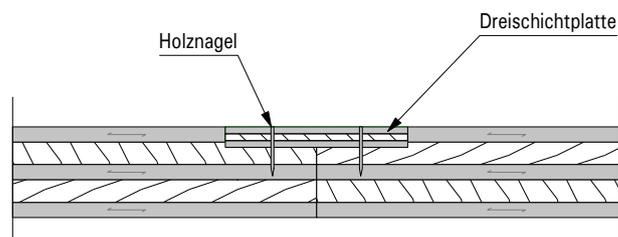


Abbildung 65:
Verbindung zweier BSP-Deckenelemente mit Dreischichtplatte und Holznagel, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH



Herstellung der Versuchskörper

Für die Versuchskörper wurde für die Bauteile B1 bis B3 jeweils Brett-schichtholz der Klasse GL24h verwendet. Dieses besteht aus einzelnen Lagen der Vollholz-Festigkeitsklasse C24, was wiederum der Festigkeitsklasse der Stiele in Holztafelelementen oder der Festigkeit der einzelnen Brettlagen eines BSP-Elementes entspricht. Die Verbindungsplatte besteht aus einem 100mm breiten und 15mm starken OSB3-Plattenstreifen. Diese Streifen sind jeweils durch 10 Holznägel mit den darunterliegenden Bauteilen verbunden. Im Versuchsprogramm wurden zwei unterschiedlich starke Nägel verwendet: 3,7mm und 4,7mm. Die restlichen Bauteile wurden in ihren Abmessungen oder Festigkeitseigenschaften nicht variiert. Beide Nagelstärken wurden sowohl statisch als auch zyklisch – Belastung in Zug- und Druckrichtung im Wechsel – getestet.

Abbildung 67:
realer Versuchskörper in der Prüf-
maschine, Foto Elena Hetagurova,
2019, Pirmin Jung Deutschland
GmbH



Die Holzquerschnitte wurden von einem örtlichen Zimmerer gefertigt und angeliefert. Die Vernagelung der Platten erfolgte eigenhändig. Dabei wurde festgestellt, dass für den Umgang mit der Nagelpistole einiges an Übung und in Bezug auf eine einigermaßen genaue Platzierung der Nägel, ein gewisses Feingefühl erforderlich ist. Trotz vorherigem Anzeichnen konnte dennoch kein einheitliches Nagelbild erstellt werden. Zudem wurde festgestellt, dass die Nägel beim Einschießen durch den hohen Druck teilweise aufgesplittert werden. Auch eine Anpassung des Drucks an der extra für Holznägel konzipierten Nagelpistole verbesserte das Einschussergebnis nur geringfügig. In solchen Fällen des Aufsplitters ist nicht ersichtlich wie tief der Nagel in den Holzquerschnitt eingedrungen ist bzw. ob der Nagel die OSB-Beplankung tatsächlich durchdrungen hat. Ein nachträgliches Einschlagen des Nagels mit einem Hammer war in den meisten Fällen nicht erfolgreich. Die Nägel konnten nicht tiefer eingetrieben werden, da der noch überstehende Nagelteil zerquetscht wurde. Aus diesem Grund wurden für die Versuchsdurchführung die Löcher vorgebohrt. Trotz Vorbohren kam es allerdings vor, dass einige Nägel abbrachen. Es kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass alle Probekörper exakt gleich aufgebaut waren bzw. dass exakt gleiche Nageltiefen vorlagen.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass sich Nägel im Holz teilweise verliefen. Der Verlauf, den ein Nagel beim Einschießen im Holz nimmt, scheint stark vom Faserverlauf des Konstruktionsholzes beeinflusst zu sein.

Abbildung 68:
zersplitterter Holznagel im Versuchskörper

Abbildung 69:
Längenvergleich ganzer Holznagel
und Splitterrest

Abbildung 70:
Einfluss des Faserverlaufs des Konstruktionsholzes auf den Verlauf des Nagels, Fotos Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH



Versuchsdurchführung und Beobachtungen

Mit den beiden Nageldurchmessern wurden jeweils vier statische und vier zyklische Versuche durchgeführt, sodass insgesamt 16 Probekörper untersucht wurden.

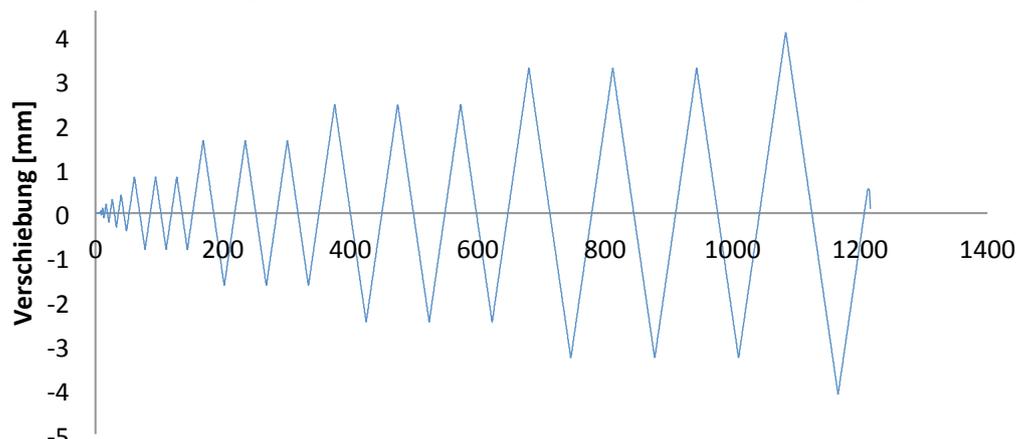
Die statischen Versuche wurden kraftgesteuert in Anlehnung an die DIN EN 26891 1991-07 gefahren. Der genaue Versuchsablauf basiert dabei auf der für den Versuchskörper errechneten Höchstlast. Diese lag bei den Holznägeln mit Durchmesser 37 mm bei ca. 20 kN, bei den Nägeln mit 47 mm Durchmesser bei etwa 24 kN. Innerhalb der ersten Phase wurde die Kraft kontinuierlich bis zum Erreichen von 40% der erwarteten Höchstlast gesteigert. Anschließend wurde die Last 30 Sekunden konstant gehalten und schließlich auf 10% der Maximallast reduziert. Im Anschluss wurde die Last erneut konstant im gleichen Rhythmus gesteigert bis zum Erreichen von 70% der Höchstlast. Darüber wurde die Geschwindigkeit so angepasst, dass die Bruchlast innerhalb von 3 bis 5 Minuten nach Versuchsstart erreicht wurde.

Die Verschiebung wurde zum einen über die Verschiebung der Zylinder der Prüfmaschine und zum anderen durch externe Wegaufnehmer, die jeweils an einem der vier OSB-Plattenstreifen befestigt wurden, aufgenommen.

Bei den statischen Versuchen war meist gegen Ende der Versuchsdurchführung starkes Knacksen zu vernehmen, was darauf schließen lässt, dass es in der Verbindung zu einer Schädigung kam.

Die Durchführung der zyklischen Versuche erfolgte in Anlehnung an die ISO 16670. Die Steuerung der Versuche erfolgte hierbei über die Verschiebung. Es wurden nacheinander mehrere Zyklen durchfahren, wobei sich die Verschiebungswerte der einzelnen Zyklen an der Maximalverschiebung der statischen Vergleichsversuche orientierten. Nach Erreichen der eigentlich zu erwartenden maximalen Verschiebung wurden die Probekörper im darauffolgenden Zyklus über die Verformung hinaus verformt. Im Folgenden ist der zyklische Belastungsverlauf der Reihe Z04-47 exemplarisch dargestellt.

Abbildung 71:
Darstellung des zyklischen Belastungsverlaufs der Reihe Z04-47, Diagramm Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH



Die zyklischen Versuche zeigten sich vergleichsweise geräuscharm. Es gab vereinzelt Knacksen, wobei dieses nicht unbedingt auf Schädigungen zurückzuführen ist. Vielmehr mussten sich die Proben im Versuchsaufbau durch die Änderung der Belastungsrichtung wieder „ausrichten“. Teilweise konnte beim Ausbauen der Versuche aus der Prüfmaschine ein Ablösen der OSB-Platte festgestellt werden.



Abbildung 72:
Ablösen der OSB-Platte von den Holzquerschnitten, Foto Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH

Beschreibung der Versagensart

Als Versagensart stellt sich bei allen Versuchen hauptsächlich sprödes Versagen der Holznägel auf Biegung ohne Plastifizierung ein. Dieser Biegebruch tritt bei allen Nägeln im Bereich der Fuge zwischen OSB-Platte und BSH-Querschnitt auf. Die Nägel werden teilweise aus der OSB-Platte herausgezogen, teils sind die Holznelenden noch intakt, teils fehlen die Endstücke, da diese in der OSB-Platte feststecken. Teilweise lässt sich leichtes Lochlaibungsversagen an den Bauteilen B1 bis B3 feststellen.

Abbildung 73:
Versagen der Holznägel auf Biegung (links), genauere Betrachtung (rechts), Foto Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH



Ergebnisse

Die maximal aufnehmbare Last lag bei Nägeln mit Durchmesser 3,7mm bei durchschnittlich 22,73 kN. Dies entspricht bei 40 Nägeln einer Höchstlast von 568 N pro Nagel. Laut Prüfbericht des Herstellers vom 28.02.2017 sind Nägel diesen Durchmessern in der Lage eine charakteristische Scherkraft von 361,8 N aufzunehmen.

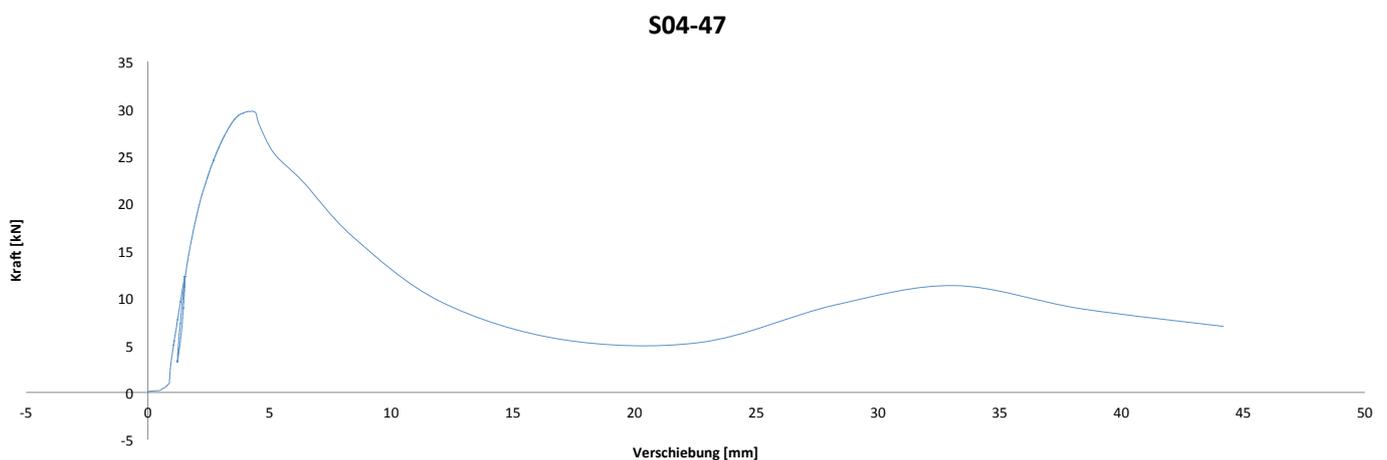
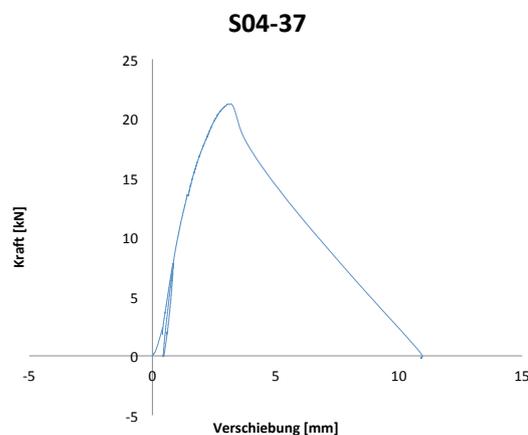
Bei den Nägeln mit Durchmessern 4,7mm, lagen die Werte im Schnitt bei 25,39 kN. Pro Nagel entspricht das einer Last von 635 N.

Die Verschiebungen lagen bei Erreichen der Höchstlast zwischen 2,3mm und 3,25mm bei den 4,7mm Nägeln. Bei den 3,7mm Nägeln lagen die Werte zwischen 2,6mm und 3,3mm.

Im der Abbildung 84 sind exemplarisch die Kurvenverläufe zweier statischer Versuche und die Hysterese-Kurve eines zyklischen Versuches dargestellt.

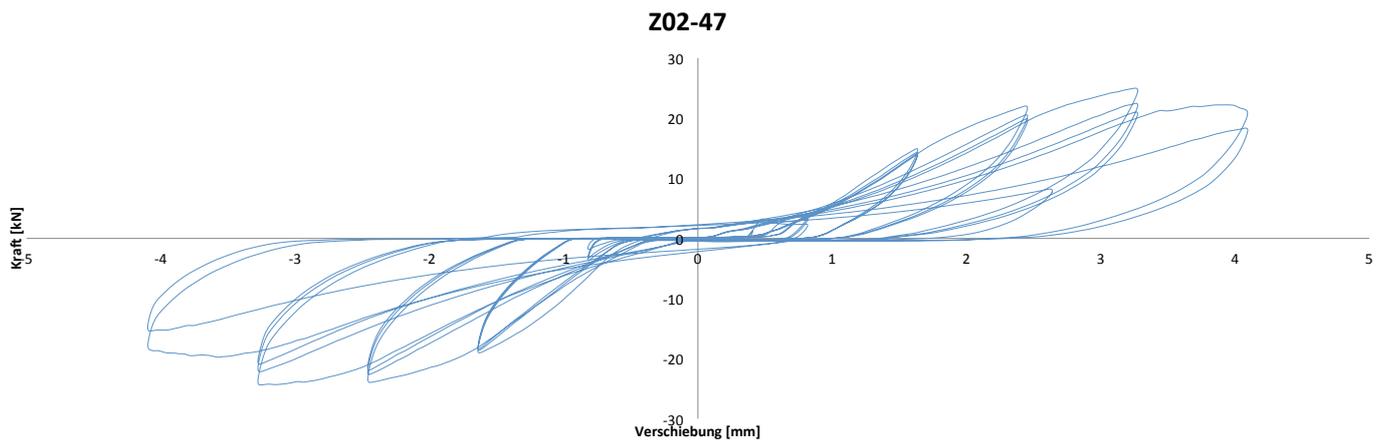
Aus dem Verlauf der statischen Versuche lässt sich deutlich erkennen, dass die Last nach Erreichen der Höchstlast stark abfällt, die Verschiebung aber deutlich zunimmt. Dies spricht für ein ausgeprägtes sprödes Verhalten.

Abbildung 74:
Kraft-Verschiebungsverlauf der statischen Versuche S04-37 (oben) und S04-47 (unten), Diagramme Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH



Die punktsymmetrische Hysterese-Kurve lässt erkennen, dass der Probekörper Z02-47 seine Höchstlast bei etwa 25 kN erreicht hat. Die größte Auslenkung wurde jedoch erst in einem späteren Zyklus erreicht. Das Auffächern der Kurvenverläufe zeigt, dass die Versuchskörper mit größer werdender Verformung schließlich an ihre Belastungsgrenze stoßen. Bei weiterer Erhöhung der Verformung würde keine Kraft mehr gemessen werden können, da die Verbindung versagt und keinen Widerstand mehr aufbauen kann.

Abbildung 75:
Kraft-Verschiebungsverlauf des
zyklischen Versuchs Z02-47 (Kraft-
Weg Zylinder) , Diagramm Elena
Hetagurova, 2019, Pirmin Jung
Deutschland GmbH



Schlüsse und Ausblick

Insgesamt betrachtet zeigen die Versuche an den Holznagelverbindungen, dass die Nägel die Größenordnung der aufnehmbaren Scherkräfte laut erstem Prüfbericht des Herstellers erreichen konnten. Die Nägel sind nur dann für zyklische Belastung verwendbar, wenn man sich in Bereichen weit unterhalb der Höchstlast bzw. der maximalen Verschiebung befindet. Durch das sich einstellende Versagen - Sprödbbruch ohne Plastifizierung - ist ein Belasten im Realfall bis an die Belastungsgrenze nicht zu empfehlen.

In der praktischen Umsetzung wurde deutlich, dass es äußerst schwierig ist, ein einheitliches Nagelbild zu gewährleisten. Auch kann nicht immer sicher davon ausgegangen werden, dass die Nägel die erforderliche Einschusstiefe erreicht haben. Ein nachträgliches Einhämmern war wenig erfolgreich. Die Alternative, alle Löcher vorzubohren, um die Nägel anschließend sauber von Hand einhämmern zu können, ist aus wirtschaftlicher Sicht auf Grund des hohen Zeitaufwandes eher kritisch zu betrachten.

Für das Primärtragwerk lässt sich damit sagen, dass der Einsatz von Holznägeln bislang nicht zielführend ist. Für den Innenausbau, der ggfs. in Eigenregie durch die NutzerInnen erfolgen kann, ist der Einsatz der Holznägel aber sicher eine Option. Gerade was die Rückbaubarkeit anbelangt ergeben sich hierdurch einige Vorteile. Bei Verwendung von Holznägeln sind durch die Einstofflichkeit keine Baustoffe zu trennen. Beim Einsatz von Sägen oder sonstigem Werkzeug ist nicht auf metallische Verbindungsmittel zu achten, welche den Verschleiß der Werkzeuge enorm erhöhen.

Um allgemein gültige Aussagen zum Verhalten der Holznägel treffen zu können, müssten noch weitaus mehr Versuche durchgeführt werden. Außerdem sind Versuche nötig, die das Langzeitverhalten der Holznägel unter dauerhafter Belastung zeigen.

Kritisch ist bei den Holznägeln auch zu beurteilen, dass die vom Hersteller gelieferte Nagelpistole in den meisten Fällen die Nägel nicht vollständig eintreibt, so dass oft 5mm des Nagels nicht in der Oberfläche verschwinden. Begründet ist dies vermutlich damit, dass der maximale Druck, den die Nägel ohne zu Splintern ertragen, zu gering ist, um den Nagel an allen Stellen des Holzes ganz einzutreiben. Bei Oberflächen, die sichtbar sind, oder mit weiteren Schichten, wie Folien oder Platten überbaut werden, müssen diese Nägel entweder manuell weiter eingetrieben werden, was häufig nur zum Auffasern oder Aufsplintern der Nägel führt oder abgehobelt. Beides ist zeitaufwendig und verhindert einen zügigen Baufortschritt.

GEBÄUDEKUNDLICHE ANALYSE / FLÄCHENEFFIZIENZ DES BAUSYSTEMS

Im Folgenden Abschnitt wird die Eignung verschiedenen Grundriss-Raster für den Wohnungsbau untersucht. Da es sich bei dem Bausystem um ein offenes System handelt, was in seiner Maßlichkeit nicht modularisiert ist, können grundsätzlich alle Rastermaße in bestimmten statisch sinnvollen Grenzen geplant werden.

Methodik der gebäudekundlichen Analyse

Untersucht wurde nun, wie sich die Auswahl eines bestimmten Rastermaßes auf die Effizienz der Grundrisse insgesamt und die Ausnutzung der geschaffenen Wohnfläche auswirkt. Dabei wurde zunächst die Passung zwischen den einzelnen Wohnfunktionen (Küche, Essen, Schlafen, Bad...) und dem Raster untersucht. Aus einer systematischen Betrachtung aller notwendigen Funktionen ergibt sich eine Gesamtbewertung für eine Wohnung in dem jeweiligen Raster.

Für die Rasteruntersuchung wurde das Modul entsprechend der notwendigen Funktionen des Wohnens und zunächst in Hinblick auf die Passung mit den Möblierungsschablonen des WohnwertBarometers²⁴ (Möbelmaße und Bewegungsflächen) untersucht. Später wurden die Vorgaben des WohnwertBarometers, zur Vereinfachung und besseren Vergleichbarkeit der Raster untereinander, durch eine komprimiertere Möblierungsschablone ersetzt. Daraus ergibt sich für jede Wohnungsgröße jeweils ein bestimmter Flächenbedarf. Dieser variiert einzig in kleinen Rastern, wenn zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammengefasst werden.

Als Grundlage der Beschreibung der einzelnen Wohnfunktionen in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße wurde eine Möblierungsschablone des WohnwertBarometers²⁵ genutzt, das als Erfassungs- und Bewertungssystem nachhaltiger Wohnqualität entwickelt wurde.

²⁴ Bewertungshandbuch „WohnwertBarometer: Erfassungs- und Bewertungssystem nachhaltiger Wohnqualität“, Technische Universität Darmstadt, FB Architektur, Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen [ee], Prof. M. Hegger, In Kooperation mit Pirelli RE, Technische Universität Darmstadt, FB Informatik, Fachgebiet Datenbanken und Verteilte Systeme [dvs] 4wd media. www.wohnwert-barometer.de, August 2009.

²⁵ Ebd.

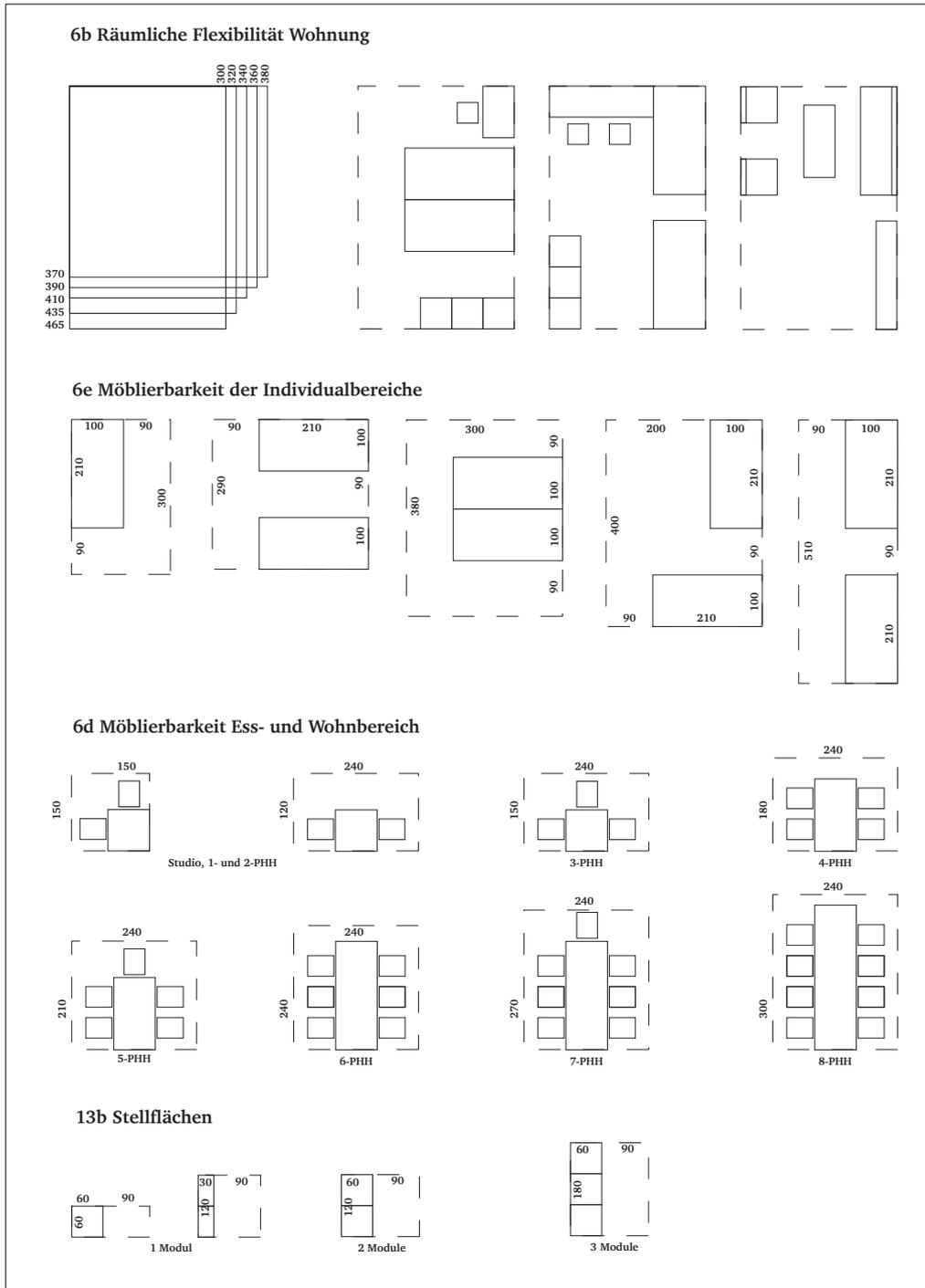


Abbildung 76:
Möblierungsschablone Wohnfunk-
tionen des WohnwertBarometers

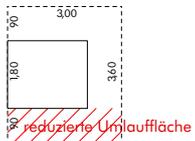
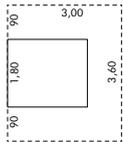
Da die Anforderungen an die einzelnen Wohnfunktionen je nach Wohnungsgröße und Anzahl der BewohnerInnen variieren, wurden die jeweiligen Wohnfunktionen mit spezifischen Größenanforderungen abgebildet, die in Abhängigkeit von der Anzahl der BewohnerInnen (Haushaltsgröße oder Personenhaushalts) unterschiedlich definiert sind. So wurde davon ausgegangen, dass auch die benötigten Flächen für Küchen, Bäder, Essplätze etc. mit zunehmender Anzahl der Personen im Haushalt (PHH) steigen.

Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass diese funktionalistische, fordistische Abbildung des Wohnens über einzelne Wohnfunktionen nicht als Entwurfsmethodik verstanden werden sollte, sondern als Recheninstrument, um die Effizienz (oder Suffizienz) der Raster, der Grundrisse und der Gebäudetypologie bewerten zu können. Natürlich gibt es eine beliebig große Anzahl anderer Möglichkeiten, Wohnungen zu entwerfen und zu organisieren, die in dieser Methode nicht erfasst werden. Dennoch geht die Forschung davon aus, dass sich aus der systematischen und quantitativen Analyse der Permutationen des Bausystems valide Aussagen über die Eignung bestimmter Gebäudetypologien und Raster finden lassen.

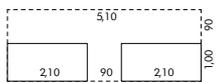
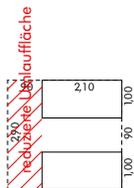
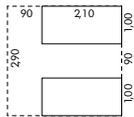
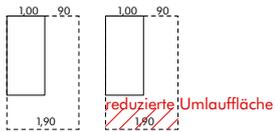
Ebenfalls anzumerken ist, dass neben der additiven Abbildung einzelner Wohnfunktionen, die der Berechnungsmethode zu Grunde liegt, anderer Entwurfsmethoden denkbar sind, in dem die einzelnen Funktionen stärker überlagert und verschränkt werden, was erhebliche Effizienzgewinne erbringt. Vor allem die Erschließungsflächen der einzelnen Funktionen und Flur (oder offene) Erschließungsflächen werden in der Praxis oft mit anderen Erschließungsflächen und Funktionen überlagert. Dies ist in der Auswertung nicht darstellbar.

Bei der Rasteruntersuchung wurden sowohl gerichtete als auch ungerichtete Systeme unterscheiden. Ungerichtete Systeme haben gleichwertige Lastabtragungen zu allen Seiten, womit eine Richtung, in die die Kräfte fließen, nicht eindeutig bestimmt ist. Dies ist bei gleichschenkligen Systemen wie z.B. Quadrat en der Fall. Im Gegensatz dazu haben gerichtete Systeme wie Rechtecke, eine eindeutige Richtung der Lastabtragung.

Schlafzimmer



Schlafzimmer Eltern

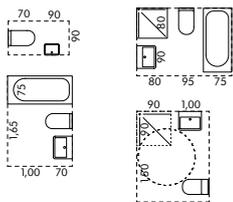


Kinderzimmer

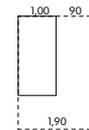


Schrank

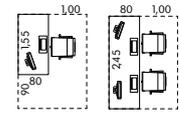
Bad



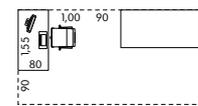
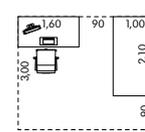
Gästezimmer/
Arbeitszimmer



Gästezimmer

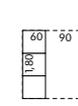


Arbeitszimmer

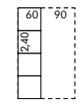


Gästezimmer/
Arbeitszimmer

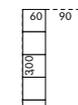
Küche



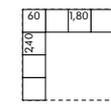
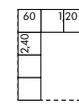
1 Pers.



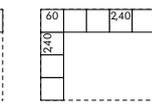
2 Pers.



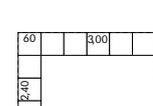
3 Pers.



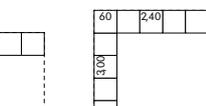
4 Pers.



5 Pers.



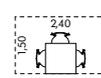
6/7 Pers.



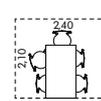
Essen



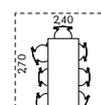
1/2 Pers.



3 Pers.

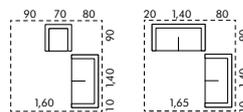


5 Pers.

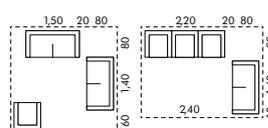


7 Pers.

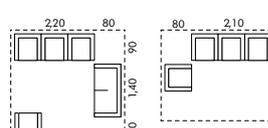
Wohnen



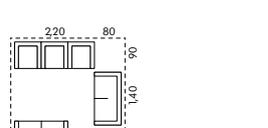
1-3 Pers.



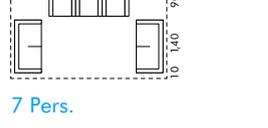
4 Pers.



5 Pers.



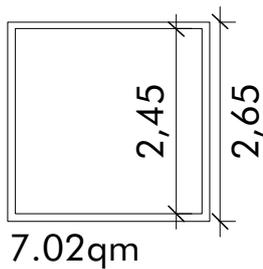
6 Pers.



7 Pers.

Abbildung 77: Möblierungsschablone zur Untersuchung der Nutzung der Rasterfelder je Funktion und Haushaltsgröße (DGJ Architektur, 2019).

Abbildung 78:
Auszug Detail des Grundrisskataloges für die Rastergröße 2,65m, DGJ Architektur, 2018

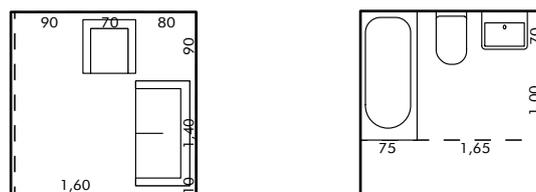


Jeder betrachtete Fall hat ein Bandraster in X-Richtung (definiert als Gebäudelänge) und Y-Richtung (definiert als Gebäudetiefe). Die Darstellung oben zeigt ein ungerichtetes System mit der Abmessung 2,65m in beide Achsrichtungen. Es kann auch als äußeres Maß bezeichnet werden. Die Fläche dieses daraus entstehenden Moduls entspricht 7,02m², was der Abbildung 89 zu entnehmen ist. Das Innere Maß, welches im Beispiel 2,45m beträgt ist um den Stützenquerschnitt oder Wandstärke (0,2m) kleiner. Diese Annahme entspricht einem Näherungswert der Wandstärke, welche in der Regel das Modul umschließt und auf der Achse steht. Dieses verkleinerte Maß ist das näherungsweise real nutzbare Maß innerhalb des Moduls. Das im Vergleich zum Rastermaß kleinere Maß wird in der gebäudekundlichen Analyse genutzt um die Möblierbarkeit zu prüfen und die Raster auf ihre Benutzbarkeit zu analysieren.

Dazu wurde z.B. für das Rastermaß 2,65m eines Einpersonenhaushalts (1 PHH) ein Wohnzimmer mit einem Sofa und Sessel ausgestattet. Dargestellt ist zusätzlich zu dem Rasterfeld (dicke schwarze Linie) und den Möbeln (dünne schwarze Linie) eine gestrichelte Linie, die angibt, wie viel Fläche ausreichend gewesen wäre um die Funktion zu erfüllen.

Als Beispiel hat das Sofa eine Breite von 1,40m und eine Tiefe von 0,8m. Zusätzlich ist eine Bewegungsfläche inklusive Sessel von 1,60m x 2,40m von Nöten, sodass sich ein Gesamtplatzbedarf von 2,40m x 2,40m ergibt. Die Restfläche ist mit 0,05m und 0,05m sehr klein. Somit hat dieses Modul wiederum eine extrem gute Flächeneffizienz. Vergleichsweise dazu hat ein Badezimmer eine Breite von 0,75m für die Badewanne sowie 1,65m für Toilette und Waschtisch. Die Tiefe beträgt 1,70m. Damit ergibt sich eine Restfläche von 0,75m in der Tiefe des Moduls. Die Restfläche in der Breite ist mit 0,05m marginal. Somit bleibt eine erhebliche Fläche, die nicht direkt zur Funktionserfüllung benötigt wird. In dem Fall des Moduls für das Badezimmer kann dies auch als Schachtfläche genutzt werden. Damit wäre die Effizienz deutlich verbessert.

Abbildung 79:
Auszug Detail Möblieungsbeispiel für Wohnzimmer und Badezimmer des Grundrisskataloges für die Rastergröße 2,65m zur Untersuchung der Nutzung der Rasterfelder je Funktion und Haushaltsgröße (DGJ Architektur, 2018).



Bei anderen Wohnfunktionen wurde auf gleiche Weise verfahren. Dabei zeigt sich unter anderem auch, dass nicht immer alle Funktionen in ein Rastermodul passen. Als Beispiel sieht man bei dem Schlafzimmer des 2,65m Breiten Rasters, dass das Bett mit 2,10m und einer Bewegungsfläche von 0,90m mindestens 3,00m benötigt. Dieses passt nicht in ein Raster von 2,45m, weshalb ein zweites Rastermodul benötigt wird. Der Schrank kann nun recht flexibel im Raum angeordnet werden. Die Flächeneffizienz ist aufgrund der zwei benötigten Rastermodule jedoch ungünstig.

Bei kleinen Rastern, in denen Schlafzimmer zwei Rastermodule benötigen, werden zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammengefasst.

Bei einem Doppelbett ist die Breite mit Bewegungsfläche zusätzlich größer. Die über das Raster hinausragende Bewegungsfläche ist mit roter Schraffur dargestellt. Die Funktion des Schlafens ist daher praktisch nicht erfüllt. Mögliche Konsequenzen sind entweder, dass diese Rastergröße nicht funktioniert, mit einem speziell angepassten Sondermöbel reagiert oder dass von den Vorgaben abgewichen werden muss.

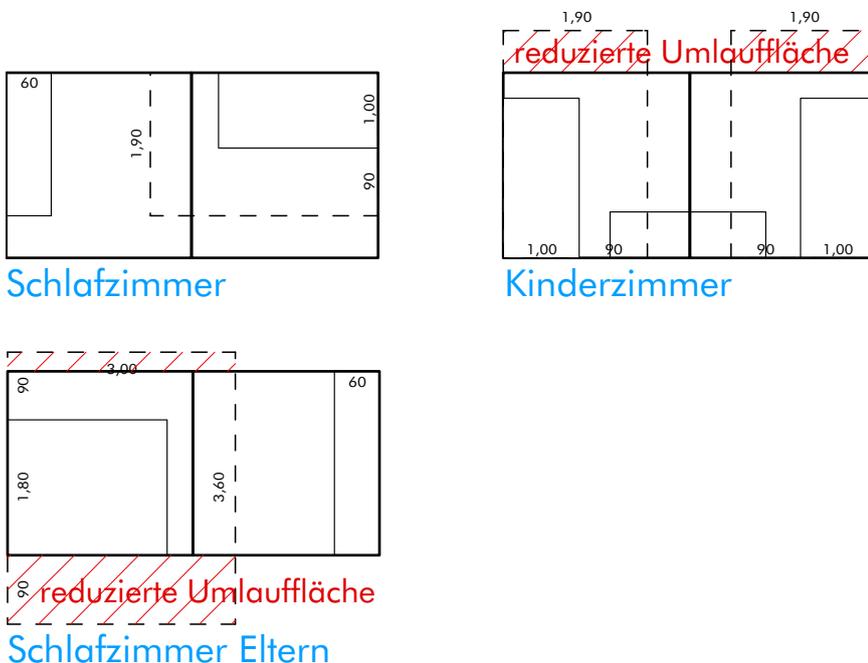


Abbildung 80:
Auszug Detail Möblierungsbeispiel
Schlafzimmer des Grundrisskataloges
für die Rastergröße 2,65m
zur Untersuchung der Nutzung der
Rasterfelder je Funktion und Haushaltsgröße
(DGJ Architektur, 2018).

Die Nutzung eines Rastermoduls wird zunächst Monofunktional betrachtet, kann jedoch bei Überschneidungen der Nutzungsziele und räumlicher Anordnung auch in einem Rastermodul zusammengelegt werden.

Zur internen Erschließung der Wohneinheiten, wird je nach Wohnungs- und Rastergröße ein weiteres Rastermodul als Flurfläche hinzugefügt. Man geht davon aus, dass Wohnungen mit mehreren Zimmern ab einer gewissen Anzahl einen Flur benötigen um diese erschließen zu können. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass bei großen Rastern die Erschließungsfläche innerhalb der schon mit anderen Nutzungen belegten Rastern untergebracht werden kann.

Die nachfolgende gebäudekundliche Analyse erfolgt in Hinblick auf die Funktionalität der Räume, die Flexibilität der Rastermodule, die Größe der Wohnungen auf Grundlagen der Mindestzahl der Rastermodule zur Erfüllung der notwendigen Wohnfunktionen, die Wohnfläche je Person, die Möblierbarkeit sowie die Gebäudetypologie unter Berücksichtigung der Erschließbarkeit und Anordnung der Rastermodule im Gebäude.

Rasterauswertung Wohnfläche pro Person

Es wurden insgesamt 42 Raster in Hinblick auf ihrer Effizienz untersucht (die vollständige Analyse aller 42 Raster findet sich im > A Anhang: Gebäudekundliche Studien // Auswertung Typologien). Die Untersuchung der einzelnen Rastermaße zeigt Vor- und Nachteile der einzelnen Modulgröße in Hinblick auf die Flächeneffizienz der Wohnung und die Passung der einzelnen Wohnfunktionen auf.

In der Tabelle werden die einzelnen Rastergeometrien/-größen in Hinblick auf den Flächenverbrauch (Wohnfläche pro Person) für unterschiedliche Wohnungsgrößen dargestellt. Die obere Reihe der Tabelle zeigt die Anzahl der Personen pro Haushalt, die auch in der gebäudekundlichen Analyse genutzt wurde. Der Farbton und die Farbtintensität der Felder geben den Grad der benötigten Fläche pro Person an, welche ein direkter Parameter der Effizienz der Wohnung ist. Dabei steht rot für einen sehr hohen Flächenbedarf, blau für eine geringe notwendige Fläche.

Abbildung 81: Tabelle von akkumulierten Wohnungsgrößen je Person mit Durchschnittswerten (DGJ Architektur, 2019).

Raster	1 PHH	2 PHH	3 PHH	4 PHH	5 PHH	6 PHH	7 PHH
2,65 m x 2,65 m	36 qm/pP	18 qm/pP	22 qm/pP	18 qm/pP	19 qm/pP	-	-
2,85 m x 2,85 m	42 qm/pP	21 qm/pP	21 qm/pP	21 qm/pP	22 qm/pP	22 qm/pP	27 qm/pP
3,00 m x 3,00 m	39 qm/pP	20 qm/pP	24 qm/pP	24 qm/pP	25 qm/pP	25 qm/pP	27 qm/pP
3,50 m x 3,50 m	44 qm/pP	27 qm/pP	25 qm/pP	30 qm/pP	26 qm/pP	33 qm/pP	35 qm/pP
4,00 m x 4,00 m	58 qm/pP	29 qm/pP	24 qm/pP	25 qm/pP	20 qm/pP	23 qm/pP	26 qm/pP
4,50 m x 4,50 m	55 qm/pP	28 qm/pP	25 qm/pP	28 qm/pP	26 qm/pP	30 qm/pP	37 qm/pP
2,65 m x 2,85 m	39 qm/pP	19 qm/pP	22 qm/pP	19 qm/pP	21 qm/pP	21 qm/pP	23 qm/pP
2,65 m x 3,00 m	34 qm/pP	17 qm/pP	21 qm/pP	21 qm/pP	22 qm/pP	22 qm/pP	25 qm/pP
2,65 m x 3,50 m	40 qm/pP	20 qm/pP	22 qm/pP	22 qm/pP	24 qm/pP	26 qm/pP	29 qm/pP
2,65 m x 4,00 m	37 qm/pP	23 qm/pP	22 qm/pP	23 qm/pP	20 qm/pP	26 qm/pP	30 qm/pP
2,65 m x 4,50 m	42 qm/pP	26 qm/pP	25 qm/pP	21 qm/pP	21 qm/pP	25 qm/pP	29 qm/pP
2,65 m x 5,00 m	47 qm/pP	29 qm/pP	27 qm/pP	24 qm/pP	24 qm/pP	26 qm/pP	28 qm/pP
2,65 m x 5,30 m	37 qm/pP	25 qm/pP	29 qm/pP	25 qm/pP	22 qm/pP	27 qm/pP	30 qm/pP
2,85 m x 3,00 m	37 qm/pP	19 qm/pP	22 qm/pP	22 qm/pP	22 qm/pP	24 qm/pP	27 qm/pP
2,85 m x 3,50 m	35 qm/pP	22 qm/pP	20 qm/pP	24 qm/pP	21 qm/pP	28 qm/pP	30 qm/pP
2,85 m x 4,00 m	40 qm/pP	25 qm/pP	23 qm/pP	25 qm/pP	22 qm/pP	28 qm/pP	32 qm/pP
2,85 m x 4,50 m	34 qm/pP	23 qm/pP	23 qm/pP	23 qm/pP	23 qm/pP	27 qm/pP	32 qm/pP
2,85 m x 5,00 m	38 qm/pP	26 qm/pP	21 qm/pP	25 qm/pP	23 qm/pP	23 qm/pP	31 qm/pP
2,85 m x 5,30 m	41 qm/pP	27 qm/pP	23 qm/pP	27 qm/pP	24 qm/pP	30 qm/pP	32 qm/pP
2,85 m x 5,70 m	44 qm/pP	29 qm/pP	24 qm/pP	29 qm/pP	26 qm/pP	32 qm/pP	35 qm/pP
3,00 m x 3,50 m	37 qm/pP	23 qm/pP	22 qm/pP	25 qm/pP	22 qm/pP	30 qm/pP	31 qm/pP
3,00 m x 4,00 m	43 qm/pP	27 qm/pP	25 qm/pP	27 qm/pP	23 qm/pP	30 qm/pP	34 qm/pP
3,00 m x 4,50 m	36 qm/pP	24 qm/pP	24 qm/pP	24 qm/pP	24 qm/pP	29 qm/pP	36 qm/pP
3,00 m x 5,00 m	40 qm/pP	27 qm/pP	22 qm/pP	27 qm/pP	27 qm/pP	30 qm/pP	32 qm/pP
3,00 m x 5,30 m	43 qm/pP	29 qm/pP	24 qm/pP	29 qm/pP	26 qm/pP	31 qm/pP	34 qm/pP
3,00 m x 5,70 m	46 qm/pP	31 qm/pP	26 qm/pP	31 qm/pP	28 qm/pP	34 qm/pP	37 qm/pP
3,00 m x 6,00 m	49 qm/pP	32 qm/pP	27 qm/pP	28 qm/pP	29 qm/pP	36 qm/pP	39 qm/pP
3,50 m x 4,00 m	50 qm/pP	31 qm/pP	29 qm/pP	31 qm/pP	28 qm/pP	30 qm/pP	33 qm/pP
3,50 m x 4,50 m	57 qm/pP	28 qm/pP	28 qm/pP	25 qm/pP	26 qm/pP	28 qm/pP	37 qm/pP
3,50 m x 5,00 m	48 qm/pP	24 qm/pP	21 qm/pP	28 qm/pP	22 qm/pP	32 qm/pP	38 qm/pP
3,50 m x 5,30 m	50 qm/pP	25 qm/pP	22 qm/pP	25 qm/pP	20 qm/pP	24 qm/pP	30 qm/pP
3,50 m x 5,70 m	54 qm/pP	27 qm/pP	24 qm/pP	27 qm/pP	22 qm/pP	25 qm/pP	29 qm/pP
3,50 m x 6,00 m	57 qm/pP	29 qm/pP	26 qm/pP	24 qm/pP	23 qm/pP	27 qm/pP	31 qm/pP
4,00 m x 4,50 m	49 qm/pP	25 qm/pP	22 qm/pP	25 qm/pP	23 qm/pP	26 qm/pP	33 qm/pP
4,00 m x 5,00 m	55 qm/pP	27 qm/pP	24 qm/pP	23 qm/pP	18 qm/pP	26 qm/pP	29 qm/pP
4,00 m x 5,30 m	58 qm/pP	29 qm/pP	26 qm/pP	24 qm/pP	19 qm/pP	27 qm/pP	27 qm/pP
4,00 m x 5,70 m	63 qm/pP	31 qm/pP	28 qm/pP	26 qm/pP	21 qm/pP	25 qm/pP	29 qm/pP
4,00 m x 6,00 m	66 qm/pP	33 qm/pP	29 qm/pP	22 qm/pP	22 qm/pP	26 qm/pP	31 qm/pP
4,50 m x 5,00 m	62 qm/pP	31 qm/pP	28 qm/pP	26 qm/pP	21 qm/pP	25 qm/pP	33 qm/pP
4,50 m x 5,30 m	44 qm/pP	22 qm/pP	29 qm/pP	27 qm/pP	22 qm/pP	26 qm/pP	31 qm/pP
4,50 m x 5,70 m	47 qm/pP	24 qm/pP	32 qm/pP	30 qm/pP	24 qm/pP	28 qm/pP	33 qm/pP
4,50 m x 6,00 m	50 qm/pP	25 qm/pP	25 qm/pP	25 qm/pP	25 qm/pP	30 qm/pP	30 qm/pP
Mittelwert	29 qm/pP		Median	27 qm/pP		Modalwert	24 qm/pP

ungerichtet

gerichtet

Die kleinsten Wohnungen (1 PHH) haben unabhängig vom Bausystem einen höheren Flächenbedarf, weil für eine Person alle Wohnfunktionen abgebildet werden müssen, die sich bei größeren Einheiten mehrere Personen teilen. Dieses Phänomen zeigt sich auch in der Auswertung, indem die 1 PHH grundsätzlich den höchsten Flächenbedarf haben.

Es ließ sich feststellen, dass bei den ungerichteten Rastern das 3m-Raster und bei den gerichteten Rastern das 2,65m x 3,5m Raster ein Schwellenwert in Hinblick auf die untersuchten Parameter darstellt. Sind die Rastermodule kleiner, so benötigen selbst die Einzelzimmer zwei Rastermodule, wodurch es sich empfiehlt, für eine höhere Effizienz, zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammenzulegen. Elternschlafzimmer müssen mit reduzierten Bewegungsflächen auskommen. Sind die Rastermodule größer, ergeben sich je größer die Raster werden vermehrt die Möglichkeit, Funktionen wie zum Beispiel Küche und Essbereich zusammenzulegen. Grundsätzlich versprechen kleinere Rastermaße eine höhere Flexibilität, wenn man davon ausgeht, dass die Trennwände nur in den Achsen des Systems gesetzt werden. Geht man andererseits davon aus, dass innerhalb der größeren Raster weitere Räume abgetrennt werden können, würde dies die Auswertung verändern. Dies soll aber von der vorgestellten Analyseverfahren nicht erfasst werden.

Einen weiteren Schwellenwert bilden das 4m-Raster und das Rastermodul mit den Maßen 3,5m x 5,0m. Sind die Rastermodule größer, benötigt jede Funktion maximal nur ein Raster und Funktionen können vermehrt zusammengefasst werden. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, dass innerhalb eines Raster zwei Wohnfunktionen oder Räume Platz finden können, was zu einer Verbesserung der Ausnutzung führt. Dieser Effekt stellt sich nicht ein, wenn ein großes Raster gerade zu klein ist um zwei Wohnfunktionen oder Räume aufzunehmen, dann kommt es zu großen ungenutzten Flächen und der Grundriss wird ineffizient. Befindet sich die Größe des Rasters unterhalb dieser Grenze, werden für einige Räume zwei Rastermodule nötig. Ungünstig sind auch die Raster, die regelmäßig dazu führen, dass jeweils zwei Module für eine Wohnfunktionen notwendig sind, was zu einer ineffizienten Flächenausnutzungen führt. So ergibt sich ein Einbruch der Effizienz bei den mittelgroßen Rastern.

Bei der Organisation von Wohnungen mit kleineren Rastern besteht jedoch die Problematik, dass bei einer effizienten Gebäudekonzeption bestimmte Mindestmaße für die Tiefe des Gebäude nicht unterschritten werden sollen, weil sonst der Anteil der Verkehrsfläche zu hoch wird, das A/V-Verhältnis ungünstig wird und meist das Grundstück schlecht ausgenutzt ist. So sind im Wohnungsbau Gebäudetiefen von mindestens 10m üblich. Gebäudetiefen von 12m bis 15m werden je nach der Erschließung des Gebäudes auch eingesetzt. Größere Gebäudetiefen sind im Wohnungsbau meist nur

mit zusätzlicher innenliegender Belichtung und Belüftung möglich. Je nach Gebäudetiefe und Rastermaßen können also mehrere Raster in der Gebäudetiefe hintereinander liegen, wie es bei den Fallstudien durchgehend der Fall ist (vgl. dazu Abschnitt 6. Exploration // Fallstudien und Beta-Testing Planungstool). In diesen Fällen müssen die außenliegenden Räume entweder mit den dahinterliegenden zusammengefasst werden, um die Belichtung und Belüftung der Wohnräume zu erreichen, oder die innenliegenden Räume bleiben unbelichtet, was nur für Nicht-Aufenthaltsräume (Bad, Lager) zulässig ist. In Hinblick auf die Geometrie des Baukörpers ist festzuhalten, dass bei Rastermodulen von fünf und mehr Metern in Y-Richtung, also in der Gebäudetiefe, mit guten Belichtungsverhältnissen zu rechnen ist.

In einem Quervergleich der Ausnutzungsquotienten der Wohnfläche je Person eines Haushalts zeigt sich die Effizienz der aus Modulen akkumulierten Wohnungen. Die Tabelle zeigt in der linken Spalte die Rastergrößen von 2,65m x 2,65 bis 4,50m x 6,00m, wobei nicht alle möglichen Raster in der Tabelle erfasst wurden. Die ungerichteten Raster gehen nur bis 4,50m, da eine größere Abmessung sich als unwirtschaftlich in Hinblick auf die Nutzbarkeit und das Tragwerk darstellen. Dies wird für die gerichteten Systeme übernommen und für die kurzen Seiten der Bereich von 2,65m bis 4,50m untersucht. Die langen Seiten reichen bis 6,00m, jedoch nie länger als das Doppelte der kurzen Rasterlänge.

Die kleinsten benötigten Grundflächen sind mit weniger als 20m² pro Person in Summe acht Mal zu finden, bei dem Rastermaß 2,65m im 2 PHH, 4 PHH und 5 PHH, dem Rastermaß 2,65m x 2,85m im 2PHH und 4PHH, dem Rastermaß 2,65m x 3,00m im 2PHH, dem Rastermaß 2,85m x 3,00m im 2PHH, sowie dem Rastermaß 4,00m x 5,00m im 5 PHH. Die größten benötigten Grundflächen sind in den 1 PHH anzutreffen und reichen von 34m² pro Person bis zu 66m² pro Person.

Im der Gesamtbetrachtung wird deutlich, dass Einpersonenhaushalte zeigen sich eher als ungünstig. Tendenziell haben Wohnungseinheiten für 2PHH bis 5PHH bessere Ausnutzungsquotienten als 1PPH und 6PHH. Auch sind kleinere Rastergrößen effizienter als größere, große Raster jedoch besser als Mittlere. Diese Trends sind nicht linear, sondern sprunghaft, was dadurch zu begründen ist, dass die Wohnfläche je Anzahl der Module akkumuliert wird und eine Funktion in ein Rastermodul erweitert werden muss. Damit steigt auch die benötigte Fläche. Der Median liegt mit 27m² pro Person unter dem Mittelwert mit 29m². Im Vergleich zu dem deutschlandweiten Mittelwert von 46,2m² (Statistisches Bundesamt, 2014)²⁶, liegen die mindestens benötigten Grundrissflächen deutlich darunter und bieten somit ein großes Potential für suffiziente Wohnungen.

26 Statistisches Bundesamt (Destatis 2018), 'Durchschnittliche Wohnfläche pro Person nach Haushaltstyp in Deutschland 2014', <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Wohnen/Tabellen/TabellenHaushaltsstrukturWohnflaeche.html>, 2014.

Rasterauswertung Flächenausnutzung (Passung Raster und Wohnfunktionen)

Im nächsten Schritt wurden die Ausnutzung der einzelnen Raster (Rasterfelder) untersucht, indem die Passung zwischen der Wohnfunktion und den Flächen des Rasters bewertet wurde. Die Prozentangaben in der Tabelle geben an, welcher Anteil der gegebenen Rastergröße durch die jeweilige Wohnfunktion belegt wird. Eine höhere Ausnutzung ist in Hinblick auf eine höhere Flächeneffizienz günstiger.

Abbildung 82:
Tabelle Passung Geometrie und
Wohnnutzung mit Durchschnittswerten
(DGJ Architektur, 2019).

Raster	1 PHH	2 PHH	3 PHH	4 PHH	5 PHH	6 PHH	7 PHH
2,65 m x 2,65 m	62%	74%	72%	79%	71%		
2,85 m x 2,85 m	53%	64%	66%	69%	51%	73%	69%
3,00 m x 3,00 m	57%	68%	59%	62%	55%	66%	69%
3,50 m x 3,50 m	51%	49%	55%	55%	59%	57%	59%
4,00 m x 4,00 m	39%	46%	58%	54%	65%	72%	82%
4,50 m x 4,50 m	40%	48%	56%	49%	51%	56%	66%
2,65 m x 2,85 m	57%	69%	74%	74%	66%	78%	78%
2,65 m x 3,00 m	57%	71%	67%	70%	62%	75%	74%
2,65 m x 3,50 m	49%	60%	59%	66%	58%	64%	64%
2,65 m x 4,00 m	60%	58%	64%	69%	73%	71%	68%
2,65 m x 4,50 m	53%	51%	56%	65%	62%	66%	70%
2,65 m x 5,00 m	47%	46%	51%	58%	56%	64%	74%
2,65 m x 5,30 m	59%	54%	48%	51%	58%	60%	62%
2,85 m x 3,00 m	60%	72%	52%	55%	52%	69%	69%
2,85 m x 3,50 m	64%	61%	68%	57%	60%	66%	68%
2,85 m x 4,00 m	55%	53%	59%	55%	58%	66%	64%
2,85 m x 4,50 m	65%	59%	61%	60%	58%	61%	65%
2,85 m x 5,00 m	58%	53%	65%	54%	57%	59%	61%
2,85 m x 5,30 m	55%	50%	62%	51%	54%	56%	57%
2,85 m x 5,70 m	51%	46%	57%	47%	50%	52%	53%
3,00 m x 3,50 m	60%	58%	64%	63%	68%	62%	65%
3,00 m x 4,00 m	52%	50%	56%	62%	65%	63%	61%
3,00 m x 4,50 m	62%	56%	58%	57%	55%	57%	58%
3,00 m x 5,00 m	55%	50%	62%	51%	49%	56%	57%
3,00 m x 5,30 m	52%	47%	58%	48%	51%	53%	54%
3,00 m x 5,70 m	48%	44%	54%	45%	47%	49%	50%
3,00 m x 6,00 m	46%	41%	51%	48%	45%	46%	47%
3,50 m x 4,00 m	44%	43%	48%	54%	57%	63%	64%
3,50 m x 4,50 m	39%	47%	49%	55%	51%	58%	58%
3,50 m x 5,00 m	47%	56%	66%	49%	54%	52%	57%
3,50 m x 5,30 m	44%	53%	62%	54%	59%	70%	61%
3,50 m x 5,70 m	41%	49%	58%	50%	60%	65%	64%
3,50 m x 6,00 m	39%	47%	55%	57%	57%	62%	60%
4,00 m x 4,50 m	45%	55%	73%	56%	57%	63%	67%
4,00 m x 5,00 m	41%	49%	57%	62%	72%	65%	63%
4,00 m x 5,30 m	38%	46%	54%	58%	68%	61%	68%
4,00 m x 5,70 m	36%	43%	50%	54%	63%	66%	63%
4,00 m x 6,00 m	34%	41%	47%	62%	60%	63%	60%
4,50 m x 5,00 m	36%	43%	51%	53%	64%	67%	56%
4,50 m x 5,30 m	51%	61%	48%	50%	60%	63%	60%
4,50 m x 5,70 m	47%	57%	44%	46%	56%	58%	56%
4,50 m x 6,00 m	45%	54%	56%	55%	53%	55%	62%

Mittelwert	57%		Median	57%		Modalwert	49%
------------	-----	--	--------	-----	--	-----------	-----

Betrachtet man die Passung der Wohnfunktionen als die prozentuale Ausnutzung der benötigten Rastermodule findet man in Teilen ein ähnliches Bild wie in der Betrachtung der Wohnfläche pro Person. Die Tabelle zeigt ebenfalls in der linken Spalte die Rastergrößen und in der oberen Reihe die Anzahl der Personen pro Haushalt. Der Farbton und die Farbtintensität der Felder gibt hier den Grad der Ausnutzung der Fläche (Passung zwischen Wohnfunktion und Fläche des Moduls) an, die sich aus der Anzahl der benötigten Rastermodule ergibt und ist ein direkter Parameter der Effizienz des Rasters. Dabei steht rot für eine geringe Ausnutzung, blau für eine sehr gute.

Auch in Hinblick auf die Flächenausnutzung zeigen sich die kleinen Wohnungen (1PHH) als besonders ungünstig mit Ausnutzungen von unter 40%. Dies liegt daran, dass die einzelnen Funktionen meist in einzelnen Rastern verortet werden müssen, aber von diesen nur einen kleinen Teil der Fläche sinnvoll belegen. Ebenso sind auch hier kleinere Rastergrößen besser ausgenutzt als größere und große Raster besser als Mittlere. Auffällig ist, dass in beiden Tabellen bei den Rastermaßen 3,00m x 5,30m, 3,00m x 5,70m, 3,50m x 6,00m und 3,50m x 4,00m, in allen Wohnungsgrößen die Werte unterhalb des Durchschnittes liegen. Dies ist eine Bestätigung des Ergebnisses aus der Analyse des Wohnflächenbedarfs bei verschiedenen Rastermaßen (vgl. dazu 4.5.1.1 Rasterauswertung Wohnfläche pro Person) in der sich bereits zeigte, dass mittelgroße Raster günstiger sind als kleine und große.

Interessant ist, dass anders als bei der Wohnfläche pro Person, tendenziell eine effizientere Ausnutzung der Rastermodule in Wohnungen für sechs und sieben Personenhaushalte besteht.

Ein Vergleich der Raster macht daher in jedem Fall Sinn, da es trotz vieler Parallelen, wie z.B. die geringere Effizienz bei Singlewohnungen, doch immer Sprünge des Potenzials gibt. Je nach Größe der Wohnung und Größe des Rasters gibt es einzelne Spitzenwerte. Diese ergeben sich, bei einer möglichst guten Passung der gegebenen Rasterfläche und der für die gewünschte Nutzung benötigten Fläche. Eine gute Grundperformance weisen die Raster 2,65m x 2,85m und 2,65m x 3,00m auf. Hier ist jedoch mit reduzierten Bewegungsflächen in den Elternschlafzimmern zurechnen.

Als Hinweis für die Planung lässt sich festhalten, dass kleine Raster hinsichtlich der Grundrissorganisation und Effizienz zu bevorzugen sind. Allerdings ist dabei an verschiedenen Stellen mit reduzierten Bewegungsflächen zu rechnen, die sich gegebenenfalls auch negativ auf die Erfüllung der Barrierefreiheit auswirken. Den Baukörper betreffend und dessen Belichtung sind große Raster von Vorteil

ANALYSE- UND PLANUNGSTOOL

Neben der Entwicklung des Bausystems wurde auch eine Planungshilfe entwickelt, die den Planungsprozess mit dem Bausystem unterstützen kann. Es wurde ein Excel-basiertes Programm erarbeitet, mit dessen Hilfe die ArchitektIn oder IngenieurIn basierend auf der Eingabe der wesentlichen Parameter des Projekts oder Entwurfs eine erste Abschätzung über Aufwand und Performance des Bausystems in verschiedenen Varianten erarbeiten kann. Das Planungstool kann dabei eine statische Berechnung und Bemessung der Bauteile nicht ersetzen, sondern dient lediglich einer ersten Abschätzung des Systems und vor allem dem Vergleich von verschiedenen Varianten/Dimensionen des Systems innerhalb gleicher oder ähnlicher Parameter. Die Möglichkeit und Grenzen des Bausystems sollen neben den Berechnungsmodellen auch Anhand des Analysetools aufgezeigt werden. Damit wird einer möglichst großen Gruppe von PlanerInnen ein niederschwelliges Werkzeug zur Hand gegeben um durch einfache Eingaben übersichtlich herauszufinden, welche Vorteile das Skelettsystem bietet und wie es sich wirtschaftlich niederschlägt. Auf das Rechentool kann unter diesem LINK zugegriffen werden:

<https://www.dropbox.com/sh/axw5xmx3xyeckxm/AAD2DpTfVrjwkr4nToXNkrh-a?dl=0>



BESCHREIBUNG ANALYSE- UND PLANUNGSTOOL

Das Analysentool ist in Excel erstellt, um eine möglichst große Gruppe von potentiellen NutzerInnen zu erreichen. Durch das verwendete Programm kann von einer geringen Hemmschwelle und leichten Bedienbarkeit ausgegangen werden. Die Einfachheit des Analysetools hilft bei der Planung mit dem neuentwickelten Bausystems, ohne dass sich die NutzerIn mit der Konstruktionsweise des Bausystems bereits auskennen muss. Das Analysetool macht erste Berechnungen eines zu entwerfenden Gebäudes auf Grundlage weniger Eingabeparameter zu folgenden Inhalten:

- Tragwerk (Querschnitte)
- Effizienz des Grundrisses /Rastermaßes bezüglich Platzbedarfes und Flächenausnutzung
- A / V – Verhältnis (Kompaktheit des Gebäudes)
- Benütigte Holz mengen

Für die Analysen sind in dem Exceltool auf gesonderten Blättern Datenbanken und Rechenmodelle hinterlegt. Diese beinhalten Daten aus den verschiedenen Bauordnungen und DIN-Normen, wie Informationen zu Gebäudeklassen, Mindestraumhöhen, Bandschutzanforderungen und Anforderung bezüglich der Belichtung von Gebäuden. Außerdem sind die Untersuchten Rastermaße (2,65m / 2,85m / 3,00m / 3,50m / 4,00m / 4,50m / 5,00m / 5,30 / 5,70/ 6,00m) und Varianten der zur Verfügung stehenden Erschließungskerne aufgeführt. Des Weiteren wurden auch Daten zur Ermittlung von Kosten hinterlegt sowie zu nutzungsbezogenen Fragestellungen wie beispielsweise der Belichtung. Diese stehen an dieser Stelle nicht im Mittelpunkt der Betrachtungen, können aber in der weiteren Entwicklung des Planungstools vertieft werden.

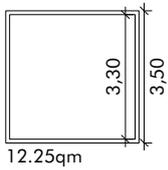
Eine Matrix zeigt die Untersuchung der gerichteten und ungerichteten Raster und veranschaulicht ihre Effizienz in Hinblick auf die Wohnfläche pro Person und die Ausnutzung der für die Wohnungstypen (1-7 PHH) erforderliche Anzahl an Rastermodulen. Hierfür wurden für die in aller Regel im Wohnungsbau benötigten Funktionsbereiche Schlafzimmer, Gäste-/Arbeitszimmer, Essen, Küche, Wohnen, Bad die nutzungsspezifisch notwendigen Flächen je Haushaltsgröße (Anzahl der BewohnerInnen) angenommen und mit den Rastermaßen des Voll-Holz-Skelettsystems verglichen. Daraus ergibt sich eine Mindestanzahl an Rasterfeldern je Haushaltsgröße (siehe hierzu auch 4.5 Gebäudekundliche Analyse / Flächeneffizienz des Bausystems). Auf der Basis der bereits von uns erforschten und definierten Grundflächen, bzw. der daraus resultierenden Mindestanzahl an Rasterfeldern führt das Analysentool im Hintergrund verschiedene Auswertungen durch. Diese sind auf dem Blatt ‚Effizienz Flächenausnutzung‘ einzusehen. Dort bekommt der Anwender Informationen zum Flächenbedarf pro Person, sowie zur Flächenausnutzung, je Rastergröße und Wohnungstyp.

Die erarbeiteten Rechenmodelle führen Berechnungen bezüglich der Holzquerschnitte, Aussteifung des Baukörpers und Detailnachweise der system-spezifischen Knotenpunkte.

Anhand der Berechnungen und Analysen gibt das Exceltool in einem ersten Schritt eine Auswertung zum benötigten Holzvolumen pro BGF der Primärkonstruktion (d.h. Stützen, Decken, Unterzüge und aussteifende Wände der Erschließungskerne) des zu planenden Gebäudes für alle untersuchten Rastergrößen aus. Außerdem erhält die NutzerIn Information über den Flächenbedarf pro Person je Rastergröße und Wohnungstyp.

Für die dazu notwendigen Eingaben der projekt- oder entwurfseigenen Grundparameter seitens der NutzerIn erfolgt die Eingabe über eine eigene Eingabemaske, die intuitiv eine Eingabestruktur nahelegt. Die abgefragten

Abbildung 83:
Auszug des Grundrisskataloges
für die Rastergröße 3,5m zur
Bestimmung der Mindestzahl der
Rasterfelder je Haushaltsgröße
(DGJ Architektur, 2019).



	1PHH	2PHH	3PHH
Schlafzimmer	<p>Schlafzimmer Schlafzimmer Eltern</p>	<p>Schlafzimmer Schlafzimmer Eltern</p>	<p>Kinderzimmer Schlafzimmer Eltern</p>
Essen			
Küche			
Wohnen			
Bad	<p>Barrierefrei</p>	<p>Barrierefrei</p>	<p>Barrierefrei</p>
	4 UNIT.	5 UNIT.	7 UNIT.

Parameter beziehen sich auf ein zu untersuchendes Grundstück (Bundesland, Baufeldbreite und -tiefe) sowie die geforderten Eigenschaften des Gebäudes (Anzahl der Geschosse, Raumhöhe, Fensterposition und Erschließungskern, Deckenaufbau).

Die Eingabeparameter fließen in die Berechnungen der Rechenmodelle ein. So werden die das Treppenhaus umschließenden Wände als Aussteifung herangezogen und es wird geprüft ob diese für das Gebäude ausreichend ist. Für den Fall, dass die Erschließungskerne nicht zur Aussteifung des Gebäudes ausreichen, wird die NutzerIn darauf hingewiesen. Weitere Fehlerkontrollen unterstützen die AnwenderIn bei einer korrekten Eingabe, und beugen so einer fehlerhaften Berechnung vor.

Spezifische Angaben zur Gebrauchstauglichkeit, Gebäudeklasse, Material der Bauteile und Gebäudeaussteifung können in einer erweiterten Eingabe gemacht werden. Auch können dort wirtschaftliche Mindest- und Maximalkosten für die verschiedenen Holzwerkstoffe sowie für Dach, Fenster und Fassade geändert werden, die dann mit in die Gesamtkostenaufstellung einfließen, um ein individuelles Kostenbild zu ermöglichen. Ziel ist es jedoch auch schon auf Grundlage der ersten Eingabeparameter eine Einschätzung über sinnvolle Grundrisse, Dimensionen und Kosten zu erhalten, mit der sich zum Beispiel verschiedene Planungsvarianten vergleichen lassen.

Durch die oben bereits beschriebenen Rechenoperationen und die Auswahl der gewünschten Rastermaße, kann das Rechentool nun Aussagen über die Parameter eines auf dem Grundstück möglichen Gebäudes treffen. Diese sind Angaben zum Tragwerk, d.h. Querschnitte von Stützen, Decken und Unterzügen, zur Fassadenfläche und Angaben zum Gebäude, wie Dachfläche (horizontal), Bodenfläche, BGF, sowie das A/V-Verhältnis. Des Weiteren bekommt die NutzerIn einen Überblick über die Kosten für die Primärkonstruktion und die Gebäudehülle.

NUTZER-HANDBUCH - ANLEITUNG FÜR DAS ANALYSETOOLS

Die Anwendung des Excel-basierten Programms erlaubt, erste Abschätzung über Aufwand und Performance des Bausystems zu erarbeiten. Es soll bei einer ersten Bewertung eines Projekts oder eines Entwurfs basierend auf der Eingabe wesentlicher Parameter helfen, ohne Vorkenntnisse über das neuentwickelten Bausystem und dessen Konstruktionsweise vorauszusetzen. Das Planungstool kann dabei eine durchgehende Planung oder die konkreten statischen Berechnungen und Bemessung der Tragwerks nicht ersetzen, sondern dient einer ersten Abschätzung des Systems und vor allem dem Vergleich von verschiedenen Varianten/Dimensionen des Systems innerhalb gleicher oder ähnlicher Parameter. Das Rechentool erfordert es, die Eingabe bzw. Auswahl eines Rasters festzulegen. Ist das Raster ausgewählt, errechnet das Tool als Ergebnis eine Vordimensionierung des Tragwerks und den insgesamt zu erwartenden Holzverbrauch.

Für eine einfachere Orientierung und Eingabe sind alle Felder in denen eine Eingabe nötig ist gelb hinterlegt. Die Eingabe kann entweder als freie Eingabe oder als Auswahl erfolgen. Ergebnisfelder sind grün hinterlegt und der Text ist schwarz. Wichtige Ergebnisse sind dazu in fetten Buchstaben hervorgehoben. Ergebnisse einer Auswertung mehrerer Parameter werden mit Hilfe von Farbverläufen veranschaulicht, wobei rot für einen schlechten Wert steht und z.B. Grün für ein günstiges Resultat.

Abbildung 84:
Auszug der Kurzanleitung des Analysentools (DGJ Architektur, 2019)

KURZANLEITUNG

Bedeutung der Feld-Formate

<p>Beispiel</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">2,5</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">Bundesland</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen; text-align: center;">11,3</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen; text-align: center;">11,3</td></tr> </table> <p>Auswertung Holzmenge pro BGF</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: red; text-align: center;">0,535</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">0,370</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen; text-align: center;">0,238</td></tr> </table> <p>Auswertung Wohnfläche pro Person</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: red; text-align: center;">55 qm/pP</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">26 qm/pP</td></tr> <tr><td style="background-color: blue; text-align: center;">18 qm/pP</td></tr> </table>	2,5	Bundesland	11,3	11,3	0,535	0,370	0,238	55 qm/pP	26 qm/pP	18 qm/pP	<p>Bedeutung</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">Eingabefeld: Bitte den angeforderten Wert eintragen</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">Eingabefeld mit Auswahlmenü</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen; text-align: center;">Ergebnisfeld</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen; text-align: center;">Wichtiges Ergebnisfeld</td></tr> <tr><td style="background-color: red; text-align: center;">schlechtes Ergebnisfeld</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">mittleres Ergebnisfeld</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen; text-align: center;">gutes Ergebnisfeld</td></tr> <tr><td style="background-color: red; text-align: center;">sehr großzügig</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow; text-align: center;">durchschnittlich</td></tr> <tr><td style="background-color: blue; text-align: center;">sehr kompakt</td></tr> </table>	Eingabefeld: Bitte den angeforderten Wert eintragen	Eingabefeld mit Auswahlmenü	Ergebnisfeld	Wichtiges Ergebnisfeld	schlechtes Ergebnisfeld	mittleres Ergebnisfeld	gutes Ergebnisfeld	sehr großzügig	durchschnittlich	sehr kompakt
2,5																					
Bundesland																					
11,3																					
11,3																					
0,535																					
0,370																					
0,238																					
55 qm/pP																					
26 qm/pP																					
18 qm/pP																					
Eingabefeld: Bitte den angeforderten Wert eintragen																					
Eingabefeld mit Auswahlmenü																					
Ergebnisfeld																					
Wichtiges Ergebnisfeld																					
schlechtes Ergebnisfeld																					
mittleres Ergebnisfeld																					
gutes Ergebnisfeld																					
sehr großzügig																					
durchschnittlich																					
sehr kompakt																					

Verzeichnis der Blätter

Blattname	Funktion	Kurzbeschreibung
Eingabe und Ergebnis	Objektdatei; Ergebniszusammenfassung	Objektbeschreibung, Auswahl, Zusammenfassung der Ergebnisse
Erweiterte Eingabe	zusätzliche Daten	Vertiefende Angaben zu Gebrauchstauglichkeit, Gebäudeklasse und Kosten
Effizienz Flächenausnutzung	Auswertung	Passung Geometrie und Wohnnutzung
Möblierungsschablone	Daten	Nutzungsspezifisch notwendige Fläche
Wohnungsausnutzung	Daten	Wohnungsausnutzung verschiedener Haushaltsgrößen je Rastergröße

Eingabe der Grundparameter

Im ersten Schritt werden die Gebäudegeometrie und die Erschließung eingegeben.

Die Eingabe erfolgt in folgenden Schritten:

- Auswahl des Bundeslands aus einem Dropdown-Menü
- Eingabe der Abmessung des vorhandenen Baufeldes. Wichtig ist dabei zu bedenken, dass das Analysetool immer davon ausgeht, dass die längere Seite in X-Richtung verläuft. Entsprechend müssen die Eingabe mit der Gebäudetiefe in Y-Richtung erfolgen.
- Die Gebäudehöhe wird nach Beendigung der Eingabe automatisch berechnet.
- Eingabe oder Auswahl von Geschosszahl (Etagen), Raumhöhe, Brüstungshöhe und Sturzhöhe der Fenster, sowie die gewünschte Anzahl der Erschließungskerne (die Grafik gibt eine Hilfestellung zur Eingabe der einzelnen Höhen).
- Auswahl des Erschließungssystems aus der Dropdownliste aus; es stehen drei Varianten zur Verfügung:
 - zweiläufig mit Fahrstuhl
 - zweiläufig ohne Fahrstuhl
 - einläufig ohne Fahrstuhl (ohne eine Erweiterte Eingabe geht das Rechentool davon aus, dass der Erschließungskern mittig im Gebäudegrundriss angeordnet ist)
- Wählen Sie einen Deckaufbau aus dem Dropdownmenü aus. Es stehen Ihnen zwei Möglichkeiten zur Auswahl DE01: 275mm (beinhaltet eine Installationsebene von 60mm) und DE02: 215mm.

Abbildung 85:
Auszug der Eingabemaske des
Analysetools mit ausgewähltem
Erschließungskern
(DGJ Architektur, 2019).

Falsche Werte, in Form von Unter- oder Überschreitungen bestimmter Anforderungen, lösen eine Fehlermeldung aus. Diese gibt Ihnen Auskunft inwieweit der falsch eingegabene Wert geändert werden muss.

Holz Form und Kraftschlüssig

Analysetool für einen Systemholzbau zur Untersuchung der Spannweiten bezüglich:

- Tragwerk (Querschnitte -> benötigtes Holzvolumen)
- Effizienz des Grundrisses (BGF/WFL)
- A/V - Verhältnis
- Belichtung
- Flexibilität

Eingabe Rechenmodell

Zur Untersuchung eines realen Falls unter den oben genannten Parametern wird davon ausgegangen, dass ein Grundstück vorliegt. Dazu bitte Angaben eintragen:

Maximal zur Verfügung stehende Abmessungen des Gebäudevolumens aufgrund der Grundstücksgeometrie

Bundesland

Baden-
Württemberg

Baufeld Breite: 20,00 m X-Achse

Hinweis: Der x-Wert muss > als der y-Wert sein!

Baufeld Tiefe: 12,00 m Y-Achse

Gebäudehöhe: 13,58 m Z-Achse

Hinweis: Überprüfen Sie, ob mit dieser Gebäudehöhe die Abstandsflächen eingehalten werden und ob der Bebauungsplan

Anzahl Etagen: 4

Raumhöhe: 3,00 m

Mindest Raumhöhe: 2,30 m

Anzahl Erschließungskern: 1

Art des Erschließungskerns: A: mit
Fahrstuhl

Deckenaufbau: DE01 DE01 mit 60mm Installationsebene; DE02 ohne Installationsebene

Hinweise zum Brandschutz

Max. Größe einer Nutzereinheit beträgt weniger als 400m² -> andernfalls im Blatt "Erweiterte Eingabe" ändern

Es wird von einem nicht freistehenden Gebäude ausgegangen. -> andernfalls im Blatt "Erweiterte Eingabe" ändern

Es wird von mindestens 3 NE ausgegangen.

Es wird davon ausgegangen, dass GOK=OKFF im EG. -> für Bestimmung der Gebäudeklasse

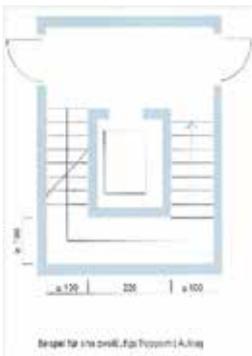
Gebäudeklasse entsprechend der gewählten Angaben:

GK4

Auf eine K²60-Kapselung kann ggfs. verzichtet werden.

Hinweise zur Nutzung

Es wird von einer reinen Wohnnutzung ausgegangen. -> Nutzlastkategorie A2



Zentral für die Ausprägung des Tragwerks und des Bausystems ist die Auswahl des Rasters. Das Tool bietet über zwei Dropdownlisten jeweils ein Raster für X-Richtung (Gebäuelänge) und Y-Richtung (Gebäudetiefe) an.

Auswahl

Die vorangehenden Tabellen sollen als Hilfestellung für die nachfolgende Auswahl der Rastermaße dienen.

Raster x-Achse: 2,65 m
Raster y-Achse: 2,65 m

Eingabelogik, Vereinfachungen und Einschränkungen

Die Geometrie des Gebäudes muss für die Berechnung mit dem Tool vereinfacht eingegeben werden. Grundsätzlich lassen sich nur einfache kubische Baukörper abbilden, dementsprechend müssen bei Gebäude mit einer anderen Geometrie vereinfachte Modelle eingegeben werden, die aber eine Abschätzung zu der Ausprägung des Bausystems zulassen.

Entweder müssen die Baukörper so eingegeben werden, dass Sonderformen vernachlässigt werden, indem zum Beispiel Staffelgeschosse als Vollgeschosse angenommen werden, oder es kann für komplexere Geometrien, die sich in kubische Volumina zerlegen lässt, ein möglichst großer kubischer Teilbereich betrachtet werden, der sich mit dem Werkzeug beschreiben lässt. Die Ergebnisse lassen sich dann über die BGF auf den Rest des Gebäudes hochrechnen, wenn die anderen Gebäudeteile eine ähnliche Struktur aufweisen.

Da das Rechentool mit im Vorfeld festgelegten Rastermaßen arbeitet (2,65m / 2,85m / 3,00m / 3,50m / 4,00m / 4,50m / 5,00m / 5,30 / 5,70/ 6,00m) kommt es teilweise zur ineffizienten Ausnutzung des Baufeldes. In der realen Planung würde man auf Zwischenwerte zurückgreifen.

Eine Laubengangerschließung ist in dieser ersten Version des Berechnungstools noch nicht hinterlegt und ist somit auch nicht abbildbar. Ebenso sind Keller in der Anzahl der Etagen nicht berücksichtigt. Die Forschung geht davon aus, dass der Keller nicht als Holzkonstruktion errichtet wird.

Es kann nur eine Raumhöhe eingegeben werden. Sind in der Planung unterschiedliche Geschosshöhen geplant (z.B. ein überhöhtes Erdgeschoß) geplant, so sollte ein Mittelwert aller Geschosse angesetzt und eingegeben werden.

Erweiterte Eingabe

In einer erweiterten Eingabe können spezifischere Angaben zur Gebrauchstauglichkeit, Gebäudeklasse, Material der Bauteile und Gebäudeaussteifung gemacht werden. Im Hintergrund sind jedoch schon Werte als Grundeingabe hinterlegt, sodass im Blatt „Erweiterte Eingabe“ die Eingaben nicht zwingend erforderlich sind. In diesem Blatt können auch die Mindest- und Maximal-Kosten für die verschiedenen Holzwerkstoffe sowie für Dachaufbau, Fenster und Fassade geändert werden, die dann mit in die Gesamtkostenaufstellung einfließen, um Ihnen ein individuelles Kostenmodell zu ermöglichen. Ziel ist es jedoch auch schon auf Grundlage der ersten Eingabeparameter eine Einschätzung über sinnvolle Grundrisse, Dimensionen und Kosten zu geben.

Abbildung 86:
Auszug der Erweiterten Eingabemaske des Analysetools (DGJ Architektur, 2019).

Erweiterte Eingabe

Einige Werte sind im Rechenmodell voreingestellt. Zur genaueren Untersuchung können diese hier geändert bzw. angepasst werden.

Anforderungen Gebrauchstauglichkeit

Durchbiegung Decke	I/	300	[-]
Schwingung Decke	$f_{\text{grenz}} =$	8,0	[Hz]
Durchbiegung Unterzug	I/	300	[-]
Schwingung Unterzug	$f_{\text{grenz}} =$	8,0	[Hz]

Bestimmung der Gebäudeklasse (-> Brandbeanspruchung)

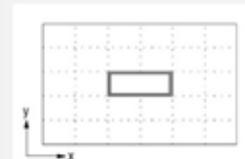
Höhe h*		[m]	* OK Fußboden des höchstgel. Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum mögl. ist, über der Geländeoberfläche im Mittel
Gebäudeart**		[-]	**freistehend/ nicht freistehend; wird nichts eingetragen, wird von einem nicht freistehenden Gebäude ausgegangen
Anzahl der Nutzeinheiten NE***		[-]	*** ohne UG; wird nichts eingetragen, wird von mindestens 3 NE ausgegangen
Größe aller Nutzeinheiten NE****		[m ²]	**** wird nichts eingetragen, wird von mindestens 400m ² Nutzfläche aller NE ausgegangen
Gebäudeklasse	GK4		

Eingabe Bauteile und Material

Material Unterzüge		[-]	voreingestellt ist GL24h
max. Breite der Unterzüge	240	[mm]	ohne Eingabe orientiert sich die Unterzugbreite an der erforderlichen Stützenbreite
Material Stützen		[-]	voreingestellt ist GL24h

Angaben zur Gebäudeaussteifung

Windlastzone	II	[-]	
Geländekategorie	Binnenland		
Lage der Erschließungskerne: mittig in			ohne Eingab mittig in beide Richtungen
Ausrichtung der Erschließungskerne: lange Seite in			ohne Eingab lange Seite in x-Richtung



Ergebnisse

Aus den Eingaben in der Eingabemaske berechnet das Rechentool für jedes in der Untersuchung betrachtete Rastermaß zunächst das Holzvolumen pro BGF der Primärkonstruktion (Stützen, Unterzüge, Decken und aussteifende Wände der Treppenkerne). Mit Hilfe eines Farbverlaufes von Rot zu Grün wird Ihnen veranschaulicht, welches Raster in Bezug auf den Materialverbrauch am günstigsten bzw. ungünstigsten ist. Dabei steht Grün für einen günstigen, Gelb für einen mittleren und Rot für einen hohen Verbrauch von Holz.

Abbildung 87:
Auszug der Ergebnismaske des
Analysetools
(DGJ Architektur, 2019).

Ergebnisse

HOLZVOLUMEN PRO BGF

Raster y-Achse	Raster x-Achse									
	2,65 m	2,85 m	3,00 m	3,50 m	4,00 m	4,50 m	5,00 m	5,30 m	5,70 m	6,00 m
2,65 m	0,270	0,234	0,238	0,244	0,241	0,251	0,247	0,277	0,275	0,275
2,85 m	0,234	0,253	0,231	0,235	0,232	0,242	0,250	0,271	0,269	0,269
3,00 m	0,228	0,222	0,251	0,233	0,227	0,235	0,243	0,263	0,261	0,261
3,50 m	0,240	0,231	0,239	0,284	0,255	0,267	0,262	0,282	0,283	0,282
4,00 m	0,237	0,228	0,232	0,255	0,296	0,271	0,269	0,288	0,288	0,288
4,50 m	0,258	0,248	0,253	0,280	0,282	0,366	0,324	0,345	0,341	0,342
5,00 m	0,252	0,255	0,259	0,273	0,279	0,324	0,372	0,351	0,355	0,353
5,30 m	0,260	0,254	0,258	0,271	0,277	0,321	0,329	-	-	-
5,70 m	0,258	0,252	0,255	0,271	0,278	0,318	0,334	-	-	-
6,00 m	0,258	0,252	0,255	0,271	0,277	0,320	0,333	-	-	-

Mit der getätigten Auswahl rechnet das Programm die für das gewählte Rastermaß und die zu Beginn von Ihnen eingegebenen projekt- oder entwurfsspezifischen Angaben, sämtliche Werte des Auswertungsteils des Analysetools aus.

Im Einzelnen liefert das Tool folgende Ergebnisse:

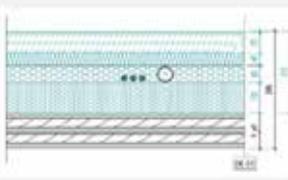
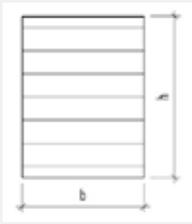
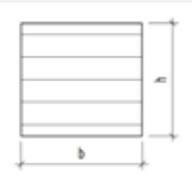
Tragwerk (Querschnitte):

- Querschnitt, Spannrichtung und Volumen der Decken
- Querschnitt, Spannrichtung und Volumen der Unterzüge
- Querschnitt und Volumen der Stützen
- Angaben zu der Aussteifung durch den/die Erschließungskern/-e, mit einem Vermerk ob diese/-r für die Aussteifung ausreichend ist

Gebäude, Flächen und A/V - Verhältnis Kosten:

- Gebäudebreite
- Gebäudeläge
- Gebäudehöhe
- Fläche Dach (horizontal)
- Fläche Boden
- BGF
- A/V-Verhältnis

Abbildung 88:
Auszug der Auswertungsmaske des
Analysetools
(DGJ Architektur, 2019)

Decken	Unterzüge	Stützen
$l_{DE} = 2,65 \text{ m}$ in x-Richtung BSP 120 20/30/20/30/20 $b_{DE} = 1.000 \text{ mm}$ $h_{DE} = 120 \text{ mm}$	$l_{UZ} = 2,65 \text{ m}$ in x-Richtung GL24h $b_{UZ} = 240 \text{ mm}$ $h_{UZ} = 240 \text{ mm}$	$l_{ST} = 3,40 \text{ m}$ GL24h $b_{ST} = 240 \text{ mm}$ $h_{ST} = 240 \text{ mm}$
 		
$V_{DE} = 0,84 \text{ m}^3$ $V_{DE,ges} = 94,4 \text{ m}^3$	$V_{UZ} = 0,15 \text{ m}^3$ $V_{UZ,ges} = 40,9 \text{ m}^3$	$V_{ST} = 0,20 \text{ m}^3$ $V_{ST,ges} = 31,3 \text{ m}^3$

Aussteifung	
Material Lagenaufbau	BSPW 200 40/40/40/40/40
x-Richtung: Wandscheiben des Kerns ausreichend y-Richtung: Wandscheiben des Kerns ausreichend	

Gebäude, Flächen und A/V - Verhältnis			
Gebäuelänge in x-Richtung	18,55 m	Fläche Dach	196,63 m ²
Gebäuelänge in y-Richtung	10,60 m	Fläche Boden	196,63 m ²
Gebäudehöhe z-Richtung	13,58 m		
BGF:	786,52 m ²		
A/V - Verhältnis:	0,44		

Querauswertung Effizienz und Flächenausnutzung

Zusätzlich zu dem Eingabe- und Ergebnisblatt steht die gebäudekundliche Auswertung zur Verfügung. In dieser wurde jedes in dem Rechentool abgebildete Raster auf seine Möblierbarkeit und somit auch auf seine Benutzbarkeit geprüft.

Hierfür wurden Grundrisstypologien in einer Matrix untersucht, die auf dem Blatt ‚Wohnungsausnutzung‘ einsehbar ist. Für die in aller Regel im Wohnungsbau benötigten Funktionsbereiche Schlafzimmer, Gäste-/Arbeitszimmer, Essen, Küche, Wohnen, Bad wurde die nutzungsspezifisch notwendige Fläche je Haushaltsgröße (Anzahl der BewohnerInnen) angenommen und mit den Rastermaßen des Voll-Holz-Skelettsystems verglichen. Daraus ergibt sich eine Mindestanzahl an Rasterfeldern je Haushaltsgröße (siehe hierzu auch Abschnitt 4.5 Gebäudekundliche Analyse / Flächeneffizienz des Bausystems).

Auf der Basis der resultierenden Mindestanzahl an Rasterfeldern führt das Analysetool im Hintergrund verschiedene Auswertungen durch. Diese sind auf dem Blatt ‚Effizienz Flächenausnutzung‘ einzusehen. Dort bekommen Sie Informationen zum Flächenbedarf pro Person, sowie zur Flächenausnutzung je Rastergröße und Wohnungstyp.

Die für diese Untersuchung verwendete Möblierungsschablone finden Sie auf dem Blatt Möblierungsschablone.

MÖBLIERUNGSSCHABLONE

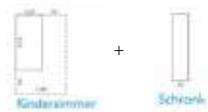
Schlafen	Schlaf-/Kinderzimmer	Doppelzimmer	Eltern
	3,60 m	3,60 m	3,60 m
	1,90 m	2,90 m	3,60 m
	6,8 qm	10,4 qm	13,0 qm
	2,50 m	2,50 m	4,20 m
	3,00 m	5,10 m	3,00 m
	7,5 qm	12,8 qm	12,6 qm
		3,60 m	3,60 m
		2,45 m	2,45 m
		8,8 qm	8,8 qm
		3,60 m	3,60 m
	2,65 m	2,65 m	
	9,5 qm	9,5 qm	
	3,60 m	3,60 m	
	2,80 m	2,80 m	
	10,1 qm	10,1 qm	
	7,2 qm	10,3 qm	10,8 qm
Gast / Arbeit	Arbeitszimmer	Gästezimmer	Gäste- und Arbeitszimmer
	2,45 m	3,00 m	3,00 m
	1,80 m	1,90 m	3,50 m
	4,4 qm	5,7 qm	10,5 qm
			2,45 m
			4,80 m
			11,8 qm
		11,1 qm	
Essen	1PHH	2PHH	3PHH
	1,50 m	1,50 m	2,40 m
	1,50 m	1,50 m	1,50 m
	2,3 qm	2,3 qm	3,6 qm
	1,20 m	1,20 m	
	2,40 m	2,40 m	
	2,9 qm	2,9 qm	
	2,6 qm	2,6 qm	
Küche	1PHH	2PHH	3PHH
	1,80 m	2,40 m	1,80 m
	1,50 m	1,50 m	2,40 m
	2,7 qm	3,6 qm	4,3 qm
			3,00 m
			1,50 m
			4,5 qm
		4,4 qm	
Wohnen	1PHH	2PHH	3PHH
	2,40 m	2,40 m	2,40 m
	2,40 m	2,40 m	2,40 m
	5,8 qm	5,8 qm	5,8 qm
Bad	Wannenbad	barrierefreies Bad	Vollbad
	1,70 m	1,90 m	1,80 m
	2,40 m	2,40 m	2,50 m
	4,1 qm	4,6 qm	4,5 qm

Abbildung 89:
Möblierungsschablone des Analysetools (DGJ Architektur, 2019)

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
 4 pers.	2,40 m	 5 pers.	2,40 m	 6 pers.	2,40 m	 7 pers.	2,40 m
	1,80 m		2,10 m		2,40 m		2,70 m
	4,3 qm		5,0 qm		5,8 qm		6,5 qm

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
 4 pers.	2,40 m	 5 pers.	3,00 m	 4/5 pers.	3,60 m	 4/5 pers.	3,60 m
	2,40 m		2,40 m		2,40 m		2,40 m
	5,8 qm		7,2 qm		8,6 qm		8,6 qm
					3,00 m		3,00 m
					3,00 m		3,00 m
			9,0 qm	9,0 qm			8,8 qm

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
 4 pers.	2,40 m	 5 pers.	3,20 m	 6 pers.	3,90 m	 7 pers.	4,10 m
	2,40 m		2,40 m		2,40 m		2,40 m
	5,8 qm		7,7 qm		9,4 qm		9,8 qm
			2,50 m		3,00 m		3,00 m
			2,80 m		3,00 m		3,00 m
	7,0 qm	7,0 qm	9,0 qm	9,0 qm			9,4 qm

Gäste-WC	
	1,60 m
	0,90 m
	1,4 qm

EXPLORATION

FALLSTUDIEN UND BETA-TESTING DES PLANUNGSTOOLS

Ausgangspunkt der Forschung ist die Entwicklung eines Bausystems, das von DGJ Architektur entwickelt wurde. Bei den betrachteten Entwürfen, die in diesem Bausystem konzipiert wurden, handelt es sich sowohl um reale Bauprojekte als auch um theoretische, freie Arbeiten und Wettbewerbsbeiträge:

Fallstudie 1 - dgj219 Arrival City 4.0

Fallstudie 2 - dgj228 WGF Wohngruppe Gemeinsam Suffizient Leben Frankfurt am Main

Fallstudie 3 - dgj223 IBA Heidelberg Studierendenwohnheim

Fallstudie 4 - dgj242 IBA Thüringen Studentenwohnheim Weimar

Fallstudie 5 - dgj244 Greenhouse

Der explorative Charakter der Arbeit bedingt, dass die Arbeiten gleichzeitig Vehikel und Untersuchungsgegenstand sind. Methodisch liegt in der Koppelung von Entwicklung (Entwurfsmethodik) und Analyse (Bewertung) eine Herausforderung. Dadurch wird aber auch eine wesentliche Eigenart des Entwerfens sichtbar: Der Entwurf hat kreative (schöpferische) wie analytische Anteile, die in Iteration und Rekursionen aufeinander wirken. In Ergänzung zu der alltäglichen Entwurfsarbeit, werden in dieser Untersuchung die analytischen Anteile explizit gemacht. Es sollen zum einen die analytischen Methoden des Entwerfens in Wirkung und Kriterien beschrieben werden. Zum anderen sollen aus diesen Methoden Werkzeuge entwickelt werden, mit denen der Einsatz des Bausystems (oder anderer Bausysteme) an anderen Stellen oder mit unterschiedlichen Funktionen entworfen werden kann.

Die forschungsgegenständliche Entwurfsmethodik bis hin zu einer Übertragbarkeit explizit und operativ zu machen, ist als Diskussionsbeitrag zur Methodologie des Entwerfens zu verstehen. In allen Entwurfsprozessen, werden forschungsgegenständliche Ebenen und Parameter abgewogen und optimiert.²⁷ Diese Iterationen und Prozesse sind jedoch selten explizit und damit intransparent. Sie finden in zahlreichen Skizzen, Dateien, Modellen und Diskussionen statt. Zu selten werden die Parameter, Kriterien und Entscheidungswege explizit. Wenn in dieser Studie von Übertragbarkeit gesprochen wird, so ist dies nicht auf eine allgemeine Anwendung des Bausystems hin gedacht. Vielmehr wird diskutiert, ob die zu erarbeiteten Entwurfs- und Analysewerkzeuge in angepasster Form auf andere Entwurfsprozesse übertragen werden können.

²⁷

„In a climate where parametric design and generative components are regarded as the cutting edge of architectural design, it is worth noting that all buildings are parametric, in the most literal sense of the word. Through the architectural design process, form inevitably emerges from a series of overlapping and, often, contradictory constraints—whether physical, environmental, cultural, or aesthetic.“, Edward T H Liu, *The Shape of Sustainability by Building the Future*. Maßstäbe des nachhaltigen Bauens. Herausgeber: Hans Drexler, Adeline Seidel, Berlin, 2012

Das Bausystem wird im Rahmen des Entwurfs eines Modellvorhabens in Frankfurt am Main (vgl. dazu Absatz 6.2 Fallstudie 2 // dj228 Mehrfamilienhaus , Seite 147ff.) entwickelt, für den gerade die Planung vorliegt und der bis 2019 umgesetzt wird. Der klare Anwendungsbezug des Bausystems erlaubt, die theoretischen Überlegungen mit Erkenntnissen aus der Praxis zu validieren.

Neben den Anwendungsfällen werden verschiedene freie Entwurfsprojekte entwickelt, bei denen das System zur Anwendung kommen soll. Die zu erarbeitenden Entwürfe werden mit graphischen und numerischen Verfahren untereinander und mit konventionellen Gebäuden verglichen, um Aussagen zu den folgenden Aspekten zu erhalten:

- Flexibilität und Anpassungsfähigkeit auf verschiedenen zeitlichen Maßstäben (Tagesablauf, Jahresablauf, Lebenszyklus des Gebäudes)
- Einflussnahme der NutzerInnen auf die Architektur
- Effizienz, Suffizienz und Eignung für die Nutzung

FALLSTUDIE 1

DGJ219 ARRIVAL CITY 4.0





Allgemeine Projektbeschreibung Fallstudie 1

Das Projekt ist als eine Reaktion auf die sogenannte Flüchtlingskrise Ende 2015 entstanden. Mit dem Projekt sollte untersucht und aufgezeigt werden, welche räumlichen und sozialen Strukturen zu einer Integration beitragen können. Die Aufgabe war es, geeignete Unterkünfte für die Menschen zu denken und zu entwerfen, die ihnen nicht nur eine kurzfristige Unterkunft, sondern auch eine langfristige Perspektive bieten. Wohnen ist nicht nur eine Frage der 'Unterbringung' (Shelter), sondern ein Grundrecht, das eng verknüpft ist mit der Frage der sozialen Teilhabe an der Gesellschaft. Ein großer Teil der Menschen, die als Geflüchtete zu uns kommen, wird langfristig bleiben.

Was im Moment fehlt sind positive Visionen und Modelle, wie diese Integration geschehen kann. 'Arrival City 4.0' ist ein ausbaufähiges, wachsendes Konzept, das eine niedrig-investiven Lösungsansatz für die allgemeine Wohnungsnot darstellt. Mit einer minimalen Investition können in sehr kurzer Zeit einfache Unterkünfte gebaut werden. Anders als normale Notunterkünfte (Zelte, Container) öffnet 'Arrival City 4.0' Chancen, zeitnah in einem dauerhaften Gebäude konsolidiert zu werden, das einen wertvollen Teil der Stadt darstellt. In dem Konzept besteht für die BewohnerInnen die Möglichkeit, bei dem Aufbau ihres neuen Zuhauses mitzuhelfen. Das Bau-System besteht aus:

- Primärstruktur aus Holz (Balken und Stützen)
- Treppen-Kern (Aufzug kann nachgerüstet werden)
- Eine basale Gebäudehülle aus transluzenten Polycarbonat-Platten
- je einem Bad und einer Küche je Etage

Dieses Grundsystem kann mit einem Innenausbau, weiteren offenbaren Glas-Fenstern und Sanitäranlagen ergänzt werden. Der Ausbau, wie Innenwände und Möbel für die Wohnungen, entsteht nach einem Open-Source-Prinzip in einem Fab-Lab, das im Erdgeschoss des Gebäudes untergebracht ist. Das Projekt wird Teil des Wiki-Haus-Netzwerks²⁸, in dem Entwurfsmuster für Gebäude und Möbel gesammelt, ausgetauscht und zur Verfügung gestellt werden. Im Erdgeschoss ist eine einfache CNC-Fräsmaschine installiert, die auch von ungelerten Laien mit einem Minimum an Training genutzt werden kann, um Möbel, Innenwände oder andere Gebäudeteile herzustellen. Das Wiki-House-System bietet sogar eine Fräs- und Bauanleitung für die Herstellung einer CNC-Fräsmaschine, so dass sich das ganze System nach der Installation des ersten 'Fab-Lab House' zu sehr geringeren Kosten selbst reproduzieren kann.

Das statische System der 'Fab-Lab-Houses' ist einfach und modular aufgebaut. Je nach den örtlichen verfügbaren Ressourcen können die Stützen und Balken aus Massivholz (KVH) hergestellt werden (Querschnitt 200 mm / 200 mm) oder durch die Schichtung von Sperrholz oder OSB-Platten (8 Schichten von 25 mm Dicke) zusammengesetzt werden. Vorteil der kleinteiligen Ausführung ist, dass sie auf der CNC-Fräsmaschine in der eigenen Werkstatt des Fab-Labs hergestellt werden kann. Ein Großteil der Elemente sind handhabbar (bis ca. 3,6m) und können von zwei Personen ohne Hebezeug montiert werden. Alle stabförmigen Tragelemente - Stützen und Balken - haben dieselbe Größe und Dimension. Daher können sie kostengünstig in großen Stückzahlen (Massenfertigung, economy of scale) hergestellt werden. In der initialen Entwurfskonzeption werden sie durch Stahlverbinder und Muttern verbunden und können auch durch ungelernete Arbeiter und freiwillige Helfer schnell montiert werden. Dieser Ansatz lässt sich auch auf eine Ausführung mit reinen Holzverbindern übertragen.

Je nach Brandschutz-Anforderungen kann der Treppen Kern in der Standard-Ausführung als feuerbeständiges Holzelement ausgeführt werden oder bei erhöhten Anforderungen und mehr als fünf Wohngeschossen als Betonkern, der auch vorgefertigt ist und in die Holzkonstruktion eingestellt wird. Der Treppen Kern bildet auch die horizontale Aussteifung des Gebäudes. Weitere Querverstrebung kann in Abhängigkeit von der Höhe und Größe der Struktur durch aussteifende Wandelemente erreicht werden.

Der wichtigste Vorteil des Systems ist, dass eine komplette Gebäude- und Tragwerksplanung für das System nur für den ersten Anwendungsfall durchgeführt werden muss. In den weiteren Anwendungen kann die so erarbeitete Typenplanung und -statik mit minimalem Aufwand angepasst werden. So ist eine Reihe von Parametern definiert, innerhalb derer das System ohne weitere Berechnung und Nachweise eingesetzt werden kann: Maximale Höhe 6 Geschosse, maximale Länge von 57m und 15,2m Tiefe des Gebäudes bei einem Treppen Kern und ohne Brandabschnitte. Mit dem Gebäude wird ein einfaches mehrsprachiges und bebildertes Handbuch für das System übergeben, das die technischen Details definiert und die Montage des Gebäudes erklärt.

Im ersten Bauabschnitt wird das Gebäude mit einem kostengünstigen, aber effiziente Polycarbonat-Hülle ausgestattet. Dieser mehrschichtige lichtdurchlässige Kunststoff kann leicht mit einer Tischkreissäge oder eine Handkreissäge auf Maß geschnitten werden. Die Fassadenplatten sind unter Verwendung von Aluminium-Montageschienen sehr einfach zu montieren. Da die Platten leicht und handhabbar sind (380cm x 90cm), können sie ohne Hebezeug von zwei Personen eingesetzt werden.

Die erste Polycarbonat-Hülle macht das Gebäude wasserdicht, schützt vor Wind und Wetter und bietet für ein einschichtiges Bauteil eine vergleichsweise gute Isolierung. Gleichzeitig ermöglicht sie auch die natürliche Belichtung des Innenraums. Der größte Vorteil ist jedoch, dass die Hülle später leicht angepasst, weitergebaut und verbessert werden kann. Die Bewohner können weitere Fenster in die Hülle einsetzen, durch Ausschneiden und Einfügen von Glas-Fenstern und Öffnungsflügeln. Um den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz zu verbessern, können in einigen Teilen des Gebäudes auf der Innenseite der Polycarbonat-Hülle isolierte Wandpaneele eingesetzt werden. Dies erhöht den thermischen Komfort und verringert die Heizkosten.

In darauffolgenden Bauphasen wird die minimale Grundausstattung sukzessive ertüchtigt, um Anforderungen an Wärmeschutz und Schallschutz sowie den allgemeinen Wohnkomfort zu erfüllen. Ziel ist es, innerhalb etwa eines Jahres ein vollwertiges, dauerhaft nutzbares Wohngebäude zu errichten.

Planstand und Datengrundlage für Fallstudie 1

Die Grundlage der Eingaben und des Tools ist ein Wettbewerbsbeitrag für den finnischen Pavillon bei der Architekturbiennale 2016. Das Projekt befindet sich in einem Konzeptstadium, weshalb ausführliche Planungen oder Vorbe-messungen noch nicht vorliegen. So entspricht der Planstand am ehesten der Planungsphase, in dem das Analysetool zur Anwendungen kommen soll.

Vergleich Rechentool und Planstand/Entwurf Fallstudie 1

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung der Fallstudie mit den Rechentool und dem Planstand verglichen:

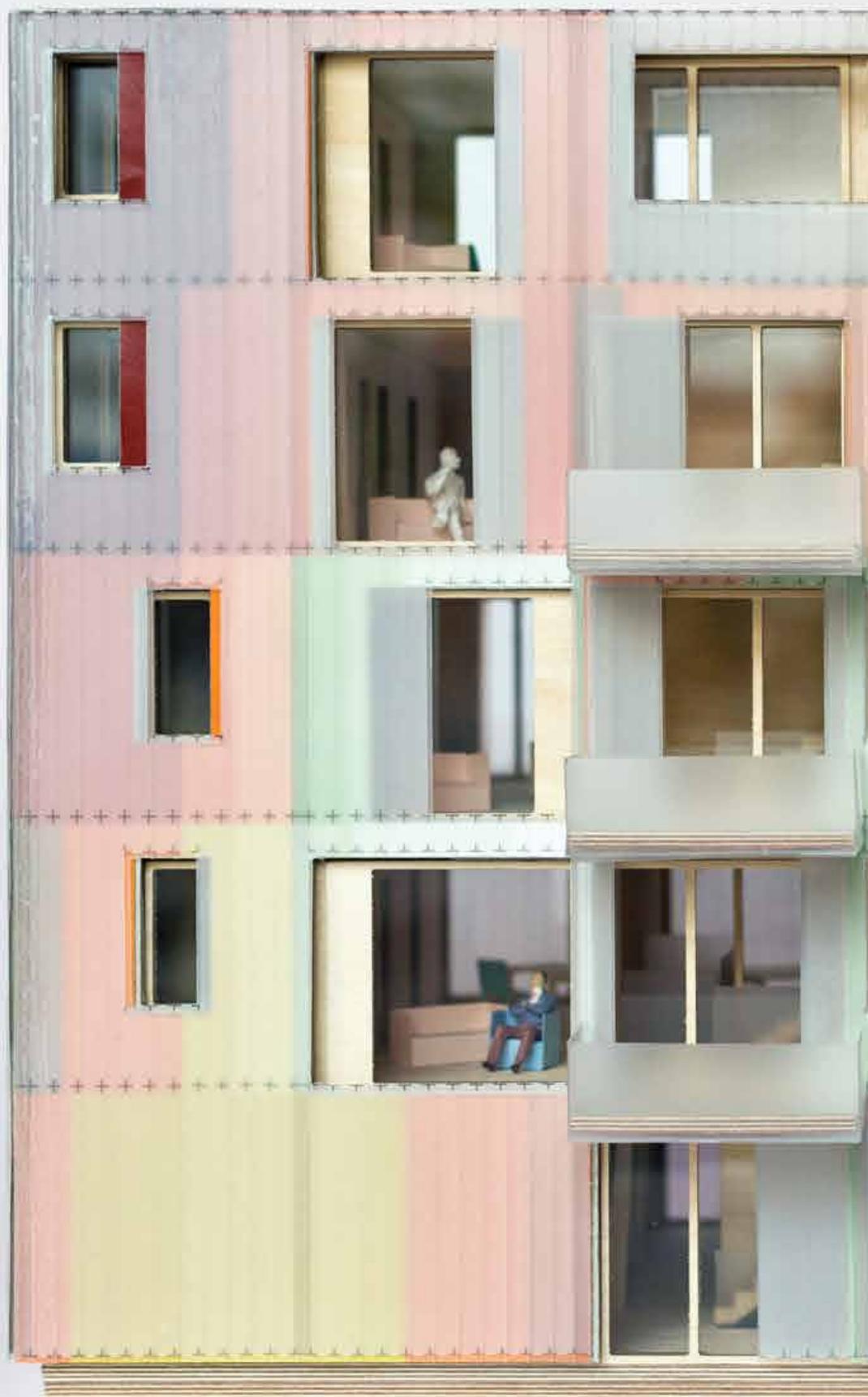
	Rechenmodell	Planung	Abweichung
Gebäudehülle in m²	1971,00	1884,83	4,37%
Gebäudevolumen in m³	5580,00	5234,74	6,19%
A/V-Verhältnis	0,35	0,36	-1,94%
Rastermaß in m	4,00	3,80	5,00%
Gebäudelänge x in m	24,00	23,25	3,13%
Gebäudelänge y in m	12,00	11,85	1,25%
Geschosse	5	5,00	0,00%
BGF in m²	1440,0	1377,56	4,34%
Tragwerk			
Decke			
l in m	4,00	3,80	5,00%
h in mm	160	160,00	0,00%
Bauteilvolumen in m³	2,56	2,31	9,75%
Anzahl	90	85	5,56%
Gesamtvolumen in m³	230,40	196,38	14,76%
Unterzüge			
l in m	4,00	3,80	5,00%
b in mm	240,00	320,00	0,00%
h in mm	360,00	360,00	0,00%
Bauteilvolumen in m³	0,35	0,44	5,00%
Anzahl	105	105	0,00%
Gesamtvolumen in m³	36,29	45,96	5,00%
Stützen			
l in m	3,90	3,60	7,69%
b in mm	320,00	320,00	0,00%
h in mm	320,00	320,00	0,00%
Bauteilvolumen m³	0,40	0,37	7,69%
Anzahl	140	140	0,00%
Gesamtvolumen m³	55,91	51,61	7,69%
Wände			
Gesamtvolumen in m³	50,38	98,18	-94,90%
Holzvolumen gesamt m³	372,97	392,14	-2,06%
Holzvolumen/BGF	0,259	0,285	-6,68%
KGF in m²	244,80	90,34	63,10%
WLF in m²	1195,20	1287,22	-7,70%
Holzvolumen/WLF	0,331	0,305	5,24%

Betrachtung der Ergebnisse von Fallstudie 1

- Für die Eingabe der Parameter wird im Gegensatz zur differenzierten Kubatur des Entwurfs ein vereinfachtes Volumen angenommen, bei dem die Artikulation der oberen Geschosse vernachlässigt wurde. Das Gebäude wurde mit 5 Vollgeschossen eingegeben.
- Das Rastermaß wird auf den im Tool vorgegebenen Wert von 4,00 m aufgerundet.
- Da die Außenmaße des Entwurfs und somit die Bruttogeschossfläche annähernd an das volle Rastermaß des im Tool angegebenen Rasters heranreicht, werden diese in der Eingabe auch aufgerundet (i.d.R. sollte von der tatsächlichen Grundfläche ausgegangen werden).
- Da keine Vorbemessung der Bauteile vorliegt, wurden für die Vergleichswerte der Bauteilquerschnitte die Berechnungen des Tools übernommen.
- Zur Berechnung des Wandvolumens zur Aussteifung geht das Tool nur von den ausgewählten Erschließungskernen aus; die Anzahl der Wandelemente im Entwurf liegt meist höher.

FALLSTUDIE 2

DGJ228 MEHRFAMILIENHAUS





Allgemeine Projektbeschreibung Fallstudie 2

Das Projekt entstand als eine Bewerbung um ein innerstädtisches Grundstück, das von der Stadt Frankfurt in einem Konzeptverfahren an die Gruppe mit der vielversprechendsten Gesamtkonzeption für erschwinglichen Wohnraum vergeben wurde. Der Ansatz zur Senkung der Wohnkosten ist, Wohnfläche pro Person zu reduzieren, ohne dabei die Wohnqualität zu mindern. Bei der Schaffung von Wohnraum geht es nicht um abstrakte Zahlen, sondern darum, die Lebenswirklichkeit der BewohnerInnen zu gestalten. Der Entwurf 'Gemeinsam Suffizient Wohnen' bietet kleinere Wohnungen mit einem höheren Wohnkomfort. Die Diskussion um erschwinglichen Wohnraum und nachhaltiges Bauen hat sich in den letzten Jahren auf das Thema Effizienz konzentriert. Die durch Effizienz-Gewinne erreichten Einsparungen für den Bau und Betrieb für Wohnraum werden aber durch die steigende Nachfrage von Wohnfläche pro Person überkompensiert. Deshalb müssen Wachstum und Lebensstandard von Ressourcenverbräuchen entkoppelt und qualitatives durch quantitatives Wachstum ersetzt werden. Die kleinen Wohnungen müssen besonders sorgfältig geplant und gestaltet werden. Dies reduziert auch den Ressourcen- und Materialverbrauch in der Herstellung des Gebäudes. Die geringen Flächen werden durch hohe räumliche Qualitäten kompensiert. Kleine Wohnungen profitieren in besonderer Weise von großzügigen Ausblicken in die Stadt, die BewohnerInnen ermöglichen, den Außenraum und die Stadt optisch mit zu bewohnen. Durch zahlreiche Einbaumöbel, ausreichende Stauräume im Keller und die Reduktion der Verkehrsflächen wird eine Nutzbarkeit der Wohnungen gewährleistet.

Der Entwurf folgt dem Grundsatz, dass Nachhaltige Gebäude flexibel und anpassungsfähig geplant werden müssen, um langfristig genutzt und von den BewohnerInnen geschätzt zu werden. Die Lebensumstände und Familienverhältnisse der BewohnerInnen ändern sich. Ein Gebäude muss darauf reagieren können und sich den Bedürfnissen der BewohnerInnen anpassen können. Das Bausystem ermöglicht, dass die Innenwände unabhängig von der Statik ein- und ausgebaut werden können. Die Wohnungen können in viele kleine Zimmer aufgeteilt oder zu einem großzügigen Raumkontinuum umgewandelt werden. So können verschiedene Aufteilungen und Wohnungen für die einzelnen Geschosse realisiert werden: vom kleinen Zwei-Zimmer-Studio bis hin zu einer Fünf-Zimmer-Familienwohnung.

Planstand und Datengrundlage für Fallstudie 2

Für das Projekt liegt eine Bauantragsplanung und eine komplette Statik vor. Die statische Bemessung dient als Grundlage der Vergleichswerte. Zur überschlüssigen Berechnung werden allerdings nur einzelne Bauteilpositionen berücksichtigt.

Vergleich Rechentool mit Planstand/Entwurf Fallstudie 2

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung der Fallstudie mit den Rechentool und dem Planstand verglichen:

	Rechenmodell	Planung	Abweichung
Gebäudehülle in m²	1105,65	1296,54	-17,26%
Gebäudevolumen in m³	2344,95	2727,44	-16,31%
A/V-Verhältnis	0,47	0,48	-0,82%
Rastermaß in m	3,00	3,105	-3,50%
Gebäudelänge x in m	18,00	19,08	-6,00%
Gebäudelänge y in m	9,00	9,75	-8,33%
Geschosse	5,00	5,00	0,00%
BGF in m²	810,00	889,13	-9,77%
Tragwerk			
Decke			
l in m	3,00	3,105	-3,50%
h in mm	120,00	120,00	0,00%
Bauteilvolumen in m³	1,08	1,14	-5,22%
Anzahl	90	77	14,44%
Gesamtvolumen in m³	97,20	87,51	9,97%
Unterzüge			
l in m	3,00	3,05	-1,67%
b in mm	240,00	240,00	0,00%
h in mm	240,00	280,00	-16,67%
Bauteilvolumen in m³	0,17	0,20	-18,61%
Anzahl	105	63	40,00%
Gesamtvolumen in m³	18,14	12,91	28,83%
Stützen			
l in m	2,90	3,05	-5,17%
b in mm	240,00	240,00	0,00%
h in mm	240,00	240,00	0,00%
Bauteilvolumen m³	0,17	0,18	-5,17%
Anzahl	140	79	43,57%
Gesamtvolumen m³	23,39	13,88	40,65%
Wände			
Gesamtvolumen in m³	48,06	59,40	-23,60%
Holzvolumen gesamt m³	186,79	173,70	7,01%
Holzvolumen/BGF	0,231	0,195	15,28%
KGF in m²	137,70	55,56	59,65%
WLF in m²	672,30	833,57	-23,99%
Holzvolumen/WLF	0,278	0,208	25,00%

Betrachtung der Ergebnisse von Fallstudie 2

- In der Eingabe kann das Staffelgeschoss aus der Planung nicht berücksichtigt werden und es wird von fünf Vollgeschossen ausgegangen; in der Vergleichsberechnung wird das Staffelgeschoss einbezogen
- Da das Tool Überlagerungen von Wänden, Stützen und Unterzügen zulässt kommt es zu Abweichungen in der Anzahl der Bauteile und somit im Volumen

FALLSTUDIE 3

DGJ223 STUDIERENDENWOHNHEIM





Allgemeine Projektbeschreibung Fallstudie 3

In der konventionellen Vorstellung von Gebäuden informieren die räumlichen Strukturen einseitig über die Wohnverhältnisse und das Verhalten der BewohnerInnen. Tatsächlich reagieren die Gebäude auch auf die Anforderungen der NutzerInnen, indem sie kontinuierlich an deren veränderten Lebensgewohnheiten angepasst werden. Dies untersuchte Stewart Brand in 'How Buildings Learn: What Happens After They're Built'.²⁹

Denkt man diesen Aspekt von Architektur weiter, so müssten die Gebäude darauf hin geplant werden, von den NutzerInnen zu lernen, um zum einen die Passung zwischen der Planung und dem Leben der Menschen zu verbessern und zum anderen auf sich verändernde Anforderungen im Laufe des langen Lebenszyklus eines Gebäude zu reagieren. Im Rahmen der IBA Heidelberg entwickelt DGJ Architektur für und mit dem ‚Collegium Academicum‘ eine solche interaktive Wohnform.

Für das Studentenwohnheim wurde eine Wohnform entwickelt, die auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Ebenen eine veränderliche Nutzung und Anpassung der Wohnungen ermöglicht. Die Skelettbauweise ermöglicht, dass Innenwände flexibel versetzt werden können. Die Grundform der Wohnung besteht aus einer Gemeinschaftsfläche in der Mitte, um die vier Individualräume und einzelne Minibäder angeordnet sind. Die Individualräume bestehen jeweils aus zwei Teilen mit je 7,3m² Fläche: eine räumlich geschlossene Kernzone und eine flexible Zone, die räumlich zunächst nicht vom Gemeinschaftsbereich der Wohnung abgetrennt ist. Die Kernzone kann ein Bett, einen Schrank und einen kleinen Schreibtisch und damit alle wesentlichen Funktionen des Individualbereichs aufnehmen. Die flexible Zone kann, nach den individuellen Wünschen und Lebensgewohnheiten des einzelnen Bewohners, entweder komplett offen verbleiben, durch Raumteiler (Tisch, Regal) teilweise abgetrennt werden oder auch, durch das Versetzen der Wand der Kernzone oder den Einsatz einer zweiten Wand, komplett separat genutzt werden. Die Konstruktion ermöglicht es, dass die Innenwände im Selbstbau mit einfachen Mitteln hergestellt und versetzt werden können. So wird das Gebäude zu einem Labor, in dem die einzelnen Bewohner und Wohngemeinschaften den Raumbedarf, die Nutzung und die räumliche Konfiguration der Wohnung zwischen Individual- und Gemeinschaftsflächen rekonfigurieren und verhandeln können. Dazu sind die flexiblen Zwischenwände mit einfachen Möbelverbindern (drehbaren Exzenter-Verbinder) verbunden, die innerhalb von wenigen Minuten versetzt werden können. Durch eingelegte Gummidichtungen kann eine hohe Luft- und Schalldichtheit erreicht werden.

Die Wohnungen sind alle als Seniorenwohnungen nutzbar. Die Individualräume werden in dieser Nutzung in den meisten Fällen 15,2 m² Flächen haben

und die Gemeinschaftsfläche wird durch den Abzug der flexiblen Zonen geringer ausfallen. Durch die flexible Schaltbarkeit der 4er-WGs zu größeren Wohneinheiten lassen sich auch andere Wohnformen wie Groß-WGs oder betreutes Wohnen mit geringem Aufwand realisieren.

Moderne Wohnheime sollten unterschiedliche Lebensmodelle ermöglichen und befördern. Auch das Studieren mit Kind für Alleinstehende und junge Familien ist im gemeinschaftlichen Wohnen (z.B. junges Paar mit Baby und zwei Mitbewohnern oder junges Paar mit Kleinkind und einem Mitbewohner) möglich. Der Vorteil der variablen Größe der abgetrennten Individualbereiche besteht darin, dass Zimmer von 15,2 m² gebildet werden können (Schlafzimmer) und kleinere Zimmer, die als Einzelzimmer oder Kinderzimmer dienen können. Gerade die Möglichkeit, auch mehrere WGs zusammenzuschalten und die Zimmergröße mit minimalem Aufwand zu verändern, eröffnet die Chance, auch unkonventionelle Wohnformen zu realisieren, wie eine Kombination aus Familien-Wohnen und Seniorenwohnen innerhalb einer Groß-WG.

Ziel des Entwurfs der Baukonstruktion und des Tragwerks ist es, dass die Studierenden durch Selbstbau an dem Bau des Gebäudes beteiligt werden. Dies wird erreicht, indem nur folgende Anteile der Baukonstruktion, die für Tragwerk, Brandschutz, Wärmeschutz und Feuchteschutz relevant sind, von qualifizierten Handwerkern hergestellt werden:

- Rohbau / Tragwerk
- Gebäude / Fassade / Dach
- Brandschutzrelevante Bauteile (Verkleidungen, Türen, Fluchtwege)
- Haustechnik

Der Ausbau der Wohnungen und die Herstellung der Möbel kann durch die Studierenden und Freiwilligen im Selbstbau hergestellt werden.

Planstand und Datengrundlage für Fallstudie 3

Das Projekt befindet sich in der Ausführungsplanung. Die Grundlage der Vergleichswerte beruht dementsprechend auf ausführlichen statischen Bemessungen. Zur Vereinfachung der überschlägigen Berechnung werden allerdings nur einzelne Bauteilpositionen berücksichtigt.

Vergleich Rechentool und Planstand/Entwurf Fallstudie 3

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung der Fallstudie mit dem Rechentool und dem Planstand verglichen:

	Rechenmodell	Planung	Abweichung
Gebäudehülle in m²	4116,08	4492,04	-9,13%
Gebäudevolumen in m³	10897,15	12708,49	-16,62%
A/V-Verhältnis	0,38	0,35	6,42%
Rastermaß in m	2,85	2,85	0,00%
Gebäudelänge x in m	85,50	86,70	-1,40%
Gebäudelänge y in m	11,40	12,00	-5,26%
Geschosse	4,00	4,00	0,00%
BGF in m²	3898,80	4161,60	-6,74%
Tragwerk			
Decke			
l in m	2,85	2,85	0,00%
h in mm	120,00	120,00	0,00%
Bauteilvolumen in m³	0,97	0,97	0,00%
Anzahl	480	480	0,00%
Gesamtvolumen in m³	467,86	467,86	0,00%
Unterzüge			
l in m	2,85	2,85	0,00%
b in mm	240,00	200,00	16,67%
h in mm	240,00	280,00	-16,67%
Bauteilvolumen in m³	0,16	0,16	2,78%
Anzahl	496	496	0,00%
Gesamtvolumen in m³	81,42	79,16	2,78%
Stützen			
l in m	2,80	2,50	16,67%
b in mm	240,00	200,00	16,67%
h in mm	240,00	200,00	16,67%
Bauteilvolumen m³	0,16	0,10	38,00%
Anzahl	620	620	0,00%
Gesamtvolumen m³	99,99	62,00	38,00%
Wände			
Gesamtvolumen in m³	153,92	273,60	-88,25%
Holzvolumen gesamt m³	810,34	882,62	-11,08%
Holzvolumen/BGF	0,208	0,212	-4,06%
KGF in m²	608,76	303,80	50,10%
WLF in m²	3290,04	3857,80	-17,26%
Holzvolumen/WLF	0,242	0,229	5,27%

Betrachtung der Ergebnisse von Fallstudie 3

- Es wird nur der L-förmige Abschnitt des Projekts betrachtet
- Um die Anwendung des Tools zu ermöglichen, werden die Gebäudeflügel als ein rechteckiger Körper aneinandergereiht.
- Da das Raster in der Planung und im Tool übereinstimmen kommt es teilweise bereits zu annähernd oder sogar komplett gleichen Werten. Dies liegt allerdings auch an der vereinfachten Überschlagsberechnung der Vergleichswerte.
- Da das Gebäude keine inneren Erschließungskerne besitzt, werden im Tool anstelle der geplanten Sanitäreinheiten fünf Kerne angenommen. Dadurch kommt es zu größeren Abweichungen der Ergebnisse.

FALLSTUDIE 4

DGJ236 STUDIERENDENWOHNHAUS

WEIMAR





Allgemeine Projektbeschreibung Fallstudie 4

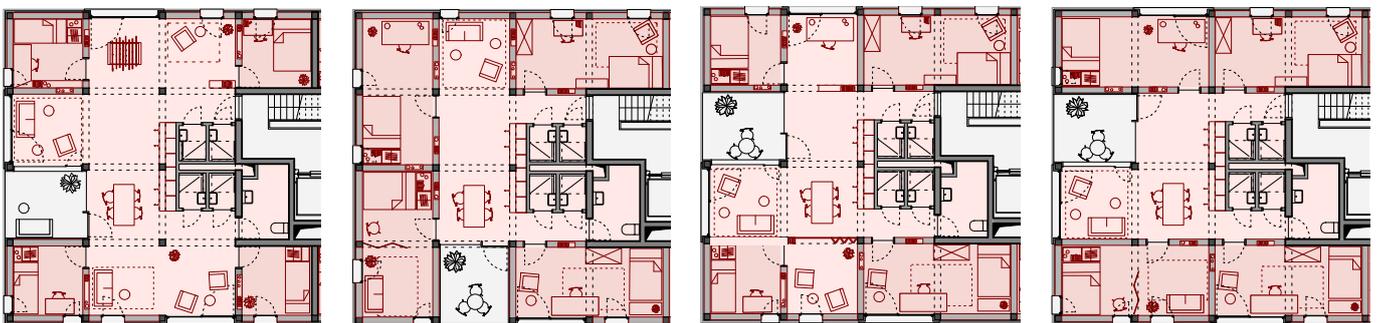
In dem Wettbewerbsbeitrag für die IBA Thüringen wurde das Bausystem für eine Gebäude mit acht Geschossen weiterentwickelt.

Ziel der Weiterentwicklung war die Maximierung des Vorfertigungs- und Automatisierungsgrades. Die Vorfertigung und Standardisierung wird auf alle Gewerke, insbesondere die Technik- und nachfolgenden Ausbaugewerke übertragen, um diese als ein Gesamtsystem zu planen und zu fertigen. Die Erhöhung des Integrationsgrades der Gebäudetechnik in die Präfabrikation ist auch die wesentliche Voraussetzung für die Erhöhung des gesamten Vorfertigungsgrads eines Bausystems. Das Bausystem wurde für diese Anwendung als modulares Bau-System (3D Raummodule) entworfen, in das die gesamte Gebäudetechnik inklusive der erforderlichen Leitungsführung integriert ist. Die vertikalen Leitungen werden in einem Leitungsregister zusammengefasst, das in dem Kern geführt wird. Die horizontalen Leitungen für die Küchen und die Bäder sind an der Rückwand der Sanitärmodule eingebaut und können betriebsbereit angeliefert werden. Dadurch wird eine Maximierung des Vorfertigungsgrads erreicht. Die Sanitärbereiche werden als komplett ausgestattete Module angeliefert, in denen schon Oberflächen und Objekte funktionsbereit eingebaut sind. Insgesamt kann ein hoher Vorfertigungsgrad erreicht werden, indem die Fassade komplett vorgefertigt und nur die Kaltfassade (Beton-Fertigteile) auf der Baustelle montiert wird.

Dabei wurde vor allem an der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Grundrisse gearbeitet, die eine Reihe von Anpassungen zulassen:

Abbildung 93: (vorherige Seite)
Fallstudie 4 // DGJ236: WBS2017
- IBA Thüringen, Modellfoto,
DGJ Architektur

Abbildung 94:
Case Study 2: WBS2017 - IBA
Thüringen, DGJ Architektur, Grund-
riss Varianten mit verschiedenen
Nutzerbauten (von links nach
rechts): Grundriss mit minimalen
Individualbereichen und maximalen
Gemeinschaftsbereich; Grundriss
mit halboffenen flexiblen Zonen;
Grundriss mit minimalen Gemein-
schaftsbereichen und maximalen
Individual-Zimmern; Grundriss mit
rollstuhlgerechtem Ausbau (unten
rechts).



Planstand und Datengrundlage für Fallstudie 4

Grundlage für die Vergleichswerte ist die Wettbewerbsplanung. Im Zuge der Bearbeitung des Wettbewerbs wurden bereits Teile des Tragwerks vordimensioniert (Bollinger und Grohmann Ingenieure, Frankfurt). Daher wurden Werte aus dem vergleichbaren Projekt des Fallbeispiels 2 verwendet.

Vergleich Rechentool und Planstand/Entwurf Fallstudie 4

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Rechentool mit dem Planstand verglichen:

	Rechenmodell	Planung	Abweichung
Gebäudehülle in m²	2095,56	2163,96	-3,26%
Gebäudevolumen in m³	6078,24	6389,28	-5,12%
A/V-Verhältnis	0,34	0,34	1,76%
Rastermaß in m	3,00	2,94	2,00%
Gebäudelänge x in m	24,00	24,00	0,00%
Gebäudelänge y in m	12,00	12,24	-2,00%
Geschosse	7,00	7,00	0,00%
BGF in m²	2016,00	2056,32	-2,00%
Tragwerk			
Decke			
l in m	3,00	2,94	2,00%
h in mm	140,00	120,00	14,29%
Bauteilvolumen in m³	1,26	1,04	17,68%
Anzahl	224	212	5,36%
Gesamtvolumen in m³	282,24	219,89	22,09%
Unterzüge			
l in m	3,00	2,94	2,00%
b in mm	240,00	240,00	0,00%
h in mm	280,00	280,00	0,00%
Bauteilvolumen in m³	0,20	0,20	2,00%
Anzahl	252	252	0,00%
Gesamtvolumen in m³	50,80	49,79	2,00%
Stützen			
l in m	3,010	3,00	3,23%
b in mm	320,00	240,00	25,00%
h in mm	320,00	240,00	25,00%
Bauteilvolumen m³	0,32	0,17	45,56%
Anzahl	315	237	24,76%
Gesamtvolumen m³	99,99	40,95	59,04%
Wände			
Gesamtvolumen in m³	84,08	68,49	18,54%
Holz			
Holzvolumen gesamt m³	517,12	379,12	26,69%
Holzvolumen/BGF	0,257	0,184	28,12%
KGF in m²	423,36	88,86	79,01%
WLF in m²	1592,64	1967,46	-23,53%
Holzvolumen/WLF	0,325	0,193	40,65%

Betrachtung der Ergebnisse von Fallstudie 4

- Das Rastermaß wurde von 2,94m auf 3,00m aufgerundet. Durch ein Abrunden auf die niedrigere Eingabe von 2,85m können sich die Ergebnisse den Vergleichswerten (z.B. Querschnitte) annähern, an anderer Stelle (z.B. Bauteilanzahl) wiederum abweichen
- Die Höhe wurde in der Eingabe mit 7 Geschossen angenommen, da dies der höchste im Tool mögliche Wert ist und noch unter der Hochhausgrenze liegt. Um die Abweichung der Vergleichswerte geringer zu halten wurde das 8. Geschoss aus den Entwurfsplänen nicht einbezogen.
- Durch die Geschosshöhe liegt das Gebäude in Gebäudeklasse 5 und es werden teils sehr große Querschnitte berechnet. Durch die Annahmen auf Grundlage der Fallstudie 2 entstehen größere Abweichungen.

FALLSTUDIE 5

DGJ244 GREENHOUSE





Allgemeine Projektbeschreibung Fallstudie 5

Greenhouse ist als freie Studienarbeit bei DGJ Architektur GmbH entstanden, um die räumlichen Möglichkeiten des Bausystem in Hinblick auf neue flexible Wohnformen zu erforschen. Die räumliche Grundidee ist die eines bewohnbaren Gewächshauses. So wird zunächst durch die Gebäudehülle ein offener, weiter Raum gebildet, der nach außen durch Glas und Polycarbonat klimatisch gefasst ist. Innerhalb des Raums bildet das Bausystem eine terrassenartige mehrgeschossige Struktur, die sich um einen begrünten Atrium bewegt. Auch die als Plattformen gedachten Geschossflächen bilden zunächst nur horizontale Ebenen und keine geschlossenen Räume.

Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Fallstudien entstehen Räume im ‚Greenhouse‘ durch eingestellte Boxen, die nicht direkt mit der Struktur verbunden sind, sondern mit Rollen auf den Decken platziert werden. Die Boxen sind kleiner als die Struktur, so dass sie innerhalb der Struktur bewegt werden können. Die Anzahl und die Position der Boxen kann durch die BewohnerInnen angepasst und verändert werden.

Die Boxen bilden die privaten oder individuellen Wohnräume (Zimmer). Der restliche Raum wird geteilt und gemeinschaftlich genutzt.

Greenhouse ist nicht als Bauprojekt, sondern als eine theoretische Untersuchung zu neuen Wohnformen zu verstehen. So können die Anforderungen an Brandschutz, Schallschutz und Wärmeschutz mit dem jetzigen Entwurf nicht nachgewiesen werden.

Planstand und Datengrundlage für Fallstudie 5

Die Vergleichswerte basieren auf Plänen im Konzeptstadium ohne weitergehende Bemessung der Bauteile. Um zu große Abweichungen zu vermeiden, wurden bei den Bauteildimensionen die Werte aus dem Rechentool übernommen.

Abbildung 95: (vorherige Seite)
Fallstudie 4 // DGJ244: Greenhouse, Modellfoto,
DGJ Architektur

Abbildung 96:
Raumstudien zu eingestellten
Boxen, Maßstab 1/20, DGJ Architektur, Foto Hans Drexler, 2016.



Vergleich Rechentool und Planstand/Entwurf Fallstudie 5

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung der Fallstudie mit dem Rechentool und dem Planstand verglichen:

	Rechenmodell	Planung	Abweichung
Gebäudehülle in m²	4628,16	4799,34	-3,70%
Gebäudevolumen in m³	18593,28	19981,84	-7,47%
A/V-Verhältnis	0,25	0,24	3,51%
Rastermaß in m	4,00	4,00	0,00%
Gebäudelänge x in m	48,00	48,40	-0,83%
Gebäudelänge y in m	24,00	24,20	-0,83%
Geschosse	4,00	4,00	0,00%
BGF in m²	4608,00	3949,12	14,30%
Tragwerk			
Decke			
l in m	4,00	4,00	0,00%
h in mm	160,00	160,00	0,00%
Bauteilvolumen in m³	2,56	2,02	21,09%
Anzahl	288	242	15,97%
Gesamtvolumen in m³	737,28	488,84	33,70%
Unterzüge			
l in m	4,00	4,00	0,00%
b in mm	240,00	240,00	0,00%
h in mm	400,00	400,00	0,00%
Bauteilvolumen in m³	0,38	0,38	22,22%
Anzahl	312	289	7,37%
Gesamtvolumen in m³	119,81	110,98	7,37%
Stützen			
l in m	4,10	3,60	12,20%
b in mm	280,00	280,00	0,00%
h in mm	280,00	280,00	0,00%
Bauteilvolumen m³	0,32	0,28	12,20%
Anzahl	364	356	2,20%
Gesamtvolumen m³	117,00	30,60	14,12%
Wände			
Gesamtvolumen in m³	83,93	k.A.	
Holzvolumen gesamt m³	1058,02	623,01	33,81%
Holzvolumen/BGF	0,230	0,158	22,77%
KGF in m²	584,64	k.A.	
WLF in m²	4023,36	k.A.	
Holzvolumen/WLF	0,263	k.A.	

Betrachtung der Ergebnisse von Fallstudie 5

- Da der Entwurf im Gebäudeinneren mehrere Leerräume vorsieht, die nicht im Tool berücksichtigt werden können, kommt es zu Abweichungen von Grundwerten wie BGF und Bauteilanzahlen.
- Der Konzeptentwurf trifft keine Aussagen über aussteifende Wände bzw. Erschließungskerne. Es wird von einer Aussteifung durch Zugdiagonalen ausgegangen, die nicht im Tool berücksichtigt werden können. Allerdings muss eine Eingabe im Tool angegeben werden. Die Vergleichswerte zum Volumen der Bauteile sind daher unvollständig.

AUSWERTUNG

SYSTEM UND FALLSTUDIEN

QUERAUSWERTUNG FALLSTUDIEN

Im Folgenden werden die Ergebnisse der fünf Fallstudien untereinander verglichen.

Vergleich - Effizienz der Tragwerke

Um die Effizienz der Tragwerke zu vergleichen, kann man die Holzmenge/ Bruttogeschossfläche (BGF) heranziehen. Die Berechnungen zeigt, dass das Bausystem von $0,24\text{m}^3/\text{m}^2$ (Fallstudie 3) bis $0,32\text{m}^3/\text{m}^2$ (Fallstudie 4) Holz pro Bruttogeschossfläche anzusetzen wären. Diese Auswertung bezieht sich auf das Rechentool.

Abbildung 97:
Querauswertung Holzmenge pro BGF, Vergleich der 5 Fallstudien, DGJ Architektur, 2019.

	CS 1 - Arrival City 4.0	CS 2 - GSW Friedberger Landstraße	CS 3 - IBA Heidelberg CA	CS 4 - Student Housing Weimar	CS 5 - Greenhouse
	Planungstool	Planungstool	Planungstool	Planungstool	Planungstool
Gebäudehülle	1971,00 m ²	1105,65 m ²	4116,08 m ²	2095,56 m ²	4628,16 m ²
Gebäudevolumen	5580,00 m ³	2344,95 m ³	10897,15 m ³	6078,24 m ³	18593,28 m ³
A/V	0,35	0,47	0,38	0,34	0,24
Raster x	4,00 m	3,00 m	2,85 m	3,00 m	4,00 m
Raster y	4,00 m	3,00 m	2,85 m	3,00 m	4,00 m
Gebäudelänge x	24,00 m	18,00 m	85,50 m	24,00 m	48,00 m
Gebäudelänge y	12,00 m	9,00 m	11,40 m	12,00 m	24,00 m
Geschosse	5	5	4	7	4
BGF	1440,00 m ²	810,00 m ²	3898,80 m ²	2016,00 m ²	4608,00 m ²
Tragwerk					
Decke					
Gesamtvolumen	230,40 m ³ /m ²	97,20 m ³ /m ²	467,86 m ³ /m ²	282,24 m ³ /m ²	737,28 m ³ /m ²
Unterzüge					
Gesamtvolumen	36,29 m ³ /m ²	18,14 m ³ /m ²	81,42 m ³ /m ²	50,80 m ³ /m ²	119,81 m ³ /m ²
Stützen					
Gesamtvolumen	55,91 m ³ /m ²	23,39 m ³ /m ²	99,99 m ³ /m ²	99,99 m ³ /m ²	117,00 m ³ /m ²
Aussteifung/Wände					
Gesamtvolumen	50,38 m ³ /m ²	48,06 m ³ /m ²	145,34 m ³ /m ²	84,08 m ³ /m ²	83,93 m ³ /m ²
Holzvolumen	372,97 m ³ /m ²	186,79 m ³ /m ²	794,61 m ³ /m ²	517,12 m ³ /m ²	1058,02 m ³ /m ²
Holzvolumen/BGF	0,26 m³/m²	0,23 m³/m²	0,20 m³/m²	0,26 m³/m²	0,23 m³/m²
KGf	244,80 m ²	137,70 m ²	608,76 m ²	423,36 m ²	584,64 m ²
WLF	1195,20 m ²	672,30 m ²	3290,04 m ²	1592,64 m ²	4023,36 m ²
Holzvolumen/WLF	0,31 m³/m²	0,28 m³/m²	0,24 m³/m²	0,32 m³/m²	0,26 m³/m²

VERGLEICH - GENAUIGKEIT DES RECHENTOOLS

Durch einen Vergleich zwischen den vorliegenden Planungen und der Ergebnissen des Rechentools lässt sich eine erste Abschätzung zu der Genauigkeit des Rechentools treffen. Da die Planungstiefe in den Fallstudien unterschiedlich ist, sind die Vergleichsdaten nur für die beiden Fälle (Fallstudie 2 und 3) auf einer vollständigen Berechnung des Gebäudes basierend.

Im Ergebnis sind die Abweichungen teilweise erheblich. Die Einzelwerte geben Hinweis darauf, dass die Abweichungen vor allem aus der Berechnung der Stützen entstehen, die im Rechentool mit wesentlich größeren Querschnitten angegeben werden als in den berechneten Fällen.

	CS 1 - Arrival City 4.0	CS 2 - GSW Friedberger Landstraße	CS 3 - IBA Heidelberg CA	CS 4 - Student Housing Weimar	CS 5 - Greenhouse
	Abweichung	Abweichung	Abweichung	Abweichung	Abweichung
Gebäudehülle	4,37%	-17,26%	-9,13%	-3,26%	-3,70%
Gebäudevolumen	6,19%	-16,31%	-16,62%	-5,12%	-7,47%
A/V	-1,94%	-0,82%	6,42%	1,76%	3,51%
Raster x	5,00%	-3,50%	0,00%	2,00%	0,00%
Raster y	5,00%	-1,67%	0,00%	2,00%	0,00%
Gebäuelänge x	3,13%	-6,00%	-1,40%	0,00%	-0,83%
Gebäuelänge y	1,25%	-8,33%	-5,26%	-2,00%	-0,83%
Geschosse	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
BGF	4,34%	-9,77%	-6,74%	-2,00%	14,30%
Tragwerk					
Decke					
Gesamtvolumen	14,76%	9,97%	0,00%	22,09%	33,70%
Unterzüge					
Gesamtvolumen	5,00%	28,83%	2,78%	2,00%	7,37%
Stützen					
Gesamtvolumen	7,69%	40,65%	38,00%	59,04%	14,12%
Aussteifung/Wände					
Gesamtvolumen	-94,90%	-23,60%	-88,25%	18,54%	k.A.
Holzvolumen	-2,06%	7,01%	-11,08%	26,69%	33,81%
Holzvolumen/BGF	-6,7%	15,3%	-4,1%	28,1%	22,77%
KGf	63,10%	59,65%	50,10%	79,01%	k.A.
WLF	-7,70%	-23,99%	-17,26%	-23,53%	k.A.
Holzvolumen/WLF	5,2%	25,0%	5,3%	40,7%	k.A.

Abbildung 98:
Querauswertung Genauigkeit
des Rechentools, Vergleich der 5
Fallstudien, DGJ Architektur, 2019.

Abbildung 99:
Querauswertung Rechentool, Ver-
gleich der 5 Fallstudien,
DGJ Architektur, 2019.

	Case Study					
	CS 1 - Arrival City 4.0			CS 2 - GSW Friedberger Landstraße		
	Planungstool	Planung/ Entwurf	Abweichung	Planungstool	Planung/ Entwurf	Abweichung
Gebäudehülle	1971,00 m ²	1884,83 m ²	4,37%	1105,65 m ²	1296,54 m ²	-17,26%
Gebäudevolumen	5580,00 m ³	5234,74 m ³	6,19%	2344,95 m ³	2727,44 m ³	-16,31%
A/V	0,35	0,36	-1,94%	0,47	0,48	-0,82%
Raster x	4,00 m	3,80 m	5,00%	3,00 m	3,11 m	-3,50%
Raster y	4,00 m	3,80 m	5,00%	3,00 m	3,05 m	-1,67%
Gebäuelänge x	24,00 m	23,25 m	3,13%	18,00 m	19,08 m	-6,00%
Gebäuelänge y	12,00 m	11,85 m	1,25%	9,00 m	9,75 m	-8,33%
Geschosse	5	5	0,00%	5	5	0,00%
BGF	1440,00 m ²	1377,56 m ²	4,34%	810,00 m ²	889,13 m ²	-9,77%
Tragwerk						
Decke						
l in m	4,00 m	3,80 m	5,00%	3,00 m	3,11 m	-3,50%
h in mm	160,00 mm	160,00 mm	0,00%	120,00 mm	120,00 mm	0,00%
Bauteilvolumen m ³	2,56 m ³	2,31 m ³	9,75%	1,08 m ³	1,14 m ³	-5,22%
Anzahl	90 Stk.	85 Stk.	5,56%	90 Stk.	77 Stk.	14,44%
Gesamtvolumen	230,40 m ³	196,38 m ³	14,76%	97,20 m ³	87,51 m ³	9,97%
Unterzüge						
l in m	4,00 m	3,80 m	5,00%	3,00 m	3,05 m	-1,67%
b in mm	240,00 mm	240,00 mm	0,00%	240,00 mm	240,00 mm	0,00%
h in mm	360,00 mm	360,00 mm	0,00%	240,00 mm	280,00 mm	-16,67%
Bauteilvolumen m ³	0,35 m ³	0,33 m ³	5,00%	0,17 m ³	0,20 m ³	-18,61%
Anzahl	105 Stk.	105 Stk.	0,00%	105 Stk.	63 Stk.	40,00%
Gesamtvolumen	36,29 m ³	34,47 m ³	5,00%	18,14 m ³	12,91 m ³	28,83%
Stützen						
l in m	3,90 m	3,60 m	7,69%	2,90 m	3,05 m	-5,17%
b in mm	320,00 mm	320,00 mm	0,00%	240,00 mm	240,00 mm	0,00%
h in mm	320,00 mm	320,00 mm	0,00%	240,00 mm	240,00 mm	0,00%
Bauteilvolumen m ³	0,40 m ³	0,37 m ³	7,69%	0,17 m ³	0,18 m ³	-5,17%
Anzahl	140 Stk.	140 Stk.	0,00%	140 Stk.	79 Stk.	43,57%
Gesamtvolumen	55,91 m ³	51,61 m ³	7,69%	23,39 m ³	13,88 m ³	40,65%
Aussteifung/Wände						
Gesamtvolumen	50,38 m ³	98,18 m ³	-94,90%	48,06 m ³	59,40 m ³	-23,60%
Holzvolumen	372,97 m ³	380,65 m ³	-2,06%	186,79 m ³	173,70 m ³	7,01%
Holzvolumen/BGF	0,259 m ³ /m ²	0,276 m ³ /m ²	-6,68%	0,231 m ³ /m ²	0,195 m ³ /m ²	15,28%
KGF	244,80 m ²	90,34 m ²	63,10%	137,70 m ²	55,56 m ²	59,65%
WLF	1195,20 m ²	1287,22 m ²	-7,70%	672,30 m ²	833,57 m ²	-23,99%
Holzvolumen/WLF	0,312 m ³ /m ²	0,296 m ³ /m ²	5,239%	0,278 m ³ /m ²	0,208 m ³ /m ²	25,00%

CS 3 - IBA Heidelberg CA			CS 4 - Student Housing Weimar			CS 5 - Greenhouse		
Planungstool	Planung/ Entwurf	Abweichung	Planungstool	Planung/ Entwurf	Abweichung	Planungstool	Planung/ Entwurf	Abweichung
4116,08 m2	4492,04 m2	-9,13%	2095,56 m2	2163,96 m2	-3,26%	4628,16 m2	4799,34 m2	-3,70%
10897,15 m3	12708,49 m3	-16,62%	6078,24 m3	6389,28 m3	-5,12%	18593,28 m3	19981,84 m3	-7,47%
0,38	0,35	6,42%	0,34	0,34	1,76%	0,25	0,24	3,51%
2,85 m	2,85 m	0,00%	3,00 m	2,94 m	2,00%	4,00 m	4,00 m	0,00%
2,85 m	2,85 m	0,00%	3,00 m	2,94 m	2,00%	4,00 m	4,00 m	0,00%
85,50 m	86,70 m	-1,40%	24,00 m	24,00 m	0,00%	48,00 m	48,40 m	-0,83%
11,40 m	12,00 m	-5,26%	12,00 m	12,24 m	-2,00%	24,00 m	24,20 m	-0,83%
4	4	0,00%	7	7	0,00%	4	4	0,00%
3898,80 m2	4161,60 m2	-6,74%	2016,00 m2	2056,32 m2	-2,00%	4608,00 m2	3949,12 m2	14,30%
2,85 m	2,85 m	0,00%	3,00 m	2,94 m	2,00%	4,00 m	4,00 m	0,00%
120,00 mm	120,00 mm	0,00%	140,00 mm	120,00 mm	14,29%	160,00 mm	160,00 mm	0,00%
0,97 m3	0,97 m3	0,00%	1,26 m3	1,04 m3	17,68%	2,56 m3	2,02 m3	21,09%
480 Stk.	480 Stk.	0,00%	224 Stk.	212 Stk.	5,36%	288 Stk.	242 Stk.	15,97%
467,86 m3	467,86 m3	0,00%	282,24 m3	219,89 m3	22,09%	737,28 m3	488,84 m3	33,70%
2,85 m	2,85 m	0,00%	3,00 m	2,94 m	2,00%	4,00 m	4,00 m	0,00%
240,00 mm	200,00 mm	16,67%	240,00 mm	240,00 mm	0,00%	240,00 mm	240,00 mm	0,00%
240,00 mm	280,00 mm	-16,67%	280,00 mm	280,00 mm	0,00%	400,00 mm	400,00 mm	0,00%
0,16 m3	0,16 m3	2,78%	0,20 m3	0,20 m3	2,00%	0,38 m3	0,38 m3	0,00%
496 Stk.	496 Stk.	0,00%	252 Stk.	252 Stk.	0,00%	312 Stk.	289 Stk.	7,37%
81,42 m3	79,16 m3	2,78%	50,80 m3	49,79 m3	2,00%	119,81 m3	110,98 m3	7,37%
2,80 m	2,50 m	10,71%	3,10 m	3,00 m	3,23%	4,10 m	3,60 m	12,20%
240,00 mm	200,00 mm	16,67%	320,00 mm	240,00 mm	25,00%	280,00 mm	280,00 mm	0,00%
240,00 mm	200,00 mm	16,67%	320,00 mm	240,00 mm	25,00%	280,00 mm	280,00 mm	0,00%
0,16 m3	0,10 m3	38,00%	0,32 m3	0,17 m3	45,56%	0,32 m3	0,28 m3	12,20%
620 Stk.	620 Stk.	0,00%	315 Stk.	237 Stk.	24,76%	364 Stk.	356 Stk.	2,20%
99,99 m3	62,00 m3	38,00%	99,99 m3	40,95 m3	59,04%	117,00 m3	100,48 m3	14,12%
145,34 m3	273,60 m3	-88,25%	84,08 m3	68,49 m3	18,54%	83,93 m3	k.A.	
794,61 m3	882,62 m3	-11,08%	517,12 m3	379,12 m3	26,69%	1058,02 m3	700,29 m3	33,81%
0,204 m3/m2	0,212 m3/m2	-4,06%	0,257 m3/m2	0,184 m3/m2	28,12%	0,230 m3/m2	0,177 m3/m2	22,77%
608,76 m2	303,80 m2	50,10%	423,36 m2	88,86 m2	79,01%	584,64 m2	k.A.	
3290,04 m2	3857,80 m2	-17,26%	1592,64 m2	1967,46 m2	-23,53%	4023,36 m2	k.A.	
0,242 m3/m2	0,229 m3/m2	5,27%	0,325 m3/m2	0,193 m3/m2	40,65%	0,263 m3/m2	k.A.	

HERAUSFORDERUNGEN DER SYSTEMENTWICKLUNG

Bei der Planung des Tragwerks für das Modellvorhaben galt es drei große Gesichtspunkte zu vereinen – die Wirtschaftlichkeit, die bautechnische Umsetzbarkeit und der Wunsch von Bauherren-/Architektenseite so viel Holz wie irgendwie möglich sichtbar einzusetzen.

Um ein möglichst wirtschaftliches Tragwerk zu entwerfen, ist es immer das Ziel, den Materialaufwand gering zu halten. Das wird vor allem dadurch gewährleistet, dass ein einheitliches Raster mit Decken- und Unterzugausrichtung gewählt wird und bei dem die Stützen des Tragwerks über alle Geschosse exakt über einander stehen. Des Weiteren spielt vor allem die Spannweite der Decken eine entscheidende Rolle für den Materialaufwand. Große Spannweiten erfordern hohe Deckenquerschnitte, was durch den flächigen Eintrag schnell zu mehr benötigtem Holzvolumen führt. Die Herausforderung besteht hierbei darin, ein sinnvolles Rastermaß zu finden, das die Flexibilität des Grundrisses nicht außer Acht lässt. Ein Rastermaß von ca. 3 auf 3 Metern konnte hier als sinnvolles Maß gefunden werden.

Was die bautechnische Umsetzbarkeit anbelangt, so besteht die Herausforderung hierbei zum einen darin Lösungen zu finden, die mit heutiger CNC-Abbundtechnik möglichst einfach und effizient umsetzbar sind, und zum anderen aber auch darin die Anschlusspunkte so zu gestalten, dass sie auf der Baustelle gut umsetzbar sprich montierbar sind. Der erste Gedanke für die Anschlusspunkte – vor allem in den Bereichen wo mehrere Unterzüge und Stützen aufeinandertreffen – bestand in alten japanischen Verbindungen.

Diese gewährleisten durch einfaches geometrisches Verschachteln der einzelnen Bauteile miteinander eine sehr einfache Montage. Die einzelnen Bauteile lassen sich dabei durch Umkehren des Vorgangs auch sehr einfach wieder demontieren, was vor allem im Falle eines Rückbaus große Vorteile bringt. Mit der heutigen CNC-Abbundtechnik ist man zwar in der Lage solche Anschlusspunkte durchaus mit der notwendigen Genauigkeit zu fertigen, allerdings führen diese komplexen Formen auch zu hohen Maschinenzeiten, was wiederum zu erhöhten Kosten führt. Außerdem ist es bei den in Deutschland bzw. Europa geltenden Normen kaum möglich solche komplexen Formen brandschutztechnisch für die auftretenden Lasten mehrgeschossiger Gebäude auszulegen. Und genau hierin bestand bzw. besteht die größte Herausforderung bei der Anwendung der entwickelten Systemvariante auf das Modellvorhaben – die Anschlüsse der einzelnen Bauteile so zu gestalten, dass sie die Lasten im Kaltzustand, aber auch im Brandfall sicher übertragen. Den größten Knackpunkt im gesamten Tragwerk stellt bei den im Modellvorhaben vorhandenen 5 Geschossen der Anschluss Stütze an Stütze dar. In diesem Punkt müssen nicht nur die vertikalen Lasten aus den 4 oberen Geschossen von Stütze zu Stütze übertragen, sondern auch die Lasten aus den anzuschließenden Unterzügen aufgenommen werden.

Und genau hier hat nun auch der dritte Gesichtspunkt – der Wunsch nach möglichst viel sichtbarem Holz – den größten Einfluss. Durch das sichtbare Holz muss die Tragstruktur auf Abbrand bemessen werden, d.h. im Brandfall geht ein erheblicher Anteil des Querschnitts verloren. Für den Anschluss der Decke an den Unterzug ist das für alle vorkommenden Raster bzw. Lasten und den vorkommenden Brandschutzanforderungen (max. 90 Minuten) kein Problem, da die Lasten hier immer klar definiert sind. Die Lasten resultieren immer aus nur zwei halben Deckenfeldern und auf dem Unterzug bleibt immer genügend Auflagerfläche zur Verfügung um die Bemessung auch mit Holzverbindungsmitteln sicher zu stellen. Auch der Anschluss des Unterzuges an die Stütze bleibt bzgl. der auftretenden Lasten zunächst gleich, die Herausforderung besteht hier eher in der zur Verfügung stehenden Auflagerfläche. Durch mehr Geschosse entstehende größere Lasten aus den oberen Geschossen, was bedingt, dass für die Lastweiterleitung Stütze an Stütze mehr Fläche benötigt wird. Das verkleinert wiederum die Unterzugaullagerfläche. Hinzu kommt, dass durch eine größere Geschossanzahl auch die Gebäudeklasse und damit die Brandanforderungen steigen. Somit geht im Brandfall noch mehr Fläche verloren. Kommt die zusätzliche Anforderung der Übertragung von Zugkräften für die Aussteifung hinzu, so steigert das die Komplexität dieses Anschlusses zusätzlich. Genau das ist auch im oben beschriebenen Modellvorhaben der Fall, weshalb für die Anschlüsse Stütze an Stütze im Bereich der aussteifenden Wände Detailanschlüsse mit Stahlteilen und metallischen Verbindungsmitteln zum Einsatz kommen.

Für bis zu 3 Geschosse und ein Rastermaß von ca. 3 Meter bewegen sich die Lasten in Bereichen, die mit reinen Holzanschlüssen noch händelbar sind. Wobei das auch sehr davon abhängig ist, wie viele Wände bspw. für die Aussteifung zur Verfügung stehen und wie groß die Aussteifungslasten dementsprechend ausfallen.

Insgesamt lässt sich für die entwickelte Systemvariante sagen, dass sich die meisten Anschlusspunkte (Decke an Unterzug, Unterzug an Stütze, Deckenelemente untereinander, Unterzug an aussteifende Wände) durchaus rein mit Holzverbindungsmitteln ausführen lassen (Decke an Unterzug -> Buchendübel, Unterzug an Stütze -> geometrisches Verschachteln, Deckenelemente untereinander für Aussteifung -> X-Fix-C-Verbinder, Unterzug an aussteifende Wände -> X-Fix-C-Verbinder). Und diese Anschlusspunkte erweisen sich auch durchaus als sehr praxistauglich, da sie durch ihre einfache Ausführung auf der Baustelle leicht montiert werden können. Das bedingt auch, dass sich diese Verbindungen wieder leicht lösen lassen, was sicherlich eine weitere Stärke ist. Durch die reine Ausführung mit Holz, sprich eine einstoffliche Lösung, ergeben sich auch bauphysikalische Vorteile.

Die größte Herausforderung besteht aber im Anschluss Stütze-Stütze. Dies gilt vor allem bei sehr hohen Lasten und/oder hohen Brandanforderungen, sowie bei zusätzlich zu übertragenden Zugkräften aus der Aussteifung. Bzgl. der Aussteifung rein über den Holzbau erweist sich auch der Anschluss von Zugkräften an den Massivbau als Herausforderung. Und genau an diesen Anschlusspunkten muss oder sollte noch mehr Entwicklungsarbeit geleistet werden, da diese bislang die Schwachstellen bzw. auch Kostentreiber des Systems darstellen.

Was bislang keine Berücksichtigung finden konnte, sind die auskragenden Balkone. Wie in den Abbildungen zum Modellvorhaben zu sehen ist, sind hier an den Gebäudelängsseiten auskragende Balkone eingeplant. Auch hier bedarf es weiterer Entwicklungs-/Forschungsarbeit. Bei auskragenden Balkonen im Holzbau lässt sich jedoch allgemein sagen, dass diese immer eine sehr große Herausforderung bzgl. Bauphysik (Wanddurchbruch), Schallschutz, Holzschutz und Anslusstechnik (vor allem bei Ausführung im Bereich von Stürzen) darstellen. Das ist schon bei Verwendung von metallischen Verbindungsmitteln der Fall und wird bei ausschließlicher Verwendung von Verbindungsmitteln aus Holz tendenziell eher schwieriger werden.

VARIANTENVERGLEICH UND SYSTEMBEWERTUNG

In Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit haben die reinen Holzverbindungen potentiell Vorteile gegenüber Konstruktionen mit metallischen Verbindern. Die Verbinder an sich sind hochwertige und teurere Bauteile. Auch das Einbringen der Verbindungen erzeugt eine erhebliche Verzögerung in der Herstellung und Montage auf der Baustelle. Wenn die Verarbeitungszeiten kürzer werden, sinken auch die Kosten. Der komplexere Abbund bedeutet längere Bearbeitungszeiten auf der Abbund-Anlage. Kosten werden gespart für die Verbindungsmittel und die zügigere Montage auf der Baustelle. Im Zuge der Forschung wurde untersucht, ob sich die potentiellen Kostenvorteile durch die bisherige Entwicklung schon heben ließen

VERGLEICH VON SYSTEMVARIANTEN IN UNTERSCHIEDLICHEN BAUWEISEN

Das Bausystem wird im Rahmen des Entwurfs eines Modellvorhabens in Frankfurt am Main (vgl. dazu Absatz 6.2 Fallstudie 2 // dgj228 Mehrfamilienhaus , Seite 151ff.) entwickelt, für den gerade die Planung vorliegt und der bis 2020 umgesetzt wird. Der klare Anwendungsbezug des Bausystems erlaubt, die theoretischen Überlegungen mit Erkenntnissen aus der Praxis zu validieren.

In diesem Kapitel sollen verschiedene Varianten für das Tragsystems der Fallstudie 2 // dgj228 Mehrfamilienhaus Friedberg Landstraße Frankfurt verglichen werden. Dabei werden zunächst die Systemvarianten zunächst ökonomisch in Abschnitt 8.1.1. Kosten- und Massenvergleich der Systemvarianten und danach in Abschnitt 8.1.2 Ökobilanzierung der Systemvarianten untersucht.

In Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit haben die reinen Holzverbindungen potentiell Vorteile gegenüber Konstruktionen mit metallischen Verbindern. Die Verbinder an sich sind hochwertige und teurere Bauteile. Auch das Einbringen der Verbindungen erzeugt eine erhebliche Verzögerung in der Herstellung und Montage auf der Baustelle. Wenn die Verarbeitungszeiten kürzer werden, sinken auch die Kosten. Der komplexere Abbund bedeutet längere Bearbeitungszeiten auf der Abbund-Anlage. Kosten werden gespart für die Verbindungsmittel und die zügigere Montage auf der Baustelle. Im Zuge der Forschung wurde untersucht, ob sich die potentiellen Kostenvorteile durch die bisherige Entwicklung schon heben ließen.

Die Unterscheidung des Systems zum konventionellen Holzbau liegt also vor allem in der Fügung der Primärkonstruktion. Hier wird bei dem Bausystem mit form- und kraftschlüssigen Holz-Holz-Verbindungen gearbeitet. In konventionellen Holzbauten kommen vor allem Stahlverbinder zum Einsatz. Um nun den Unterschied in Aufwand und Kosten zwischen dem vorgestellten System und einem konventionellen Holzbau zu erforschen, müssen diese beiden Bauweisen in Hinblick auf die Unterschiede, die sich aus der Fügung

ableiten, verglichen werden. Hier ergeben sich deutliche Unterschiede, die im Vergleich von Systemvarianten auf Grundlage des Modellvorhabens dgj228 Wohngruppe Frankfurt am Main in konventioneller Bauweise und im Bausystem konzipiert wurden.

Die Vergleichsbetrachtung geht von einer vereinfachten Geometrie des Modellvorhabens aus. Das Rastermaß wird auf 3 m reduziert und Staffeltgeschosse werden als Vollgeschosse angenommen. Diese Vereinfachung beruht auch auf der Anwendung des entwickelten Rechentools.

Für alle Varianten beschränkt sich die Betrachtung auf die primäre oberirdische Tragkonstruktion, in der das System zur Anwendung kommen soll. Es wird davon ausgegangen, dass für die Gründung bzw. Kellergeschosse in allen Fällen eine konventionelle Massivbauweise ausgeführt wird. Ausbau, Fassade und Gebäudetechnik sind auf dieser Betrachtungsebene ebenfalls nicht systemimmanent und werden daher von der Betrachtung ausgeschlossen. Eine Ausnahme bildet die schallschutztechnische Ertüchtigung der Geschossdecken, da die Anforderungen in der Ausführungsvariante mit HBV-Decken bereits durch das Bauteil erfüllt werden. Zur Vergleichbarkeit wird bei BSP-Decken eine entsprechend notwendige Splittschüttung in die Berechnungen einbezogen. Ebenso wurde mit den Treppenhäusern in Hinblick auf die Brandschutzanforderungen. Da diese in Stahlbetonweise erfüllt werden, müssen die notwendigen Ertüchtigungen bei einer Ausführung in Massivholz berücksichtigt werden.

In der Betrachtung der Einzelvarianten wurden auf Grundlage der jeweiligen Bemessungsmodelle die Materialmengen für die Tragelemente Stützen, Unterzüge und Decken sowie die Treppenhäuserkerne als Gebäudeaussteifung erfasst. Hinzu kommen die Mengen aller zur Fügung dieser Bauteile notwendigen Verbindungsmittel.

Aus den Mengenaufstellungen wurden auch überschlägige Kosten für die Bauteilgruppen und die Gesamtkonstruktion ermittelt. Die angesetzten Kosten beruhen auf Hersteller- bzw. Händlerangaben und auch Erfahrungswerten der Forschungspartner, die mit der BKI Kostenplanung 2018³⁰ abgeglichen wurden.

Anhand der ermittelten Mengen wurden mit Hilfe des eLCA-Bauteileeditors Vergleichswerte zu den Umweltauswirkungen der Varianten generiert.³¹

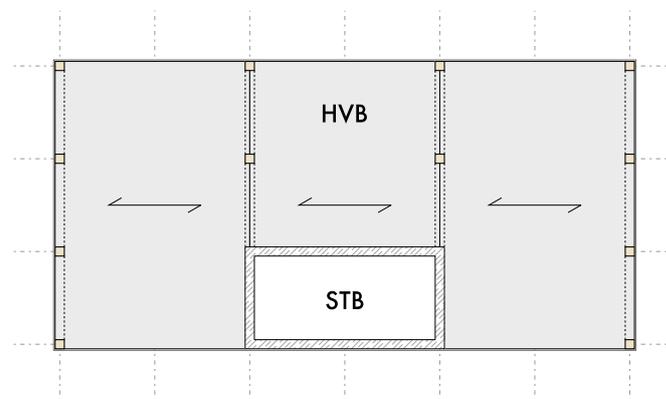
30 BKI Baukosten 2018 Neubau, Statistische Kostenkennwerte für Positionen; BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.); Stuttgart: BKI, 2018
31 <https://www.bauteileeditor.de/>

DEFINITION DER SYSTEMVARIANTEN

Variante 1:

Stahlbeton-Treppenhauskern, HBV-Decken, Holz-Unterzüge & Holz-Stützen

Abbildung 100:
Schematische Darstellung System-
variante 1,
DGJ Architektur, 2019



Bei dieser Variante werden als Geschosstrenndecken Holz-Beton-Verbund-Decken (HBV-Decken) verwendet. HBV-Decken besitzen eine hohe Tragfähigkeit, da die Vorteile beider Materialien – Holz und Beton – optimal ausgenutzt werden. Des Weiteren ist der Schallschutz bei einer HBV-Decke durch die große Masse des Betons ohne weitere Maßnahmen gewährleistet. Die HBV-Decken stellen damit heutzutage den aktuellen Stand der Technik dar. Verwendet wird hier ein Deckenaufbau aus 120mm Holz und 120mm Beton.

Aufgrund der hohen Tragfähigkeit können die Decken über zwei Raster, also über circa 6 Meter gespannt werden. Dies ermöglicht eine größere Variabilität im Wohnbereich. Wie die Decken werden auch die Unterzüge als Einfeldträger ausgebildet, spannen allerdings nur über ein Raster, also circa 3 Meter. Die Holzunterzüge lassen sich nicht deckengleich ausführen. Durch die große Höhe der notwendigen Unterzüge geht daher Raumhöhe verloren. Durch die Verwendung von Holz für Unterzüge und Stützen lässt sich jedoch eine erhebliche Menge an Stahl – ca. 8t – einsparen.

Die Aussteifung des Gebäudes erfolgt über die Deckenscheiben und den massiven Treppenhauskern. Im Bereich der Decken bildet der bewehrte Überbeton die horizontalen Scheiben aus. Im Übergangsbereich werden Rückbiegeanschlüsse verwendet, wie sie im Betonbau Standard sind. Diese werden beim Betoniervorgang der HBV-Decken direkt mit einbetoniert und sorgen für die Kraftübertragung von den Scheiben in den aussteifenden Stahlbeton-Treppenhauskern.

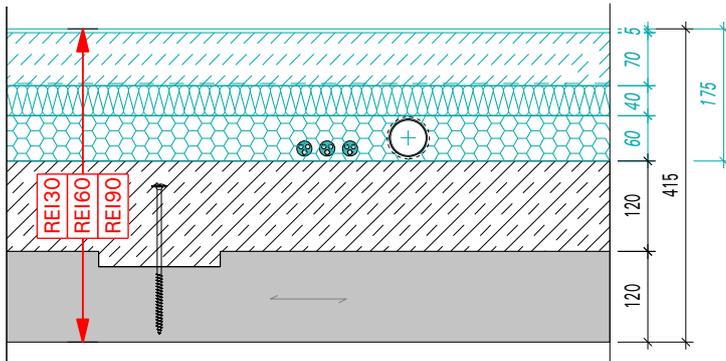


Abbildung 101:
Exemplarischer Deckenaufbau für Ausführung einer HBV-Decke mit Kerfenverschraubung, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019

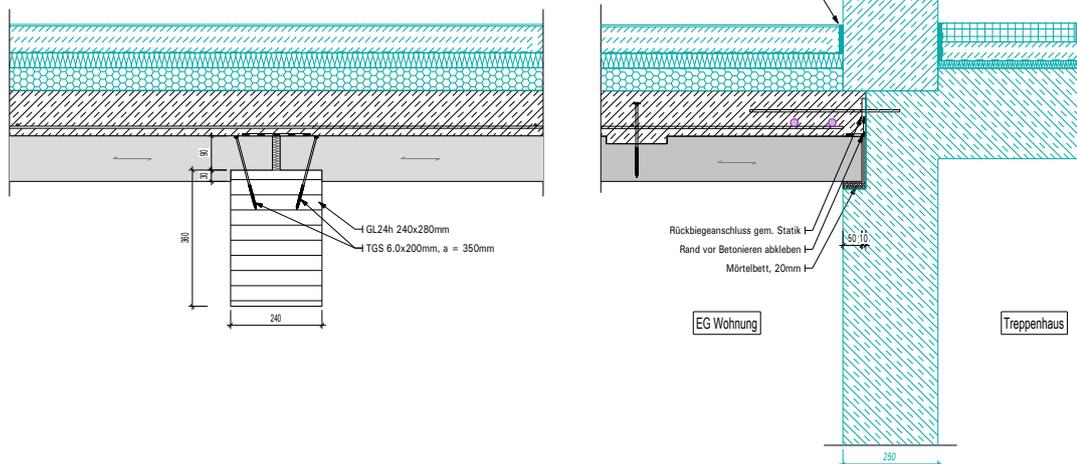


Abbildung 102:
Anschlusspunkte HBV-Decken an Unterzüge und Stahlbeton-Treppenhäuser, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019

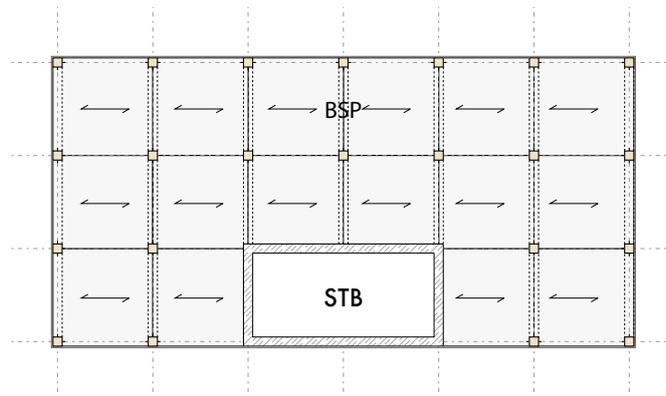
Massen- und Kostenaufstellung:

		Material/ Klasse	Menge/ Anzahl	Volumen	Rohdichte ρ	Masse	Kosten (Material)	Kosten (gesamt)
Stützen	BSH	GL24h	60 Stk. 180 m	14,112 m ³	507,1 kg/m ³	7156,33632 kg	1.000,00 € /m ³ 14.112,00 €	
	Verbindungsmittel:							
Stütze an Stütze	Holzbohrschraube TGS 6.0x120mm		4 Stk./Ans. 240 Stk.			14 g/Stk. 3,360 kg	1,40 € /Stk. 336,00 €	14.448,00 €
Unterzüge	BSH	GL24h	50 Stk. 150 m	12,96 m ³	507,1 kg/m ³	6572,1456 kg	1.000,00 € /m ³ 12.960,00 €	
	Verbindungsmittel:							
Unterzug an Stütze	Holzbohrschraube TGS 6.0x120mm		4 Stk./Ans. 240 Stk.			14 g/Stk. 3,360 kg	1,40 € /Stk. 336,00 €	13.296,00 €
Decken	Beton		720 /m ²	0,12 m ³ /m ²	2400 kg/m ³	207360 kg		
	Holz BSP	C24	720 /m ²	0,12 m ³ /m ²	489,4 kg/m ³	42285,024 kg		
	Bewehrungsstahl					7,00 kg/m ² 5040 kg		
	Verbindungsmittel:						180,00 € /m ² 129.600,00 €	
Decke an Unterzug	TGS 6.0x200mm		4 Stk./m 900 Stk./m			22 g/Stk. 19,80 kg	1,60 € /Stk. 1.440,00 €	
Decke an Kern	Halflen HBT 55 Typ 1		1 Stk./m 50 Stk.			2,5 kg/m 125 kg	50,00 € /Stk. 2.500,00 €	
Kerfenverschraubung	TKS 8.0x180mm		5 Stk./m ² 3600 Stk.			50 g/Stk. 180 kg	1,90 € /Stk. 6.840,00 €	140.380,00 €
Treppenhauskern	Beton			90 m ³	2400 kg/m ³	216000 kg		
	Wandstärke 250mm					30 kg/m ² 10800 kg		
	Bewehrungsstahl		360 m ²				400,00 € /m ³ 36.000,00 €	36.000,00 €
Gesamtmasse Beton:						423360 kg		
Gesamtmasse Stahl:						16172 kg		
Gesamtmasse Holz:						56014 kg		
Gesamtkosten:								204.124,00 €

Variante 2:

Stahlbeton-Treppenhaukern, BSP-Decken, Holz-Unterzüge & Holz-Stützen, Verbindungsmittel aus Stahl

Abbildung 103:
Schematische Darstellung System-
variante 2,
DGJ Architektur, 2019



Wie in der Beschreibung des Tragwerks zu „dgj228“ beschrieben, werden bei dieser Variante 5-schichtige Brettsperrholzelemente für die Geschosstrenndecken verwendet. Mit einer Dicke von 120mm ist eine Brettsperrholzdecke deutlich weniger tragfähig als eine HBV-Decke. Daher spannen bei dieser Variante die Decken nur über ein Rasterfeld, also circa 3 Meter, was die Variabilität des zur Verfügung stehenden Raumes einschränkt. Zur Gewährleistung des Schallschutzes ist bei der Verwendung von BSP-Decken eine Splittschüttung von 100mm erforderlich.

Die Decken lasten bei dieser Variante auf Holzunterzügen ab, welche wiederum auf Holzstützen auflagern. Die Holzunterzüge spannen als Einfeldträger über ein Raster, die Stützen stehen in jedem Rasterpunkt. Für die Verbindungen (Decke-Unterzug, Unterzug-Stütze, Stütze-Stütze, ...) werden Verbindungsmittel aus Stahl verwendet (hauptsächlich Schrauben und Nägel).

Die Aussteifung erfolgt über horizontale Scheiben, die aus den BSP-Elementen gebildet werden und über den Stahlbeton-Treppenhaukern. Die BSP-Elemente werden untereinander über Stoßdeckleisten verbunden. Die Verbindung zwischen horizontaler Scheibe und Treppenhaukern erfolgt über Stahlwinkel, die auf die BSP-Decke genagelt und in den Stahlbetonwänden festgedübelt werden.

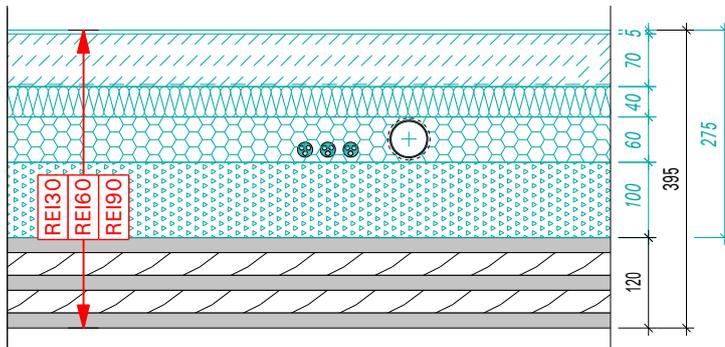


Abbildung 104:
Exemplarischer Deckenaufbau für Ausführung einer BSP-Decke mit Splittschüttung (Spannweite 3m), Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019

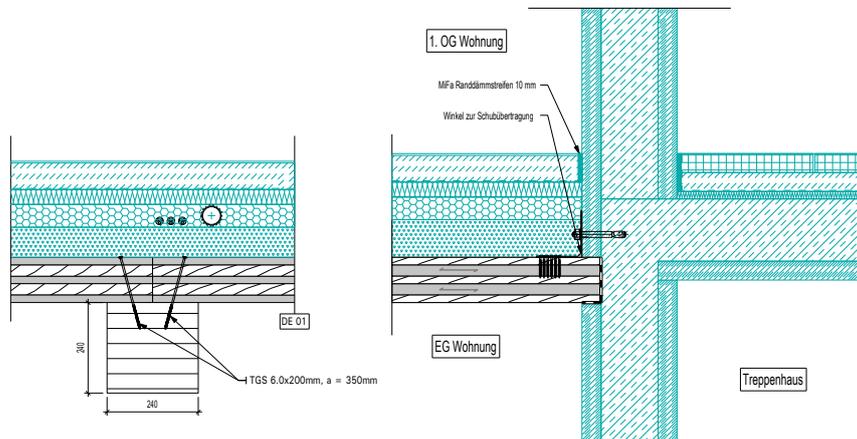


Abbildung 105:
Anschlusspunkte BSP-Decken an Unterzüge und Stahlbeton-Treppenhaus mit metallischen Verbindungsmitteln, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019

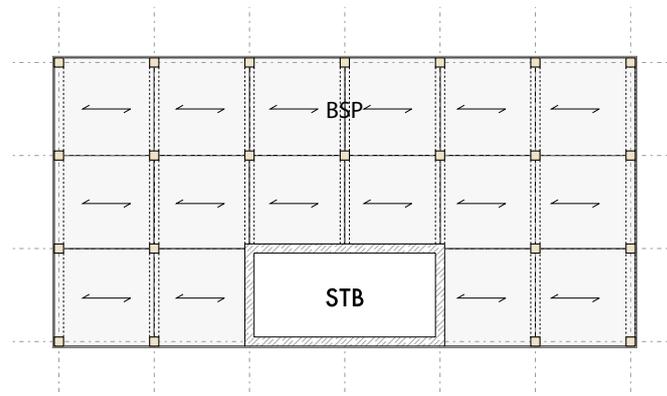
Massen- und Kostenaufstellung:

	Material/ Klasse	Anzahl	Volumen	Rohdichte ρ	Masse	Kosten (Material)	Kosten (gesamt)
Stützen	BSH	GL24h	110 Stk.			1.000,00 €/m ³	
			330 m	507,1 kg/m ³	9639,14688 kg	19.008,00 €	
Verbindungsmittel:							
Stütze an Stütze	Holzbouschraube		4 Stk./Ans.		14 g/Stk.	1,40 €/Stk.	
	TGS 6.0x120mm		440 Stk.		6,160 kg	616,00 €	19.624,00 €
Unterzüge	BSH	GL24h	90 Stk.			1.000,00 €/m ³	
			270 m	507,1 kg/m ³	7886,57472 kg	15.552,00 €	
Verbindungsmittel:							
Unterzug an Stütze	Holzbouschraube		4 Stk./Ans.		14 g/Stk.	1,40 €/Stk.	
	TGS 6.0x120mm		240 Stk.		3,360 kg	336,00 €	15.888,00 €
Decken	Brettspertholz		720 /m ²	0,12 m ³ /m ²	489,4 kg/m ³	42285,024 kg	
	Splittschüttung		580 /m ²	0,1 m ³ /m ²	1600 kg/m ³	92800 kg	
						935,00 €/m ³	
						80.784,00 €	
Verbindungsmittel:							
Decke an Unterzug	TGS 6.0x200mm		4 Stk./m		22 g/Stk.	1,60 €/Stk.	
			900 Stk./m		19,80 kg	1.440,00 €	
Decke an Kern	Winkel ABR255		1 Stk./m		0,32 kg/Stk.		
			50 Stk.		16,00 kg		
	Kammnagel		1500 Stk.		5 g/Stk.		
	CNA 4.0x50mm				7,5 kg		
	Bolzenanker				80 g/Stk.		
	Hilti HST3 M10		100 Stk.		8 kg		
						30,00 €/Stk.	
						1.500,00 €	
Verbindung BSP-Elemente	Holzbouschraube		6 Stk./m		18 g/Stk.	2,10 €/Stk.	
	VGS 6.0x160mm		220 Stk.		3,96 kg	462,00 €	84.186,00 €
Treppenhauskern	Beton						
	Wandstärke 250mm			90 m ³	2400 kg/m ³	216000 kg	
	Bewehrungsstahl		360 m ²		30 kg/m ²	10800 kg	
							400,00 €/m ³
						36.000,00 €	36.000,00 €
Gesamtmasse Beton:					216000 kg		
Gesamtmasse Stahl:					10865 kg		
Gesamtmasse Holz:					59811 kg		
Gesamtmasse Splittschüttung:					92800 kg		
						Gesamtkosten:	155.698,00 €

Variante 3:

Stahlbeton-Treppenhauskern, BSP-Decken, Holz-Unterzüge & Holz-Stützen, Verbindungsmittel aus Holz

Abbildung 106:
Schematische Darstellung System-
variante 3,
DGJ Architektur, 2019



Bei dieser Variante ist das Tragwerk identisch zur zuvor beschriebenen Variante. Einziger Unterschied besteht in den Verbindungsmitteln. Diese bestehen bei dieser Variante ausschließlich aus Holz, um den Stahlanteil so gering wie möglich zu halten.

Der größte Teil der Anschlüsse wird durch Buchenholzdübel gelöst, bei der Verbindung Unterzug an Stütze kann durch geschicktes Verschachteln ganz auf Verbindungsmittel verzichtet werden.

Die Aussteifung erfolgt weiterhin über horizontale Scheiben, die aus den BSP-Elementen gebildet werden und über den Stahlbeton-Treppenhauskern. Um bei dieser Variante die BSP-Elemente untereinander verbinden zu können, werden sogenannte X-Fix-Verbinder verwendet. Dabei handelt es sich um schwalbenschwanzartige Verbinder aus Furnierschichtholz, die in die zuvor eingefrästen Negativformen in den BSP-Elementen eingeschlagen werden. Die Verbindung zwischen horizontaler Scheibe und Treppenhauskern erfolgt über Nocken, die in den BSP-Elementen eingefräst werden. Diese Nocken werden ausgegossen und sorgen so für den Schubverbund zwischen Decke und Stahlbetonkern.

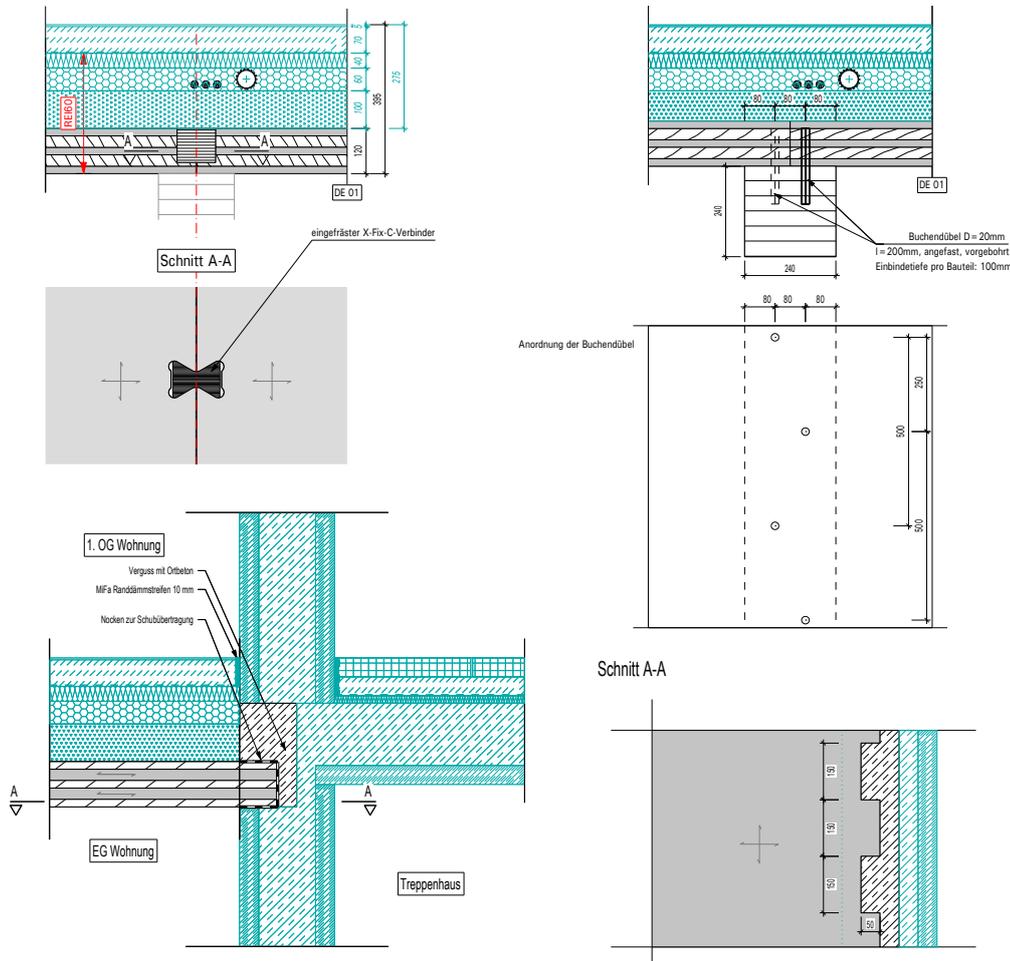


Abbildung 107: Verbindung von BSP-Deckenelementen und Anschluss an Unterzüge mit Holzverbindungsmiteln, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019

Abbildung 108: Anschluss von BSP-Decken an Stahlbeton-Treppenhaus ohne metallische Verbindungsmitteln, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019

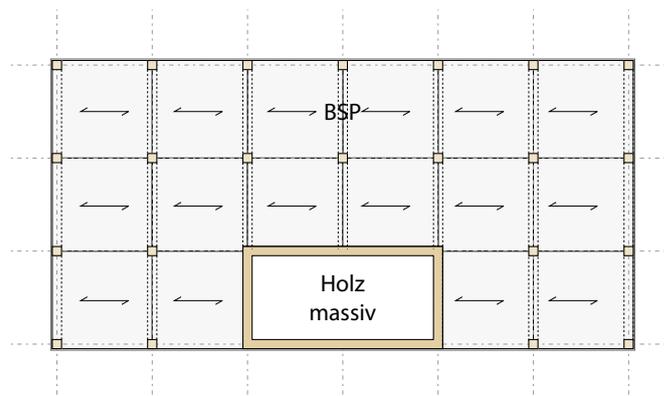
Massen- und Kostenaufstellung:

	Material/ Klasse	Anzahl	Volumen	Rohdichte ρ	Masse	Kosten (Material)	Kosten (gesamt)
Stützen	BSH	GL24h	110 Stk.			1.000,00 €/m ³	
			330 m	19,008 m ³	507,1 kg/m ³	9639,14688 kg	19.008,00 €
Verbindungsmittel:							
Stütze an Stütze	Buchendübel d=20mm	2 Stk./Ans.	0,000063 m ³ /Stk.	761,6 kg/m ³	50 g/Stk.	5,90 €/Stk.	
		220 Stk.			11,000 kg	1.298,00 €	20.306,00 €
Unterzüge	BSH	GL24h	90 Stk.			1.000,00 €/m ³	
			270 m	15,552 m ³	507,1 kg/m ³	7886,57472 kg	15.552,00 €
Decken	Brettsperrholz		720 /m ²	0,12 m ³ /m ²	489,4 kg/m ³	42285,024 kg	
	Spaltschüttung		580 /m ²	0,1 m ³ /m ²	1600 kg/m ³	92800 kg	
							935,00 €/m ³
Verbindungsmittel:							
Decke an Unterzug	Buchendübel d=20mm	2 Stk./m	6E-05 m ³ /Stk.	761,6 kg/m ³	50 g/Stk.	5,90 €/Stk.	
		600 Stk.			30 kg	3.540,00 €	
Decke an Kern	Nockenverbindung b=120;t=50mm	1 Stk./m				25,00 €/Stk.	
		60 Stk.				1.500,00 €	
Verbindung BSP-Elemente	X-Fix C-Verbinder	2 Stk./m			510 g/Stk.	18,50 €/Stk.	
		80 Stk.			40,8 kg	1.480,00 €	87.304,00 €
Treppenhauskern	Beton					400,00 €/m ³	
	Wandstärke 250mm		90 m ³	2400 kg/m ³	216000 kg		
	Bewehrungsstahl	360 m ²			30 kg/m ²	10800 kg	
						36.000,00 €	36.000,00 €
Gesamtmasse Beton:					216000 kg		
Gesamtmasse Stahl:					53156 kg		
Gesamtmasse Holz:					10865 kg		
Gesamtmasse Splittschüttung:					92800 kg		
Gesamtkosten:							159.162,00 €

Variante 4.1:

Massiver Holz-Treppenhaukern, BSP-Decken, Holz-Unterzüge & Holz-Stützen, (fast ausschließlich) Verbindungsmittel aus Holz – Deckenspannweite 3 m

Abbildung 109:
Schematische Darstellung System-
variante 4.1,
DGJ Architektur, 2019



Um den Stahlanteil im Gebäude auf ein Minimum zu reduzieren, wird bei dieser Variante auch der Treppenhaukern aus Holz gefertigt.

Die Abtragung der vertikalen Lasten erfolgt wie bei den Varianten zuvor über BSP-Decken, Holzunterzüge und Holzstützen. Die Anschlüsse zwischen den zuvor genannten Bauteilen erfolgt über Verbindungsmittel aus Holz (meist Buchendübel). Für den Schallschutz ist eine Splittschüttung von 100mm oberhalb der BSP-Decken erforderlich.

Die Aussteifung des Gebäudes erfolgt bei dieser Variante (fast ausschließlich) über Holzbauteile. Die Geschosstrenndecken werden mittels der zuvor beschriebenen X-Fix-Verbinders als steife Deckenscheiben ausgebildet, um die angreifenden Windlasten sicher zu den aussteifenden Wandscheiben zu transportieren. Mehrere Wandscheiben aus Brettsperrholz werden in X- und Y-Richtung im Gebäude angeordnet, um die horizontale Lastabtragung zu gewährleisten. Die Einleitung der horizontalen Lasten von den Deckenscheiben auf die aussteifenden Brettsperrholzwände erfolgt mit Buchen-Rundholzdübeln mit einem Durchmesser von 20mm. Die aussteifenden Wandscheiben untereinander werden aufgrund der auftretenden Zuglasten mit klassischen, metallischen Verbindungsmitteln in Form von Schlitzblechen und Stabdübeln zusammengeschlossen. Abschließend werden diese Zuglasten auf dem Fundament mit stählernen Verbindungsmitteln sowie gängiger Verdübelungstechnik (Hilti oder Fischer) verankert. Die Übertragung der Schublasten von den Wandscheiben in die Fundamente erfolgt über eingefräste und mit Beton vergossene Nockenverbindungen.

Aus Brandschutzgründen muss der Treppenhauskern zusätzlich mit Gipsfaserplatten beplankt werden. Des Weiteren ist zur Gewährleistung des Schallschutzes eine Vorsatzschale zwischen Treppenhauswänden und Wohnraum anzuordnen.

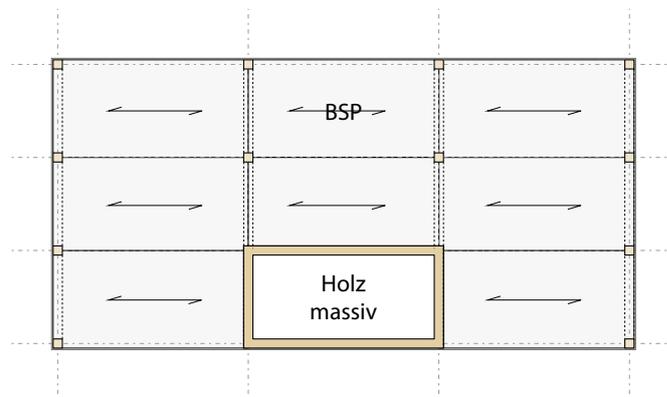
Massen- und Kostenaufstellung:

	Material/ Klasse	Menge/Anzahl	Volumen	Rohdichte ρ_k	Masse	Kosten (Material)	Kosten (gesamt)	
Stützen	BSH	135 Stk.				1.000,00 € /m ³		
	GL24h	405 m	23,328 m ³	507,1 kg/m ³	11829,8621 kg	23.328,00 €		
Stütze an Stütze	Verbindungsmittel:							
	Buchendübel d=20mm	2 Stk./Ans. 270 Stk.	0,00008 m ³ /Stk.	761,6 kg/m ³	60,00 g/Stk. 16,200 kg	5,90 € /Stk. 1.593,00 €		
Stütze an Stütze (im TH-Bereich)	Stahlstabdübel	S235 60 Stk.			74,40 g/Stk. 4,46 kg			
	Schlitzblech	S235 20 Stk.	0,0024 m ³ /Stk. 0,048 m ³		7850 kg/m ³	400,00 € /Ans. 8.000,00 €	31.328,00 €	
Unterzüge	BSH	100 Stk.				1.000,00 € /m ³		
	GL24h	300 m	17,28 m ³	507,1 kg/m ³	8762,8608 kg	17.280,00 €		
Unterzug/Stütze an aussteifende Wand	Verbindungsmittel:							
	X-Fix C-Verbinder	2,5 Stk./m 420 Stk.			510 g/Stk. 214,2 kg	18,50 € /Stk. 7.770,00 €	25.050,00 €	
Decken	Brettsper Holz	720 /m ²	0,12 m ³ /m ²	489,4 kg/m ³	42285,024 kg			
	Splittschüttung	580 /m ²	0,1 m ³ /m ²	1600 kg/m ³	92800 kg			
	Verbindungsmittel:					935,00 € /m ³ 80.784,00 €		
Decke an Unterzug	Buchendübel d=20mm	2 Stk./m 600 Stk./m	6E-05 m ³ /Stk.	761,6 kg/m ³	50 g/Stk. 30 kg	5,90 € /Stk. 3.540,00 €		
Decke an Kern	Nockenverbindung b=120,t=50mm	1 Stk./m 60 Stk.				25,00 € /Stk. 1.500,00 €		
Verbindung BSP-Elemente	X-Fix C-Verbinder	2 Stk./m 80 Stk.			510 g/Stk. 40,8 kg	18,50 € /Stk. 1.480,00 €	87.304,00 €	
Treppenhauskern	BSP	C24				900,00 € /m ³		
	Wandstärke 200mm		54 m ³	489,4 kg/m ³	26428,14 kg	48.600,00 €		
	Treppenläufe	Beton Bew.-Stahl	18 m ³	2400 kg/m ³	43200 kg			
						2250 kg		
							400,00 € /m ³ 7.200,00 €	
	Vorsatzschale						55,00 € /m ²	
	GKF		180 m ²	3,6 m ³	800 kg/m ³	2880 kg		
Dämmung		180 m ²	9 m ³	26,25 kg/m ³	236,25 kg			
Metallständer	d=2mm	225 m	0,002 m ³	7850 kg/m ³	15,7 kg	9.900,00 €		
Beplankung	GKF	360 m ²	14,4 m ³	800 kg/m ³	11520 kg	30,00 € /m ² 10.800,00 €	76.500,00 €	
Gesamtmasse Beton:						43200 kg		
Gesamtmasse Stahl (Verbindungsmittel+UK):						397 kg		
Gesamtmasse Stahl (Bewehrung):						2250 kg		
Gesamtmasse Holz:						89306 kg		
Gesamtmasse Holz (Verbindungsmittel):						301 kg		
Gesamtmasse Splittschüttung:						92800 kg		
Gesamtmasse GKF:						14400 kg		
Gesamtmasse Mineralwolle:						236,25 kg		
Gesamtkosten:							220.182,00 €	

Variante 4.2:

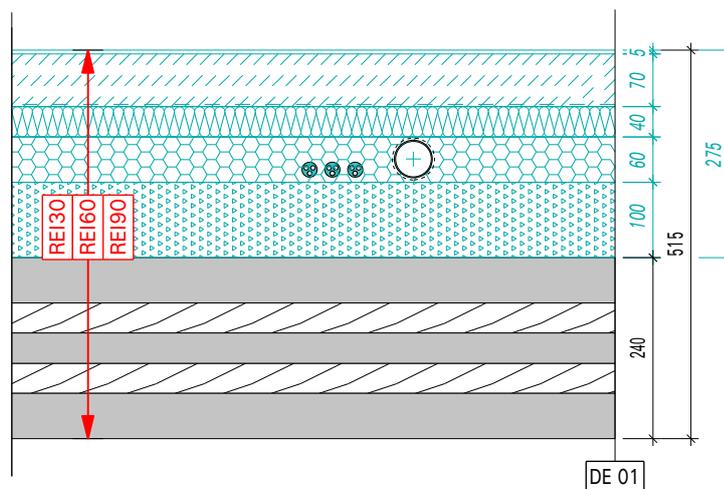
Massiver Holz-Treppenhaukern, BSP-Decken, Holz-Unterzüge & Holz-Stützen, (fast ausschließlich) Verbindungsmittel aus Holz - Deckenspannweite 6 m

Abbildung 111:
Schematische Darstellung System-
variante 4.2,
DGJ Architektur, 2019



Als ergänzende Variante 4.2 zur besseren Vergleichbarkeit mit der Ausführung mit weitspannenden HBV-Decken wurde die Holzbauweise der Variante 4.1 erneut für eine Deckenspannweite von 6 m bemessen. Dementsprechend erhöht sich die Stärke der BSP-Deckenelemente und verringert sich die Anzahl der Stützen und Unterzüge.

Abbildung 110:
Exemplarischer Deckenaufbau für
Ausführung einer BSP-Decke mit
Splittschüttung (Spannweite 6m),
Pirmin Jung Deutschland GmbH,
2019



Massen- und Kostenaufstellung:

	Material/ Klasse	Menge/Anzahl	Volumen	Rohdichte ρ _k	Masse	Kosten (Material)	Kosten (gesamt)	
Stützen	BSH	GL24h 240 m	80 Stk. 13,824 m ³		507,1 kg/m ³ 7010,28864 kg	1.000,00 €/m ³ 13.824,00 €		
	Verbindungsmittel:							
	Stütze an Stütze	Buchendübel d=20mm	2 Stk./Ans. 160 Stk.	0,0008 m ³ /Stk.	761,6 kg/m ³	60,00 g/Stk. 9.600 kg	5,90 €/Stk. 944,00 €	
Stütze an Stütze (im TH-Bereich)	Stahlstabdübel	S235 60 Stk.			74,40 g/Stk. 4,46 kg			
	Schlitzblech	S235 20 Stk.	0,0024 m ³ /Stk. 0,048 m ³	7850 kg/m ³	376,800 kg	400,00 €/Ans. 8.000,00 €	21.824,00 €	
Unterzüge	BSH	GL24h 180 m	60 Stk. 12,096 m ³		507,1 kg/m ³ 6134,00256 kg	1.000,00 €/m ³ 12.096,00 €		
	Verbindungsmittel:							
Unterzug/Stütze an aussteifende Wand	X-Fix C-Verbinder	2,5 Stk./m 420 Stk.			510 g/Stk. 214,2 kg	18,50 €/Stk. 7.770,00 €	19.866,00 €	
Decken	Brettsper Holz	720 /m ²	0,24 m ³ /m ²	489,4 kg/m ³	84570,048 kg			
	Splittschüttung	580 /m ²	0,1 m ³ /m ²	1600 kg/m ³	92800 kg			
							935,00 €/m ³ 161.568,00 €	
Verbindungsmittel:								
Decke an Unterzug	Buchendübel d=20mm	2 Stk./m 420 Stk./m	6E-05 m ³ /Stk.	761,6 kg/m ³	50 g/Stk. 21 kg	5,90 €/Stk. 2.478,00 €		
Decke an Kern	Nockenverbindung b=120,t=50mm	1 Stk./m 60 Stk.				25,00 €/Stk. 1.500,00 €		
Verbindung BSP-Elemente	X-Fix C-Verbinder	2 Stk./m 40 Stk.			510 g/Stk. 20,4 kg	18,50 €/Stk. 740,00 €	166.286,00 €	
Treppenhauskern	BSP	C24				900,00 €/m ³		
	Wandstärke 200mm		54 m ³	489,4 kg/m ³	26428,14 kg	48.600,00 €		
	Treppenläufe	Beton Bew.-Stahl	18 m ³	2400 kg/m ³	43200 kg 2250 kg			
							400,00 €/m ³ 7.200,00 €	
	Vorsatzschale							
	GKF		180 m ²	3,6 m ³	800 kg/m ³	2880 kg	55,00 €/m ²	
	Dämmung		180 m ²	9 m ³	26,25 kg/m ³	236,25 kg		
	Metallständer	d=2mm	225 m	0,002 m ³	7850 kg/m ³	15,7 kg	9.900,00 €	
Beplankung	GKF					30,00 €/m ²		
			360 m ²	14,4 m ³	800 kg/m ³	11520 kg	10.800,00 €	76.500,00 €
					Gesamtmasse Beton:	43200 kg		
					Gesamtmasse Stahl (Verbindungsmittel+UK):	397 kg		
					Gesamtmasse Stahl (Bewehrung):	2250 kg		
					Gesamtmasse Holz:	124142 kg		
					Gesamtmasse Holz (Verbindungsmittel):	265 kg		
					Gesamtmasse Splittschüttung:	92800 kg		
					Gesamtmasse GKF:	14400 kg		
					Gesamtmasse Mineralwolle:	236,25 kg		
						Gesamtkosten:	284.476,00 €	

Kosten- und Massenvergleich der Systemvarianten

Die Systemvarianten können in Hinblick auf die Kosten wie folgt verglichen werden:

Abbildung 112:
Aufstellung von Kosten und Massen der Systemvarianten

	alle inkl. VM	Variante 01	Variante 02	Variante 03	Variante 04.1	Variante 04.2	Var 00 Stahlbeton
Kostenvergleich	Stützen	14.448,00 €	19.624,00 €	20.306,00 €	31.328,00 €	21.824,00 €	6.022,75 €
	Unterzüge	13.296,00 €	15.888,00 €	15.552,00 €	25.050,00 €	19.866,00 €	5.518,65 €
	Decken	140.380,00 €	84.186,00 €	87.304,00 €	87.304,00 €	166.286,00 €	73.655,42 €
	Treppenhaus	36.000,00 €	36.000,00 €	36.000,00 €	76.500,00 €	76.500,00 €	37.800,00 €
	Gesamtkosten	204.124,00 €	155.698,00 €	159.162,00 €	220.182,00 €	284.476,00 €	122.996,82 €
	Gesamtkosten / qm NGF	296,48 €	226,14 €	231,17 €	319,80 €	413,18 €	178,64 €
	Gesamtkosten / qm BGF	252,00 €	192,22 €	196,50 €	271,83 €	351,20 €	151,85 €
Massenvergleich							
Massenvergleich	Beton	423360,00 kg	216000,00 kg	216000,00 kg	43200,00 kg	43200,00 kg	695692,80 kg
	Stahl Bewehrung	15840,00 kg	10800,00 kg	10800,00 kg	2250,00 kg	2250,00 kg	42288,12 kg
	Stahl VM	331,52 kg	64,78 kg	0,00 kg	381,26 kg	381,26 kg	
	Stahl sonstige	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	15,70 kg	15,70 kg	
	Stahl gesamt	16171,52 kg	10864,78 kg	10800,00 kg	2646,96 kg	2646,96 kg	42288,12 kg
	Holz Tragwerk	56013,51 kg	59810,75 kg	59810,75 kg	89305,89 kg	124142,48 kg	
	Holz VM	0,00 kg	0,00 kg	81,80 kg	301,20 kg	265,20 kg	
	Holz gesamt	56013,51 kg	59810,75 kg	59892,55 kg	89607,09 kg	124407,68 kg	0,00 kg
	Splittschüttung	0,00 kg	92800,00 kg	92800,00 kg	92800,00 kg	92800,00 kg	
	GKF	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	14400,00 kg	14400,00 kg	
	Mineralwolle	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	236,25 kg	236,25 kg	
Gesamtmasse	495545,03 kg	379475,53 kg	379492,55 kg	242890,30 kg	277690,89 kg	737980,92 kg	

In der Gesamtbetrachtung bildet sich ab, dass für die reinen Holzvarianten 4.1 und 4.2 zunächst mit den höchsten Kosten gerechnet werden muss. Als Referenz wurde zusätzlich eine „Variante 0“ in reiner Stahlbetonbauweise herangezogen, die bei weitem die geringsten Kosten erreicht. Diese Unterschiede sind in erster Linie auf die zugrunde gelegten Kostenannahmen zurückzuführen, die für Stahlbeton mit 400 €/m³ und für Brettsperrholz (BSP) mit 1000 €/m³ bzw. Holzbetonverbunddecken (HBV) mit 935 €/m³ angesetzt wurden. Dieser derzeitige Preisvorteil des Stahlbetons schlägt sich bei den näher betrachteten Varianten der Holzbauweisen besonders in der Ausführung der Treppenhauskerne nieder. Der höhere Betonanteil der HBV-Decken in Variante 1 wird davon hingegen nicht beeinflusst.

Anhand der Betrachtung der einzelnen Bauteilgruppen lassen sich weitere Ursachen für die Kostenunterschiede ablesen. Beispielsweise steigen die Kosten für Stützen und Unterzüge in der Ausführungsvariante 4.1, da sich sowohl die Anzahl der Bauteile erhöht als auch zusätzliche Verbindungsmittel,

die Teilweise aus Stahl bestehen, notwendig werden. Daran zeigt sich auch, dass die Ausführung des Treppenhauses in massiver Holzbauweise komplexere Anschlusspunkte erfordert und damit ein zusätzlicher Material- und Kostenaufwand entstehen kann. Für den Fall dieser Modellbetrachtung ist dies wie erwähnt auf anfallende Zuglasten zurückzuführen, die nicht durch Holzverbindungen getragen werden können.

Im Hinblick auf die Decken erreichen die Holzbauteile Kostenwerte, die durchaus im Bereich der konventionelleren Bauweisen liegen. Die hohen Kosten der HBV-Decken sind auf das höhere Volumen aufgrund der größeren Spannweite von 6 m zurückzuführen. Im Vergleich zur Variante 4.2 mit derselben Spannweite, behalten sie allerdings einen Kostenvorteil von ca. 15 %. Die Variante 4.2 erweist sich vor allem auch durch das erheblich höhere Holzvolumen der Decken als unwirtschaftlich. Die kleineren Spannweiten von 3 m in den Varianten 2, 3 und 4.1 erweisen sich entsprechend günstiger.

Auffällig ist besonders im Vergleich der Varianten 2 und 3, dass der Wechsel von Stahl- zu Holzverbindungsmitteln kaum nennenswerte Mehrkosten verursacht. Gegenüber dem Materialpreis der Bauteile spielen die Verbindungsmittel also nur eine untergeordnete Rolle. Da sich die Primärstruktur des Bausystems hauptsächlich in diesem Punkt von konventionellen Holzbauweisen unterscheidet, kann davon ausgegangen werden, dass das System bei ansonsten gleicher Ausführung der Bauteile auch nicht teurer ausfällt.

Die auf die Brutto-Geschossfläche (BGF) bezogenen Gesamtkosten bestätigen dies insofern, als dass die größten Kostensprünge beim Wechsel der Bauteilaufbauten oder deren Dimensionierung auftreten – so zum Beispiel im Vergleich der Varianten 1 und 4.2 bzw. zwischen Variante 4.1 und 4.2.

Allein im Blick auf die Kosten je m²-BGF nähert sich das Bausystem in Variante 4.1 der bereits gängigen Praxis der Ausführung mit HBV-Decken an. Dieser Vergleich ist jedoch dahingehend eingeschränkt, als dass die durch die Tragfähigkeit des HBV ermöglichten Spannweiten auch im Hinblick auf eine erhöhte Grundrissflexibilität gewählt wurden. Für das kleinere Raster der Variante 4.1 ist diese nicht in gleichem Maße gegeben. Entsprechende Entwurfsentscheidungen sind demnach auch als Kostenfaktor zu berücksichtigen.

Dennoch lässt sich festhalten, dass das entwickelte Bausystem hinsichtlich der Primärkonstruktion wirtschaftlich als konkurrenzfähig angesehen werden kann. Zusätzlich besteht durch einen erhöhten Vorfertigungsgrad und einen geringen Montageaufwand weiteres Potenzial, Kostenvorteile auszuschöpfen.

Ein nicht zu vernachlässigendes Argument für die zunächst anfallenden Mehrkosten liefert der Blick auf die Massenbilanz der Varianten. Der notwendige Materialaufwand ist für die Holzbauweisen insgesamt deutlich geringer.

Betrachtet man die Primärbaustoffe Beton, Stahl und Holz, lassen sich erhebliche Reduktionen erzielen. Der eingesetzte Beton beschränkt sich in den Varianten 4.1 und 4.2 lediglich auf die Treppenläufe, die nach Brandschutzanforderungen aus nicht-brennbarem Material hergestellt sein müssen. Obwohl zusätzliche Stahlverbindungsmittel notwendig werden, ist auch die eingesetzte Stahlmenge inklusive der Treppenbewehrung minimal. Ebenso fallen die schall- und brandschutztechnisch notwendigen Materialien kaum ins Gewicht.

Vergleichende Ökobilanzierung der Systemvarianten

In diesem Kapitel werden die ökologischen Folgen der Systemvarianten betrachtet. In diesem Vorhaben werden deswegen die nach heutigem Kenntnisstand wichtigsten Umweltwirkungen in Form einer Reihe von Indikatoren oder Wirkungskategorien ermittelt, die sich auf das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)³² und die für den Wohnungsbau verfügbare Bewertungssystem „Nachhaltiger Wohnungsbau“ (NaWoh)³³ beziehen.

Eine Ökobilanzierung nach DIN ISO 14 040 erfasst und bewertet eine definierbare Gruppe von Umwelteinflüssen eines Produktes oder Prozesses im Verlauf seines Lebens von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Beseitigung. Sie besteht grundsätzlich aus 4 Abschnitten:

- Festlegung des Bilanzraumes und Nennung des Zieles
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Methodik der Ökobilanzierung

Eine ganzheitliche Erfassung aller Umweltfolgen eines Gebäudes zu machen, sprengt den Rahmen des Vorhabens, weil in dieser Forschung nur das Tragwerk der Gebäude betrachtet wird. So werden in der Ökobilanzierung nur die unterschiedlichen Systemvarianten für das Tragwerk des

Methodische Grundlage für die Ökobilanzierung ist die DIN ISO 14 040. Datengrundlage für die Ökobilanzierungen ist die ÖKOBAUDAT-Datenbank (Version ÖKOBAUDAT 2019-III (29.05.2019))³⁴. Als Ökobilanzierungssoftware wurde eLCA eingesetzt.³⁵ Um die in den Modulen erarbeiteten Ergebnisse vergleichbar zu halten, wurde darauf geachtet, dass eine einheitliche Datengrundlage für alle Baumaterialien verwendet wird. Auf diese Weise kann davon ausgegangen werden, dass die Systemgrenzen der Bilanzierungen, die den Baustoffkennwerten zu Grunde liegen gleich sind. Dadurch werden die Ergebnisse vergleichbar. Durch die Homogenisierung der Baustoffkennwerte sollte auch sichergestellt werden, dass die Ergebnisse in jedem Fall qualitativ richtig sind. Durch den Einsatz eines anderen Eingangsdatensatzes ist es möglich, dass sich absolut andere Werte ergeben, weil z.B. die Systemgrenze innerhalb einer Produktionskette anders gesetzt wurde, doch die Verhältnisse der Werte sollten gleich bleiben.

³² Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) Referat Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung 10055 Berlin V.i.S.d.P. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), URL: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/>, Zugriff 2019.11.29.

³³ Bewertungssystem "Nachhaltiger Wohnungsbau", Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau e.V., URL: <https://www.nawoh.de/>, Zugriff: 2019.11.29

³⁴ ÖKOBAUDAT-Datenbank, ÖKOBAUDAT 2019-III (29.05.2019), Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Referat Presse; V.i.S.d.P. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), URL: <https://www.oekobaudat.de/> und <https://www.oekobaudat.de/fileadmin/downloads/0039bf170209mh1.pdf>; Zugriff: 2019.11.29

³⁵ Ökobilanzierungstool eLCA (www.bauteileeditor.de), eLCA v0.9.6, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung Referat II 6 Bauen und Umwelt, URL: <https://www.bauteileeditor.de/imprint/>, Zugriff: 2019.11.29

Die oben beschriebenen Systemvarianten beschreiben keine vollständigen Gebäude, sondern nur unterschiedliche Varianten für das Tragwerk eines Gebäudes. Der Bilanz fehlen folgende Teile der Konstruktion und des Lebenszyklus:

- Ausbau und Fassaden
- Wartung und Instandhaltung
- Betrieb des Gebäudes

Es wird davon ausgegangen, dass alle Systemvarianten eine gleiche Lebenserwartung haben und der Bilanzierungszeitraum mit 50 Jahren angesetzt. Aufgrund der fehlenden Teile der Konstruktion und des Lebenszyklus können die Ergebnisse der Ökobilanzierung nur sehr bedingt mit den im BNB oder NaWoh³⁶ vorgegeben Grenzwerte verglichen werden. An verschiedenen Stellen wird jedoch der Bezug zu den Grenzwerten des NaWohs hergestellt, um die Ergebnisse zu plausibilisieren.

Daraus ergibt sich, dass aus den Lebenswegmodule gemäß DIN EN 15804 nur einige abgebildet und verglichen werden, können:

Abbildung 113:
Lebenswegmodule gemäß DIN EN 15804, Quelle: DIN EN 15804.

Herstellungsphase			Einrichtungsphase		Nutzungsphase					Entsorgungsphase				Vorteile und Belastungen außerhalb
Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Bau/Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Umbau/Erneuerung	Abbruch	Transport	Abfallbewirtschaftung	Deponierung	Wiederverwendung Rückgewinnung Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5					
					B6	Betrieblicher Energieeinsatz								
					B7	Betrieblicher Wassereinsatz								

Als Vergleichswerte für die Ergebnisse der Ökobilanzierung werden die Grenzwerte des NaWoh herangezogen. Allerdings ist ein direkter Vergleich mit den Grenzwerten nicht möglich und nicht sinnvoll, weil die NaWoh-Grenzwerte sich zum einen auf ein komplettes Gebäude beziehen und nicht nur auf die Tragkonstruktion. Die Tragkonstruktion ist unter Umständen (bei hohen energetischen Standards und vergleichsweise emissionsreicher Tragkonstruktion) für die Hälfte der Umweltfolgen verantwortlich.

Zum anderen werden bei der Zertifizierung alle Module, also insbesondere auch Instandhaltung und Betrieb einbezogen. Gerade der Betrieb über einen Zeitraum von 50 Jahren übertrifft bei vielen Gebäuden die Wirkanteile der Konstruktion.

Die Vergleiche mit den NaWoh-Werten dienen allein der Plausibilisierung der Ergebnisse bei vergleichender Ökobilanzierung.

Festlegung von Zielsetzung und des Untersuchungsrahmen der Ökobilanz

Ziel der Ökobilanzierung ist hier die vergleichende Betrachtung der Umweltfolgen der Herstellung der verschiedenen Systemvarianten über einen Zeitraum von 50 Jahren. Dabei beschränkt sich die Betrachtung auf die Errichtung der oberirdischen Primärkonstruktion. Der Betrieb und die Instandhaltung der Gebäude finden an dieser Stelle keine Berücksichtigung.

Gegenstand der Ökobilanzierung ist eine vergleichende Betrachtung der Umweltfolgen der Errichtung von Systemvarianten eines Tragwerks über einen Zeitraum von 50 Jahren. Dabei stehen die Fragestellungen im Vordergrund:

- Wie unterscheidet sich die Systemvarianten?
- Wie unterscheiden sich die Systemvarianten von konventionellen Gebäuden?

Zur Beantwortung der letzten Frage wurde zu den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Systemvarianten noch eine Referenz hinzugefügt, die das Tragwerk aus Stahlbeton (VAR 0) abbildet, und die damit einen gebräuchlichen Standard im heutigen Bauen repräsentiert.

Sachbilanz

Die Beschreibung der Systemvarianten findet sich im vorigen Abschnitt 8.1. Systemvarianten.

Aus der Geometrie und den in der ÖKOBAUDAT hinterlegten Materialwerten wurden die spezifischen Gewichte ermittelt:

Abbildung 114:
Sachbilanz Systemvarianten, Eingabe und graphische Auswertung:
DGJ Architektur GmbH, 2019.

	alle inkl. VM	Variante 01	Variante 02	Variante 03	Variante 04.1	Variante 04.2	Var 00 Stahlbeton
Massenvergleich	Beton	423360,00 kg	216000,00 kg	216000,00 kg	43200,00 kg	43200,00 kg	695692,80 kg
	Stahl Bewehrung	15840,00 kg	10800,00 kg	10800,00 kg	2250,00 kg	2250,00 kg	42288,12 kg
	Stahl VM	331,52 kg	64,78 kg	0,00 kg	381,26 kg	381,26 kg	
	Stahl sonstige	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	15,70 kg	15,70 kg	
	Stahl gesamt	16171,52 kg	10864,78 kg	10800,00 kg	2646,96 kg	2646,96 kg	42288,12 kg
	Holz Tragwerk	56013,51 kg	59810,75 kg	59810,75 kg	89305,89 kg	124142,48 kg	
	Holz VM	0,00 kg	0,00 kg	81,80 kg	301,20 kg	265,20 kg	
	Holz gesamt	56013,51 kg	59810,75 kg	59892,55 kg	89607,09 kg	124407,68 kg	0,00 kg
	Splittschüttung	0,00 kg	92800,00 kg	92800,00 kg	92800,00 kg	92800,00 kg	
	GKF	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	14400,00 kg	14400,00 kg	
	Mineralwolle	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	236,25 kg	236,25 kg	

Die Daten der Gebäude wurden mit der im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Tabellenkalkulation anhand von Zeichnungen und Beschreibungen ermittelt.

Zusätzlich zur Primärkonstruktion werden für einige Bauteile – hier für Deckenelemente und die Konstruktion der Treppenhauskerne – schall- und brandschutztechnisch notwendige Bauteilschichten berücksichtigt, da diese im Bauteilaufbau der HBV-Decken (Variante 01) bzw. der Stahlbeton-Treppenhäuser bereits integriert sind. Auf diesem Wege werden vergleichbare Funktionalitäten bewertet. Bei den Stahlbeton-Bauteilen kann auf zusätzlichen Maßnahmen zum Schallschutz über den ohnehin erforderlichen Trittschalldämmung und Estrich hinaus, verzichtet werden. Bei den Holzdecken hingegen muss die fehlende Masse der Bauteile durch eine zusätzliche Schüttung aufgebaut werden. Diese Maßnahmen werden in der Bilanz berücksichtigt.

Wirkabschätzung

Im nächsten Schritt werden die ökologischen Folgen anhand der folgenden Indikatoren beschrieben:

GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) [kg-CO ₂ -Äqv.]
ODP	Ozonabbaupotenzial ODP [kg R11-Äqv.]
POPC	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial POCP [kg Ethen-Äqv.]
AP	Versauerungspotenzial AP [kg SO ₂ -Äqv.]
EP	Eutrophierungspotenzial EP [kg PO ₄ -Äqv.]
PE Gesamt	Gesamt Primärenergie PE [MJ] Ges.
PENRT	Total erneuerbare Primärenergie [MJ]
PENRM	Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung [MJ]
PENRE	Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger [MJ]
PERT	Total erneuerbare Primärenergie [MJ]
PERM	Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung [MJ]
PERE	Erneuerbare Primärenergie als Energieträger [MJ]

Im NaWoh werden folgende Ökobilanz-Indikatoren für die entsprechenden Lebenszyklusmodule gemäß DIN EN 15804 bewertet:

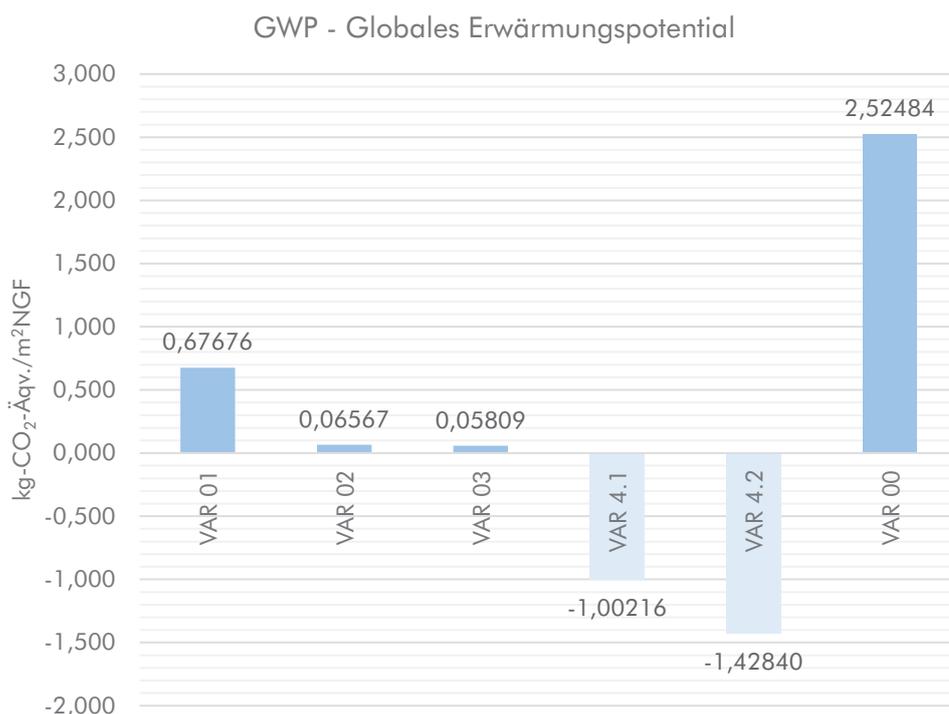
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP)
ODP	Ozonabbaupotenzial ODP [kg R11-Äqv.]
POCP	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial POCP [kg Ethen-Äqv.]
AP	Versauerungspotenzial AP [kg SO ₂ -Äqv.]
EP	Eutrophierungspotenzial EP [kg PO ₄ -Äqv.]
PE Ges.	Gesamt Primärenergie PE [MJ] Ges.
PENRT	Total erneuerbare Primärenergie [MJ]
PERT	Total erneuerbare Primärenergie [MJ]

Einzelbetrachtung der Indikatoren für die Systemvarianten

Treibhauspotenzial (GWP [kgCO₂eq])

Das Treibhauspotential (Global Warming Potential (GWP)) gibt an, in welchem Maß die Emissionen (Vor allem Kohlendioxid, Methan, Lachgas und andere flüchtige Kohlenwasserstoffe) in die Atmosphäre gelangen und dort die Aufheizung des Klimas beeinflussen. Die Treibhausgase bewirken, dass ein Teil der Wärmestrahlung, die entsteht, wenn das Sonnenlicht auf die Erdoberfläche trifft und dort zu langwelliger Infrarotstrahlung umgewandelt wird, an den oberen Schichten der Atmosphäre reflektiert und wieder auf die Erde zurückgeworfen wird. Die Wärmeenergie bleibt dadurch in der Atmosphäre gefangen und die Temperaturen auf der Erde steigen. Dieser Effekt wird durch die Treibhausgase, die sich in der reflektierenden Schicht ansammeln, verstärkt. Dadurch wird immer mehr Wärmestrahlung auf die Erde reflektiert. Die Erdoberfläche heizt sich stärker auf. Die Wirkung dieser Emissionen wird als Kohlendioxid-Äquivalente angegeben und entsprechend umgerechnet. 10kg CO₂-Ausstoß entsprechen dabei etwa der Aufbereitung und Verbrennung von 3L Heizöl.

Abbildung 115:
Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.



Ergebnis / Vergleich der Systemvarianten

Alle Systemvarianten (VAR 01 bis VAR 4.2.) zeigen ein deutlich geringes Treibhauspotential als die Vergleichsvariante VAR 0. Die beiden Nur-Holz-Varianten VAR 4.1. und VAR 4.2. zeigen sogar ein deutlich negatives Treibhauspotential. Auch VAR 02 und VAR 03 mit einem hohen Holzanteil haben ein nur knapp positives Treibhauspotential von 0,05 kg CO₂-Äqu. / (m²NRF*a).

Dies erklärt sich aus dem negativer Treibhauspotential bei nachwachsenden Rohstoffen: Nachwachsende Rohstoffe lagern während ihrer Wachstumsphase CO₂ ein. Das CO₂ in ihnen wurde zuvor der Atmosphäre entzogen, so dass es möglich ist, dass ein Haus über seinen gesamten Lebensweg weniger CO₂ an die Atmosphäre abgibt, als in seinen Baustoffen gespeichert ist³⁷. In der Bilanz wird das gespeicherte CO₂ mit dem entstehenden CO₂ durch die Produktion anderer Baumaterialien und durch den Betrieb des Hauses verrechnet. Das CO₂ wird nach der Nutzungsphase bei der Verbrennung oder Verrottung der Materialien wieder freigesetzt, wobei es bei der Verbrennung wieder zur Energieerzeugung genutzt wird (thermisches Recycling).

Zur Plausibilisierung der ermittelten Werte können die Bezugswerte aus der NaWoh-Zertifizierung herangezogen werden (Werte für kompletten Gebäuden und allen Modulen der Ökobilanz)³⁸

Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau NaWoh

- Mehrfamilienhäuser - Neubau
- Hauptkriteriengruppe Ökologische Qualität
- Kriterium Ökobilanz – Teil 1
- Indikator 3.1.1 Treibhauspotenzial³⁹

	Stufe	Wert	Einheit
Treibhauspotenzial GWP	Deutlich übererfüllt	12	kg CO ₂ -Äqu. / (m ² NRF*a)
	übererfüllt	17	kg CO ₂ -Äqu. / (m ² NRF*a)
	erfüllt	24	kg CO ₂ -Äqu. / (m ² NRF*a)

Der Wert von 2,52 kg CO₂-Äqu. / (m²NRF*a) für die VAR 0 scheint plausibel, wenn man bedenkt, dass dies nur einen Teil der Baukonstruktion ohne Instandhaltungsaufwand abbildet und der Betrieb komplett entfällt.

³⁷ Pohlmann, Cevin Marc: Ökologische Betrachtungen für den Holzbau. Dissertation vorgelegt am Fachbereich Biologie der Universität Hamburg, Hamburg 2002, S.71.

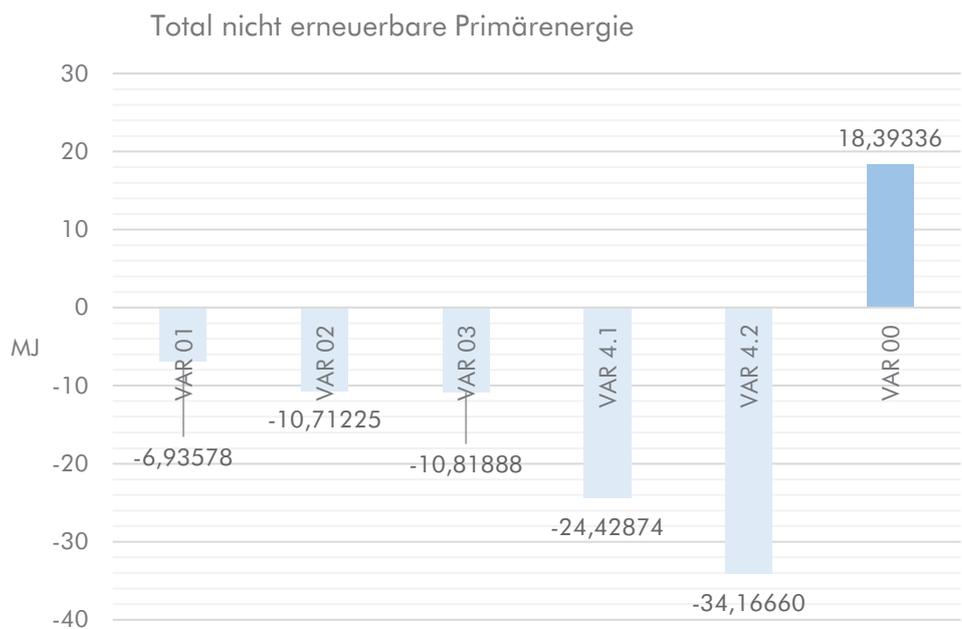
³⁸ Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

³⁹ Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

Primärenergiebedarf nicht erneuerbar

Der Primärenergieinhalt stellt im Allgemeinen die gesamte Herstellungsenergie dar, die für die Produktion eines Materials benötigt wird. Es werden dabei sowohl die Energiegehalte der Rohstoffe als auch die weiteren Energieeinträge durch die Bearbeitung und Umwandlung der Rohstoffe in das Endprodukt ermittelt. Unterschieden wird in erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergiegehalte der Materialien. Nicht erneuerbare Energie wird bei der Herstellung aufgewendet, aber nicht mehr im Material gespeichert, weil sie z.B. als Abwärme in der Produktion abgeht.

Abbildung 116:
 Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.



Die negativen Werte für die Varianten mit den hohen Holzanteilen erklären sich aus der Bilanzierungsmethode: Zur Produktion von Holzbauteilen ist relativ wenig Primärenergie erforderlich. Ferner wird davon ausgegangen, dass die Holzbauteile am Ende des Lebenszyklus nicht erneuerbaren Energieträger ersetzen. Es ließe sich durchaus darüber diskutieren, ob in Hinblick auf einen immer höheren Anteil an erneuerbaren Energie im Energiemix davon auszugehen ist, dass diese Substitution für ein Bauteil, das heute eingebaut und in 50 Jahren nachgenutzt wird, so ohne weiteres angesetzt werden kann. Hier muss vermutlich die heute gebräuchliche Bewertungsmethode früher oder später angepasst werden. Dennoch kann man feststellen, dass der geringe Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie einen deutlichen ökologischen Vorteil darstellt.

Zur Plausibilisierung der ermittelten Werte können die Bezugswerte aus der NaWoh-Zertifizierung herangezogen werden (Werte für kompletten Gebäuden und allen Modulen der Ökobilanz)⁴⁰

Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau NaWoh

- Mehrfamilienhäuser - Neubau
- Hauptkriteriengruppe Ökologische Qualität
- Kriterium Ökobilanz – Teil 1
- Indikator 3.1.2 Primärenergiebedarf nicht erneuerbar:

	Stufe	Wert	
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar	Deutlich übererfüllt	55 kWh / (m ² NRF*a)	198 MJ / (m ² NRF*a)
	übererfüllt	75 kWh / (m ² NRF*a)	270 MJ / (m ² NRF*a)
	erfüllt	105 kWh / (m ² NRF*a)	378 MJ / (m ² NRF*a)

Der Wert von 18,39kg MJ / (m²NRF*a) für die VAR 0 scheint plausibel, wenn man bedenkt, dass dies nur einen Teil der Baukonstruktion ohne Instandhaltungsaufwand abbildet und der Betrieb komplett entfällt.

⁴⁰ Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

Primärenergiebedarf erneuerbar

Erneuerbare Primärenergie kann aus dem Material, z.B. durch Verbrennen, wieder gewonnen werden.

Abbildung 117:

Verbrauch an erneuerbarer Endenergie. Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.

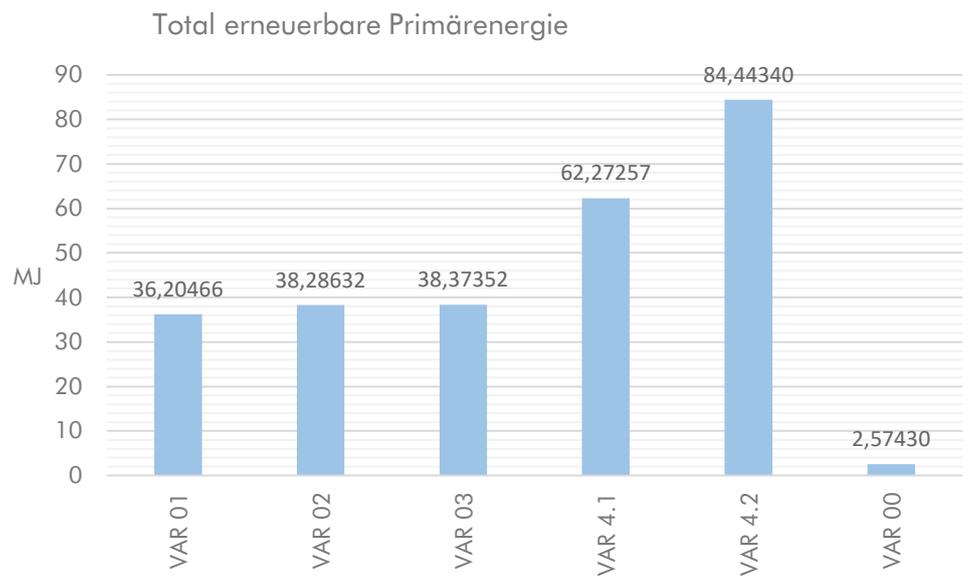
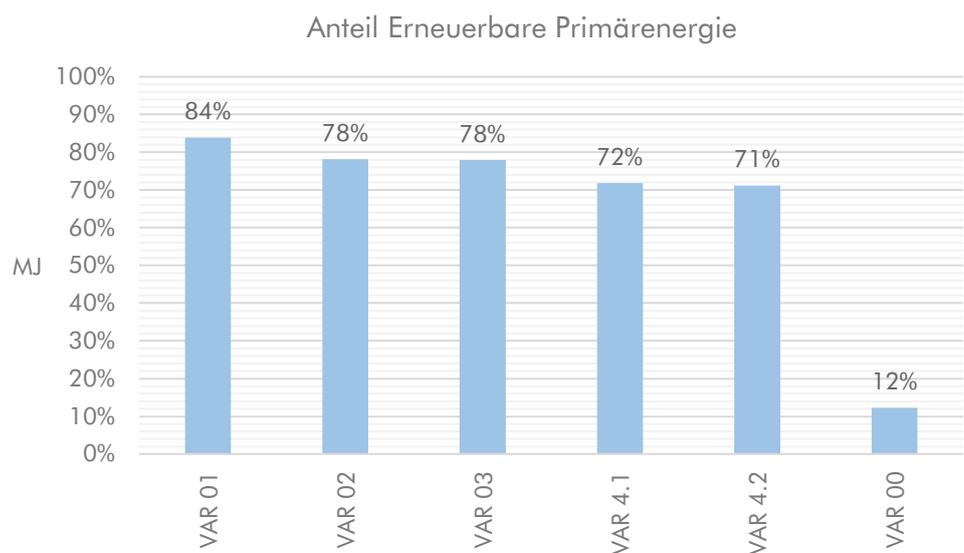


Abbildung 118:

Anteil an erneuerbarer Endenergie am gesamten Verbrauch von Endenergie. Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.



Die Ergebnisse zeigen, dass die Holz-Varianten überwiegend erneuerbare Energie einsetzen. Dabei erhöht sich folgerichtig auch die Menge an erneuerbarer Energie mit dem Anteil an Holz in der Konstruktion.

Zur Plausibilisierung der ermittelten Werte können die Bezugswerte aus der NaWoh-Zertifizierung herangezogen werden (Werte für kompletten Gebäuden und allen Modulen der Ökobilanz)⁴¹

Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau NaWoh

- Mehrfamilienhäuser - Neubau
- Hauptkriteriengruppe Ökologische Qualität
- Kriterium Ökobilanz – Teil 1
- Indikator 3.1.2 Primärenergiebedarf nicht erneuerbar:

	Stufe	
Primärenergiebedarf erneuerbar	Deutlich übererfüllt	PE _{e,G} / PE _{ges,G} = 0,25 (erneuerbarer Primärenergieanteil mind. 25 %)
	übererfüllt	PE _{e,G} / PE _{ges,G} = 0,15 (erneuerbarer Primärenergieanteil mind. 15 %)
	erfüllt	PE _{e,G} / PE _{ges,G} = 0,075 (erneuerbarer Primärenergieanteil mind. 7,5 %)

Bewertet werden also nicht der absolute Verbrauch an erneuerbarer Primärenergie, sondern der Anteil an erneuerbarer Primärenergie am gesamten Verbrauch von Primärenergie.

Diese Bewertungsmethodik hat den Nachteil, dass auch Gebäude mit hohem absoluten Energieverbrauch bei dieser Bewertung gut abschneiden, wenn von diesem Verbrauch ein entsprechender Anteil aus erneuerbaren Quellen gedeckt wird. Dies trägt der Begrenztheit der erneuerbaren Quellen nicht ausreichend Rechnung.

Alle Systemvarianten zeigen einen hohen Anteil an erneuerbarer Primärenergie. Durch die restliche Baukonstruktion und die anderen Module werden sich die Werte aber verschlechtern, wenn man ein komplettes Gebäude im Lebenszyklus betrachten würde.

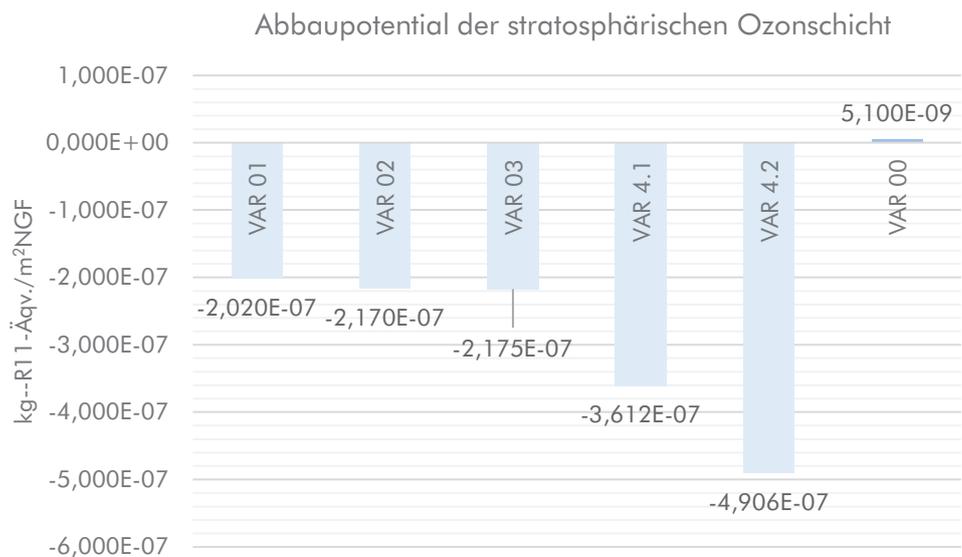
⁴¹ Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

Ozonabbaupotential ODP [kgR11eq]

Das Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential) gibt an, inwieweit die Emissionen den Abbau der Ozonschicht fördern. Die Ozonschicht liegt in der oberen Teil der Atmosphäre und filtert UV-Strahlung aus der auf die Erde treffenden Sonnenstrahlung. Besonders langkettige Halogenkohlenwasserstoffe Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKWs) bewirken die Zersetzung des Ozons, was eine verstärkte UV-Strahlung auf der Erde zur Wirkung hat.

Die Werte werden an der Bezugsgröße Trichlorfluormethan R11 (CCI3F oder FCKW 11) angegeben. Je negativer die angegebenen Werte sind, umso schädlicher ist die Konstruktion.

Abbildung 119: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.



Zur Plausibilisierung der ermittelten Werte können die Bezugswerte aus der NaWoh-Zertifizierung herangezogen werden (Werte für kompletten Gebäuden und allen Modulen der Ökobilanz)⁴²

	Stufe	Wert	Einheit
Ozonschichtabbaupotenzial	akzeptabel	2,0*10-6	kg CFC11-Äqu. / (m²NRF*a)
	gut	1,0*10-6	kg CFC11-Äqu. / (m²NRF*a)
	sehr gut	7,0*10-7	kg CFC11-Äqu. / (m²NRF*a)

⁴² Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

Sommersmogpotential POCP [kgC2H4eq]

Das Sommersmogpotential (Photochemical Oxidant Creating Potential, Bildung von bodennahem Ozon) gibt über die Konzentration von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen, Auskunft darüber, wieviel bodennahes Ozon durch den Einfluss von kurzwelligem Licht (UV-Strahlung) entsteht. Ozon reizt die Schleimhäute und kann chronische Atemwegserkrankungen hervorrufen. Ausgewiesen wird der Wert durch die Bezugsgröße Ethan (C2H4).

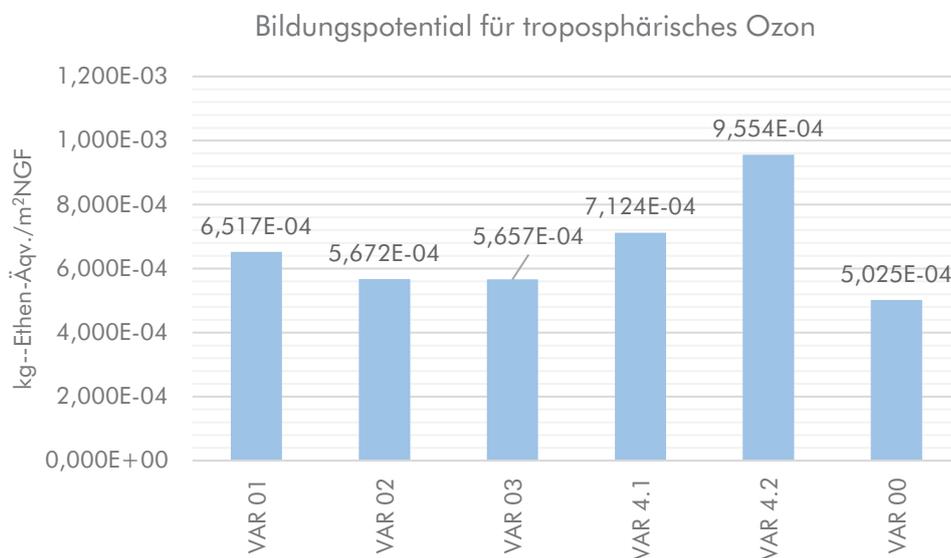


Abbildung 120: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.

Zur Plausibilisierung der ermittelten Werte können die Bezugswerte aus der NaWoh-Zertifizierung herangezogen werden (Werte für kompletten Gebäuden und allen Modulen der Ökobilanz)⁴³

	Stufe	Wert	Einheit
Ozonbildungspotenzial	akzeptabel	2,0*10-6	kg C2H4-Äqu. / (m²NRF*a)
	gut	1,0*10-6	kg C2H4-Äqu. / (m²NRF*a)
	sehr gut	7,0*10-7	kg C2H4-Äqu. / (m²NRF*a)

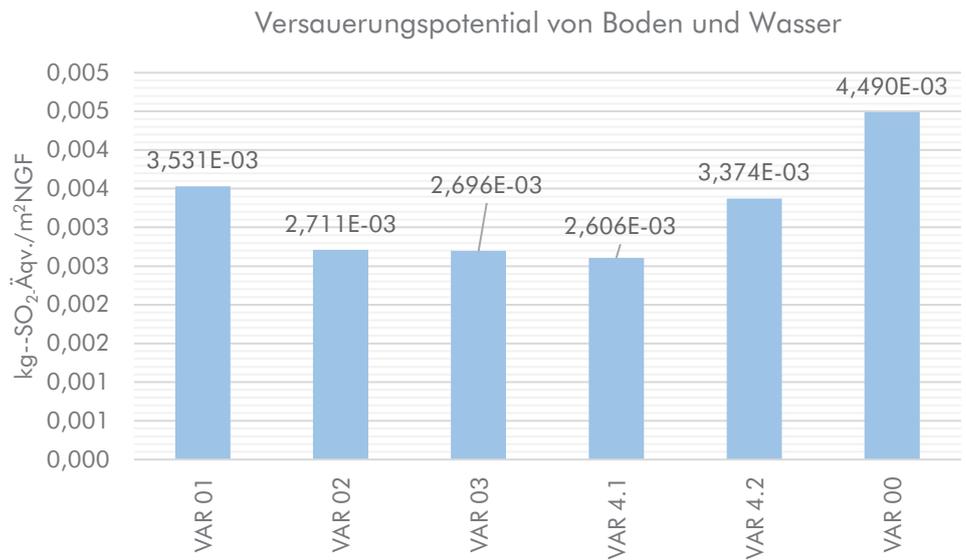
Es ist zu erkennen, dass alle Systemvarianten nur einen Bruchteil der Grenzwerte an Emissionen verursachen. Von einem signifikanten Einfluss der Konstruktionen für diesen Indikator ist nicht auszugehen.

⁴³ Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

Versauerungspotential AP [kgSO2eq]

Das Versauerungspotential (Acidification Potential) gibt an wie viele Emissionen, die bei der Herstellung der Materialien entstehen, aus der Atmosphäre gewaschen werden, sauren Niederschlag geben. Vor allem Schwefeldioxid aber auch Stickoxide bilden in Verbindung mit Wasser schwefelige Säure und Salpetersäure, die dann als saurer Regen zur Erde gelangen. Böden und bodennahes Wasser verändern dadurch ihren natürlichen PH-Wert. Auch beregnete Materialien können unter dem Einfluss der Säure leiden. Gemessen werden die Werte an der Bezugsgröße Schwefeldioxid (SO2).

Abbildung 121: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.



Zur Plausibilisierung der ermittelten Werte können die Bezugswerte aus der NaWoh-Zertifizierung herangezogen werden (Werte für kompletten Gebäuden und allen Modulen der Ökobilanz)⁴⁴

	Stufe	Wert	Einheit
Versauerungspotenzial AP	akzeptabel	0,07	kg SO2-Äqu. / (m²NRF*a)
	gut	0,05	kg SO2-Äqu. / (m²NRF*a)
	sehr gut	0,035	kg SO2-Äqu. / (m²NRF*a)

⁴⁴ Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

Überdüngungspotential EP [kgPO₄³eq]

Das Überdüngungspotential (Eutrophication Potential) gibt an, wie viele überschüssige Nährstoffe bei der Produktion von Materialien in das Ökosystem gelangen. Die Überdüngung führt zu einem Ungleichgewicht des Ökosystems und bringt Gewässer zum Umkippen. Des Weiteren kann Wasser durch die Überdüngung mit schädlichen Substanzen wie Nitrit belastet werden und über die Nahrungskette zu Lebensmittelvergiftungen führen. Gemessen werden die Werte an der Bezugsgröße Phosphat (PO₄).

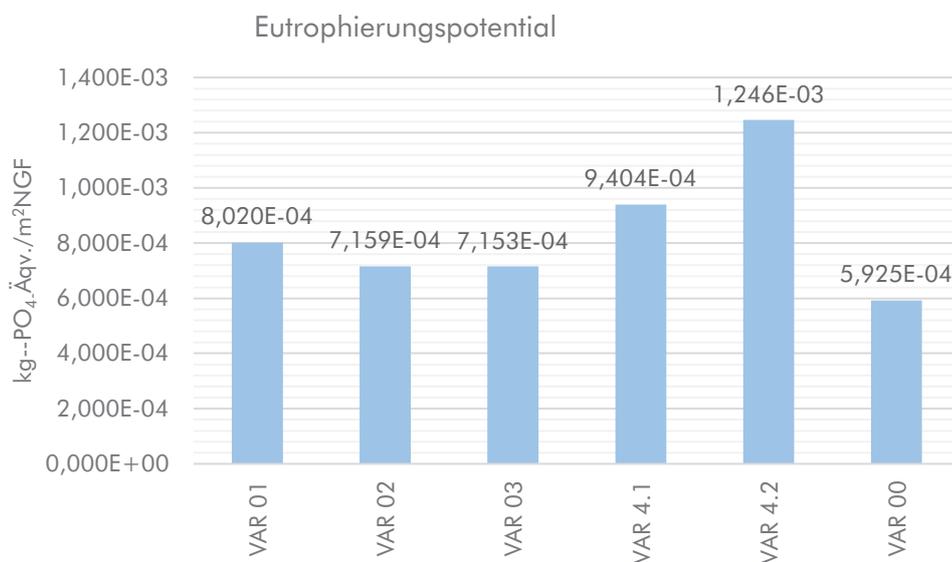


Abbildung 122:
Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.

Zur Plausibilisierung der ermittelten Werte können die Bezugswerte aus der NaWoh-Zertifizierung herangezogen werden (Werte für kompletten Gebäuden und allen Modulen der Ökobilanz)⁴⁵

	Stufe	Wert	Einheit
Überdünnungspotenzial EP	akzeptabel	0,07	kg PO ₄ -Äqu. / (m ² NRF*a)
	gut	0,05	kg PO ₄ -Äqu. / (m ² NRF*a)
	sehr gut	0,035	kg PO ₄ -Äqu. / (m ² NRF*a)

Erkennbar ist, dass die Dimensionen mit dem steigenden Holzanteil zunehmen. Bei der VAR 4.2. macht der Wert schon 35,9% des zulässigen Bestwertes für die NaWoh-Zertifizierung aus, so dass eine Einhaltung bei Einbeziehung aller Module des Lebenszyklus des Gebäudes und der restlichen Konstruktion vermutlich überschritten wird.

⁴⁵ Kriteriensteckbriefe des Qualitätssiegels NaWoh, https://www.nawoh.de/uploads/pdf/kriterien/v_3_1/3-Oekologische_Qualitaet_3_1.pdf, Zugriff 2019.11.29

Gesamtübersicht aller Indikatoren der Ökobilanzierung

Abschließend lassen sich alle Varianten in Hinblick auf alle Indikatoren vergleichen:

Abbildung 123: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.

Varianten		VAR 01	VAR 02	VAR 03	VAR 4.1	VAR 4.2	VAR 00 Stahlbeton	Einheit bezogen auf m ² NGF
Indikator	Gesamt	Gesamt	Gesamt	Gesamt	Gesamt	VAR 00		
Ökobilanzierung nach eLCA	GWP	0,67676	0,06567	0,05809	-1,00216	-1,42840	2,52484	kg CO ₂ -Äqv.
	ODP	-2,020E-07	-2,170E-07	-2,175E-07	-3,612E-07	-4,906E-07	5,100E-09	kg R11-Äqv.
	POCP	6,517E-04	5,672E-04	5,657E-04	7,124E-04	9,554E-04	5,025E-04	kg Ethen-Äqv.
	AP	3,531E-03	2,711E-03	2,696E-03	2,606E-03	3,374E-03	4,490E-03	kg SO ₂ -Äqv.
	EP	8,020E-04	7,159E-04	7,153E-04	9,404E-04	1,246E-03	5,925E-04	kg PO ₄ -Äqv.
	PE Ges.	29,26888	27,57407	27,55464	37,84383	50,27680	20,96766	MJ
	PENRT	-6,93578	-10,71225	-10,81888	-24,42874	-34,16660	18,39336	MJ
	PENRM	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	MJ
	PENRE	-6,94237	-10,71928	-10,82591	-24,44030	-34,18233	18,39336	MJ
	PERT	36,20466	38,28632	38,37352	62,27257	84,44340	2,57430	MJ
	PERM	0,01253	0,01335	0,01352	0,02253	0,03038	0,00000	MJ
	PERE	36,25806	38,34324	38,43048	62,36637	84,57092	2,57430	MJ
	ADP elem.	4,995E-06	3,520E-06	3,420E-06	1,139E-05	1,278E-05	3,803E-06	kg Sb-Äqv.
	ADP fossil	0,61484	-2,29823	-2,38316	-9,43758	-13,70685	15,79336	MJ

Fazit der Ökobilanzierung

In der Gesamtbetrachtung wird deutlich, dass die Systemvarianten der konventionellen Betonkonstruktion in Hinblick auf fast alle Indikatoren überlegen sind. Insbesondere beim Treibhauspotential (GWP) und dem Primärenergieverbräuchen schneiden die Holz-Systeme deutlich besser ab.

Weiter lässt sich erkennen, dass die Emissionen mit dem zunehmenden Anteil von Beton im Tragwerk (VAR 01 enthält mehr Stahlbeton als VAR 02 und 03. Die Varianten VAR 4.1 und VAR 4.2 sind ohne Stahlbeton konstruiert und verursachen über alle Indikatoren hinweg betrachtet die geringsten Emissionen.

RESSOURCEN, RÜCKBAUBARKEIT UND REZYKLIERBARKEIT

Ausgangslage: Stand von Forschung und Technik

Die Entwicklung von rückbaubaren, recyclingfähigen Baukonstruktionen adressiert drei wesentliche Dimensionen des nachhaltigen Bauens:

Reduktion des Ressourcenverbrauchs:

- Verringerung des Verbrauchs von Ressourcen (auch durch die Substitution von nicht-nachwachsenden durch nachwachsende Materialien, die aber nicht unbedingt verknüpft ist mit der Frage der Rezyklierbarkeit)
- Kreislaufwirtschaft (Circular Economy)

Reduktion der Umweltfolgen:

- Verringerung der Emissionen, die bei der Produktion von Neu-Material entstehen, wenn dieses durch Rezyklate ersetzt wird
- Verringerung der Abfallmengen
- Reduktion der Lebenszykluskosten

Ein Großteil des Abfallaufkommens (ca. 53% in 2017) entsteht im Baubereich.⁴⁶ 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 fortwährend unterschiedlichere Materialien immer inniger konstruktiv gefügt. Diese sogenannten Komposit-Baustoffe bestehen aus einer Vielzahl von Ausgangsstoffen, die mit nicht löslichen 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.

Im Jahr 2013 wurden rund 7,6 Millionen Tonnen Altholz verarbeitet, davon etwa 6,1 Millionen Tonnen energetisch in Großfeuerungsanlagen und 1,5 Millionen Tonnen zur Herstellung von Spanplatten stofflich verwertet.

Auch im heutigen Holzbau werden zunehmend Klebstoffe, Stahl und Beton verwendet, um die Tragfähigkeit, den Feuerwiderstand und die Dauerhaftigkeit zu verbessern. Auch wenn die Hybridisierung zu neuen Einsatzmöglichkeiten führt, gehen auch positive Eigenschaften des Holzbaus verloren. Die Verbundstoffe lassen sich schwerer sortenrein trennen und rezyklieren. Reine Holzkonstruktionen lassen sich wiederverwenden (Recycling, Downcycling zu Holzwerkstoffen). Die sortenreine Trennung, die eine wichtige Voraussetzung für ein stoffliches Recycling oder eine Kompostierung wäre, ist somit in der Praxis nicht mehr möglich.

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt adressiert zwei wesentliche Herausforderungen des nachhaltigen Bauens: Die Erhöhung des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen (Holz) in modernen Bauweisen und die Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Baumaterialien. Das Ziel des Vorhabens soll erreicht werden, indem eine neue prototypische Holz-Bauweise entwickelt wird, die fast ausschließlich aus Holz besteht und zerstörungsfrei zurückgebaut werden kann. Dafür müssen die Konstruktionen mit lösbaren Verbindungen gefügt und die Materialien möglichst sortenrein zu trennen sein. Das zu entwickelnde Bausystem muss alle Anforderungen an das zeitgenössische Bauen erfüllen, sodass es über eine hohe Wärmedämmwirkung und Lebenserwartung verfügt.

Grundsätzlich lässt sich die Rezyklierbarkeit eines Gebäudes auf zwei Ebenen betrachten:

- Auf der Ebene der eingesetzten Materialien stellt sich die Frage, ob und wenn ja, wie gut sich die eingesetzten Baustoffe sich zur Wiederverwendung eignen.
- Diese Frage ist eng verknüpft mit dem konstruktiven Einsatz der Baustoffe. So kann die Rezyklierbarkeit eingeschränkt werden durch:
 - Die Konstruktion eine Trennung der Materialien erschwert oder verunmöglicht (z.B. Verklebung von unterschiedlichen Materialien).
 - Der Aufwand für den Rückbau und die Trennung der einzelnen Bauteile/ Fraktionen zu hoch und damit die Wiederverwendung unwirtschaftlich wird

Bewertung der Rezyklierbarkeit auf Material-Ebene

Auf der Ebene der Materialien unterscheidet man biologische Materialien (Holz, Hanf, Wolle...) und technische Materialien (mineralische Baustoffe, Metalle, Kunststoffe). In Cradle to Cradle erklären Braungart und McDonough (Braungart, McDonough; 2002; 103ff.), dass eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft auf einer strikten Trennung von biotischen und technischen Stoffkreisläufen basieren muss, weil die Vermengung die Leistungsfähigkeit beider Kreislauf-Systeme verringert. Für den Baubereich besteht darin eine große Herausforderung, weil fast immer biotische und technische Materialien zusammen eingebaut werden. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von metallischen Verbindungsmitteln, die durch die form- und kraftschlüssigen Holzverbindungen reduziert werden kann.

Grundsätzlich bietet das entwickelte Bausystem ideale Voraussetzung für einen geringen Ressourcen-Verbrauch: Holz ist der einzige nachwachsende Baustoff, der lokal in großen Mengen vorhanden ist sowie nachhaltig produziert wird. In Hinblick auf die Schonung der Ressourcen und den Klimawandel ist Holz das geeignetste Baumaterial. Holz belastet die Ressourcen und die Umwelt im Hinblick auf Emissions- und Abfallaufkommen weniger als nicht-nachwachsende Baustoffe.

Auch wenn die Bauteile aus dem Bausystem schadensfrei zurückgebaut werden können, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Bauteile innerhalb des Systems wiederverwendet werden gering. Der Grund dafür ist vor allem, dass in einem offenen System die einzelnen Anwendungen zu individuellen Maßen und Dimensionierung führen. Nur in geschlossenen Systemen wiederholen sich die Bauteile so häufig, weil es nur eine begrenzte Anzahl von wiederkehrenden Maßen gibt. Aber auch bei den geschlossenen Systemen zeigte sich bei den historischen Beispielen (Mero-System), dass es selbst bei einem weit verbreiteten System mit hochwertigen Komponenten nur in Ausnahmefällen zu einem Rückbau und Wiedereinbau kam. Grund dafür sind auch die langen Lebenszyklen der Gebäude. Wenn es zum Rückbau kommt, hat die Technik und der Markt sich so weiter entwickelt, dass ein erneuter Einbau des dann 40 Jahre alten System-Komponente nicht mehr sinnvoll ist. Ausnahmen bilden deswegen nur Systeme für den temporären Einsatz, wie Gerüste, Schalungen, Messebau oder Bühnentechnik, die häufig wiederverwendet werden, weswegen die Systeme auch ausgereifter sind. Es ist also nicht wahrscheinlich, dass die einzelnen Komponenten nicht innerhalb des Systems weiterverwendet werden. Umso wichtiger ist es also, dass die optimalen Voraussetzungen geschaffen werden, damit die Bauteile stofflich als Altholz wiederverwendet werden können. Dies ist möglich, wenn die Holzbauteile nicht mit Fremdstoffen vermischt sind.

Gesetzliche Grundlage für die Beurteilung der Qualität des anfallenden Altholz ist die Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV). Die Kategorisierung des Altholzes richtet sich danach ob das Altholz mit Fremdstoffen versetzt ist:

Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV)

Im Sinne dieser Verordnung bedeuten die Begriffe

1. Altholz:

Industrierestholz und Gebrauchtholz, soweit diese Abfall im Sinne des § 3 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sind;

2. Industrierestholz:

die in Betrieben der Holzbe- oder -verarbeitung anfallenden Holzreste einschließlich der in Betrieben der Holzwerkstoffindustrie anfallenden Holzwerkstoffreste sowie anfallende Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent);

3. Gebrauchtholz:

gebrauchte Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent);

4. Altholzkategorie:

Altholzkategorie A I:

naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde,

b) Altholzkategorie A II:

verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel,

c) Altholzkategorie A III:

Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel,

d) Altholzkategorie A IV:

mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz, wie Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen, Rebpfähle, sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz;

5. PCB-Altholz:

Altholz, das PCB im Sinne der PCB/PCT-Abfallverordnung ist und nach deren Vorschriften zu entsorgen ist, insbesondere Dämm- und Schallschutzplatten, die mit Mitteln behandelt wurden, die polychlorierte Biphenyle enthalten;⁴⁷

Für das Bausystem wird keilgezinktes Vollholz und Vollholz nach DIN EN 15497:2014 (KVH Konstruktionsvollholz, KVH ist ein Produktname für ein normiertes Konstruktionsholz) verwendet, das folgende Anforderungen erfüllt:

Für keilgezinktes Konstruktionsvollholz KVH

DIN EN 15497: 2014-07 Holzbauwerke Keilgezinktes Vollholz - Anforderungen mit

DIN 20000-7: 2015-08 Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 7: Keilgezinktes Vollholz für tragende Zwecke nach DIN EN 15497

DIN EN 1912:2013-10 Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten

DIN 4074-1:2012-06 Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit, Nadelschnittholz

VOB ATV DIN 18334: 2012-09 Zimmer- und Holzarbeiten

Vereinbarung zwischen Holzbau Deutschland, Bund Deutscher Zimmermeister im ZDB und der Überwachungsgemeinschaft Konstruktionsvollholz e.V. über Konstruktionsvollholz KVH® aus Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche und Douglasie (Fassung September 2015).

Für nicht keilgezinktes Konstruktionsvollholz KVH

DIN EN 14081: 2011-05 Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen mit

DIN 20000-5: 2012-03 Anwendungen von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 5: Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt

DIN EN 1912:2013-10 Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten

DIN 4074-1:2012-06 Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit, Nadelschnittholz

VOB ATV DIN 18334: 2012-09 Zimmer- und Holzarbeiten

Vereinbarung zwischen Holzbau Deutschland, Bund Deutscher Zimmermeister im ZDB und der Überwachungsgemeinschaft Konstruktionsvollholz e.V. über Konstruktionsvollholz KVH® aus Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche und Douglasie (Fassung September 2015).⁴⁸

Im Bausystems kommt KVH und BSH zum Einsatz, bei dem meist von einem Leim-Anteil im Rohmaterial auszugehen ist. So werden die Holzprofile in einer kontinuierlichen Fertigung hergestellt, die durch Keilverzinkung verlängert wird. Der Grund für diese Materialwahl ist, dass es sich um das am weitesten verbreitete Bauholz handelt, bei dem durch die Standardisierung eine klar definierte Qualität gegeben ist. Diese Bauteile sind nach der Nutzung in der „Altholzkategorie A II: verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel“ einzuordnen. In Hinblick auf die Wiederverwendung ist unbelastetes Altholz (Kategorien A I und A II) wie Industrieholz und andere Holzmasse gut geeignet für die Spanplattenproduktion oder z. B. in Biomasse-Heiz-Kraftwerken. Dieser Einsatz wirkt positiv in Hinblick auf die ökologische Gesamtbetrachtung.⁴⁹

Bei belastetem Altholz (Kategorien A III und A IV) verringern sich die Einsatzmöglichkeiten sowohl bei der stofflichen Nutzung als auch bei der energetischen Nutzung, weil nur Feuerungsanlagen mit geeigneten Filteranlagen in der Lage sind, die bei der Verbrennung entstehenden Schadstoffe aus den Abgasen zu filtern.

Denkbar wäre auch, das Bausystem nur mit Vollholz-Profilen auszuführen, die auf eine Verleimung verzichten. Allerdings sind die notwendigen Querschnitte und Profillängen nur durch eine entsprechenden Selektion zur erreichen, was zu höheren Preisen als bei den zusammengesetzten Profilen des keilgezinktes Konstruktionsvollholzes führt.

Es gibt auch Hersteller, die zusammengesetzte Holzprodukte mit geometrischen, d.h. form- und kraftschlüssigen Verbindungen anbieten. Zu nennen ist hier die Firma Thoma, die unter dem Produktnamen Holz 100 ein Decken- und Wandsystem aus Kreuz-Lagenholz anbietet, bei dem anstelle von Leim Buchendübel den Verbund bewirken. Die Buchendübel werden im getrockneten Zustand (Holzfeuchte 6%) eingetrieben. Durch den Feuchteausgleich an das umgebende Holz mit ca. 15% Holzfeuchte quellen die Buchendübel auf, wodurch ein besserer Kraftschluss zwischen den Dübeln und den Hölzern und somit auch zwischen den Lagen entsteht.

Bei diesem System werden die einzelnen Bauteile, die ohne Leim und metallische Verbinder auskommen, mittels Schrauben gefügt, weswegen das gesamte Bauwerk wieder erhebliche Mengen an Sekundärstoffen enthält.

49 Gärtner, Sven; Hienz, Gunnar; Keller, Heiko; Müller-Lindenlauf, Maria: Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz – Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. IFEU Heidelberg, 2013

Auch die Firma Holzius arbeitet mit geometrisch gefügten Holzprofilen, aus denen sie Wand- und Deckenbauteile herstellt. Hier werden parallele Holzprofile eingesetzt, die durch orthogonal verlaufende Keilleisten zusammengehalten werden (Funktionsprinzip „Verkämmen“ und „Vergraten“). Vorteil dieser Bauweise ist die einheitliche Tragrichtung der Profile für ein-achsig gespannte Konstruktionen oder Wände, bei denen die Profile alle längs zur Faserrichtung belastet werden.

Nachteil der Holzius-Bauteile sind die hohen Kosten, die aus der aufwendigen Verarbeitung und Fügung der Profile zu den Bauteilen entstehen.

Beide Systeme eignen sich bisher nur für die Herstellung von flächigen Elementen, wie Decken und Wänden. Für die Stützen und Träger des Skelettbau muss nach aktuellem Stand der Technik entweder Vollholzprofile oder KVH eingesetzt werden.

Bewertung nach DGNB

Auch die Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) hat in die aktuelle Version des Systems eine Bewertung von Rückbaubarkeit und Rezyklierbarkeit eingepflegt.

Methodik Bewertung nach DGNB

Die Bewertung umfasst drei Indikatoren⁵⁰:

Indikator 1: Recyclingfreundliche Baustoffauswahl

Indikator 2: Rückbaufreundliche Baukonstruktion:

- Demontagemöglichkeit der Bauteile
- Trennbarkeit in möglichst sortenreine Stoffgruppen

Indikator 3: Anwendung von recycling- und rückbauorientierten Bewertungsmethoden im Rahmen der Planung des Gebäudes

(Quelle: DGNB Kriterium TEC1.6; DGNB GmbH)

Die DGNB beschränkt die Bewertung, um den Aufwand zu verringern. So werden nur die sogenannten Regelbauteile (RBT) betrachtet und von diesen auch nur 60% der jeweiligen Bauteilgruppe. Es wird auch nur die Baukonstruktion (KG300) gewertet und die Gebäudetechnik (KG400) vernachlässigt.⁵¹

Die unterschiedlichen Bauteilgruppen werden dabei unterschiedlich stark gewichtet:

- Primärkonstruktion und Tragwerk, einfache Wertung
- Hüllflächen, doppelte Wertung
- Innenausbau, fünffach gewertet

Die unterschiedliche Gewichtung wird mit der Häufigkeit des Austausches begründet. Dies scheint in Hinblick auf den wiederholten Aufwand für die Konstruktion sinnvoll. Allerdings trägt diese Gewichtung nicht den tatsächlichen Umweltfolgen und Kosten Rechnung. Auch wenn der Innenausbau häufiger ausgetauscht wird, so entstehen auch bei dem fünfmaligen Austausch nicht Kosten und Umweltfolgen in einer der Primärkonstruktion vergleichbaren Höhe, wenn diese ungünstig konstruiert ist (z.B. Stahlbeton).

50 DGNB GmbH, Tübinger Straße , 70178 Stuttgart; URL: <https://www.dgnb-system.de/de/system/labelanerkennung/anforderungen/rueckbau-und-recyclingfreundlichkeit.php> und https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/version2018/05_TEC1.6_Rueckbau-und-Recyclingfreundlichkeit.pdf. Zugriff 6.12.2108.

51

ebd.

Eine Bewertung des Systems mit der Methodik der DGNB ist basierend auf dem Entwicklungsstand nicht möglich, weil sich die System-Entwicklung derzeit auf die Primärkonstruktion beschränkt. Die DGNB bewertet grundsätzlich nur ganze Bauteilaufbauten und darin auch immer den ungünstigsten Baustoff für den Indikator 1. Somit kann das Bausystem je nach Ausbau und Aufbau unterschiedlich abschneiden.

Gleichwohl lassen sich aus der Bewertungsmethodik der DGNB Kriterien für den Ausbau des Systems und die Konstruktion von Bauteilen ableiten.

DGNB Indikator 1: Recyclingfreundliche Baustoffauswahl

Holz hat grundsätzlich große Vorteile in Hinblick auf den Ressourcenverbrauch als auch das Recycling-Potentials. Hier definiert die DGNB folgende Qualitätsstufen, die sich an den Entsorgungswegen orientieren⁵²:

Nr.	Verwertungs- und Entsorgungswege	Beschreibung	Qualitätsstufe
1	Vermeidung	Auf standardmäßig übliche Teile eines Bauelements wird verzichtet, oder für eine gesamte Bauteilgruppe werden wesentlich weniger Bauelemente eingesetzt als standardmäßig für die spezifische Nutzung üblich. Bsp.: Keine Verkleidung von Decken, kein Oberbodenbelag.	CE Bonus – Vermeidung von Bauteilen
2	Wiederverwendung	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt ist unverändert im Bauwerk verblieben (für Nutzungsprofil Sanierung) oder wird (nach geringfügiger Ertüchtigung) bereits wiederverwendet. Alternativ: Für das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt besteht ein Rücknahmegarantie, ein Miet- oder Leasingsystem.	CE Bonus – Wiederverwendung oder werkstoffliche Verwertung
3	Werkstoffliche Verwertung zu einem vergleichbaren Produkt	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt kann nach aktuellem Stand der Technik vorwiegend werkstofflich wiederverwertet werden, sodass ein gleichwertiges Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt daraus entstehen kann. Dabei ist ein verlustfreier Kreislauf durch eine etablierte Logistik sicherzustellen. Alternativ: Für das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt besteht eine Rücknahmegarantie, ein Miet- oder Leasingsystem.	CE Bonus – Wiederverwendung oder werkstoffliche Verwertung
4	Stoffliche Verwertung im Hochbau	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt kann nach aktuellem Stand der Technik vorwiegend stofflich verwertet werden, sodass es der Produktion eines neuen Bauteils / Teilbauteils / Bauprodukts für den Hochbau zugeführt werden kann.	QS 2
5	Stoffliche Verwertung	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt kann vorwiegend als Sekundär-Rohstoff verwendet werden, nach aktuellem Stand der Technik außerhalb des Hochbaus.	QS 2
6	Energetische Verwertung	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt wird nach aktuellem Stand der Technik vorwiegend als Ersatzbrennstoff in einer Produktionsstätte (z. B. Zementwerk, betriebseigenes HKW) oder in einer Müllverbrennungsanlage energetisch verwertet.	QS 1
7	Verfüllung	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt wird nach aktuellem Stand der Technik vorwiegend als Versatz / Verfüllgut für die Verfüllung von Hohlräumen bzw. Resthohlräumen als Ersatz für andere Materialien genutzt.	QS 1
8	Deponierung	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt wird nach aktuellem Stand der Technik vorwiegend deponiert	QS 0
9	Entsorgung als „gefährlicher Abfall“	Das Bauteil / Teilbauteil / Bauprodukt wird nach aktuellem Stand der Technik vorwiegend auf Deponien der Klasse 2–3 deponiert oder wird einer gesonderten Entsorgung zugeführt.	

⁵² DGNB GmbH, Tübinger Straße , 70178 Stuttgart; URL: <https://www.dgnb-system.de/de/system/labelanererkennung/anforderungen/rueckbau-und-recyclingfreundlichkeit.php> und https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/version2018/05_TEC1.6_Rueckbau-und-Recyclingfreundlichkeit.pdf. Zugriff 6.12.2108.

Das Bausystem bietet hier zahlreiche Anknüpfungspunkte für eine Bewertung im Bereich der Qualitätsstufe 2 oder der Circular Economy (CE Bonus). Die Holzkonstruktion kann grundsätzlich unverkleidet bleiben, wodurch zusätzliche Schichten und Konstruktionen vermieden werden. Die Bauteile ließen sich wiederverwenden und könnten in einer Art Leasing dem Nutzer überlassen werden (auch wenn solche Vermarktungsmodelle im Moment unüblich sind). In jedem Fall kann die Primärkonstruktion stofflich und im Bauwesen wiederverwendet werden. Voraussetzung ist hier, wie beschrieben, dass die Konstruktion des gesamten Bauteils (Wand, Boden, Decke...) eine solche Wiederverwendung nicht erschwert. Auch sollten die folgenden Schichten ebenfalls aus rezyklierbaren oder rezyklierten Materialien bestehen.

DGNB Indikator 2: Rückbaufreundliche Baukonstruktion:

Für die Rückbaufreundlichkeit der Baukonstruktion werden die folgenden Qualitätsstufen definiert⁵³:

Definitionen und Bewertungsstufen für Indikator 2

Qualitätsstufe 2 „Rückbaufreundliche Baukonstruktion“ im Sinne des Kriteriums ist gegeben, wenn die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Entnahme der Bauteile gegeben, eine sortenreine Trennung der Bauteilschichten gegeben oder keine sortenreine Trennung erforderlich ist, da Einzelschichten / Einzelelemente zu derselben Roh- oder Werkstoffgruppe gehören.

Qualitätsstufe 1: Baukonstruktion, die nicht explizit unter o. g. Gesichtspunkten der rückbaufreundlichen Baukonstruktion (Qualitätsstufe 2 „Rückbaufreundliche Baukonstruktion“) durchgeführt, deren Rückbaumöglichkeit dem Bauherren jedoch bekannt ist.

Zerstörungsfreie Entnahme von Bauteilen im Sinne dieses Indikators bedeutet, dass es möglich ist, das Bauteil einer verlustfreien Wieder- oder Weiterverwendung zur Verfügung zu stellen (Vorbereitung für Verwertungsweg 2 in Indikator 1). Dabei gilt, dass die Anschlüsse des Bauteils an das Gebäude oder an angrenzende Bauteile ohne Zerstörung verbleibender Bauteile oder Bauteilschichten lösbar sein müssen.

Sortenreine Trennbarkeit von Bauteilschichten im Sinne des Indikators bedeutet, dass eine stoffliche Verwertung der Materialien ohne Einschränkung möglich ist.

53 DGNB GmbH, Tübinger Straße , 70178 Stuttgart; URL: <https://www.dgnb-system.de/de/system/labelanerkennung/anforderungen/rueckbau-und-recyclingfreundlichkeit.php> und https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/version2018/05_TEC1.6_Rueckbau--und-Recyclingfreundlichkeit.pdf. Zugriff 6.12.2108.

Für die höchste Qualitätsstufe werden zwei Wege beschrieben, die beide in dem Bausystem umgesetzt werden können. Entweder sind die Baustoffe leicht zu trennen, weil die zerstörungsfreie Entnahme der Bauteile ein wichtiges Entwicklungsziel des Bausystems ist. Zusätzlich oder alternativ kann auf eine Trennung verzichtet werden, weil die eingesetzten Baustoffe derselben Roh- oder Werkstoffgruppe zugehören. Dies ist auch eine wesentliche Eigenschaft der zu entwickelnden Primärkonstruktion. Die nächste Herausforderung ist dann an dieser Stelle, diesen Anspruch auch auf den Ausbau und die gesamten Bauteile auszuweiten.

DGNB Indikator 3: Anwendung von recycling- und rückbauorientierten Bewertungsmethoden im Rahmen der Planung des Gebäudes

Dieser Indikator bleibt in Hinblick auf die Nachweisführung offen. Gefordert werden eine frühzeitige, umfassende und durchgehende Beschäftigung und Umsetzung der vorgenannten Kriterien in der Planung. Hier bietet der Einsatz eines auf den Rückbau und die Ressourceneffizienz hin entwickelten Bausystems einen guten Ausgangspunkt, der dann in einer gesamten Gebäudeplanung fortgeschrieben werden kann.

Ausblick: Betrachtung des Bausystems / Tragwerk und Ausbau

Die vorgeschlagenen Holz-Holz-Verbindungen begünstigen eine sortenreine Trennung, die eine wichtige Voraussetzung für ein stoffliches Recycling ist, was bei Verbundstoffen in der Praxis nur schwer möglich. Eine Extraktion von anderen Fraktionen (Beton, Metall) ist so aufwendig, dass sie in der Praxis nicht stattfindet. Holzbauteile und reine Holz-Konstruktionen lassen sich sortenrein trennen und rezyklieren (Recycling, stoffliche Wiederverwendung, Verarbeitung zu Holzwerkstoffen). Aus ökologischer Sicht ist Holz der zukunftsfähigste und der einzige nachwachsende Baustoff in Deutschland, da er nicht auf limitierten Ressourcen (Sand, Stahl...) basiert. Durch die in Deutschland etablierte nachhaltige Forstwirtschaft kann Holz als nachwachsender Rohstoff genutzt werden.

Bei der Beurteilung des Ressourcenverbrauchs und der Rezyklierbarkeit ist grundsätzlich nicht nur das Tragwerk, das Gegenstand dieser Studie ist, sondern auch der Ausbau und die Verbindung von Ausbau und Tragwerk entscheidend. Weil die vorliegende Studie sich auf das Tragwerk beschränkt, müsste im nächsten Schritt die Logik des Bausystems und die Fügungen ohne metallische Verbindungen oder Klebung auf die restliche Baukonstruktion ausgedehnt werden. So könnte ein rückbaufreundliches Bausystem entwickelt werden.

Konstruktive Umsetzung der Rezyklierbarkeit

Holzverbindungen, die ohne metallische Verbindungsmittel hergestellt wurden, waren bis zur vorindustriellen Zeit die verbreitete Holzbautechnik. Traditionelle Zimmermannsbauweisen aus vorindustrieller Zeit besitzen ein hohes Maß an Integrität: Material, Handwerk und Baukultur vereinen sich in einer Architektur von hohem Identifikationswert, Dauerhaftigkeit und Atmosphäre. Für die Herstellung und Verarbeitung von Holzbauten ist deutlich weniger Primärenergie erforderlich als im Massivbau. Die Produktion von Holz ist nicht nur kohlendioxidneutral, sondern wirkt aktiv dem Treibhauseffekt entgegen, weil das atmosphärische Kohlendioxid im Holz gebunden und damit zwischengelagert wird. Bei der Hybrid-Bauweise wird die Reduktion der CO₂-Emissionen durch die Verwendung von Holz durch die hohen Emissionen der Sekundärstoffe (Stahl und Stahlbeton) teilweise aufgehoben. Gerade die metallischen Verbindungsmittel haben einen großen Anteil an den Emissionen der Holzgebäude.

Auf der Ebene des Materials bietet die entwickelte Konstruktion gute Voraussetzungen für eine recyclinggerechte Konstruktion. Ein wesentlicher Antrieb für die Arbeit an diesem Forschungsprojekt ist es, sich schrittweise einer sortenrein und leicht rückbaubaren und rezyklierbaren Baukonstruktion anzunähern. An dieser Stelle ist herauszustellen, dass die Forschungsarbeit sich in diesem Projekt auf die Primärkonstruktion beschränkt. In den Ausbaugewerken werden auch bei den Modellvorhaben keine Lösungen ohne metallische Verbinder entwickelt. Sinnvoll wäre es, im Anschluss zu dem laufenden Forschungsprojekt die Entwicklung auf die Ausbau-Gewerke auszudehnen.

Durch die form- und kraftschlüssigen Verbindungen sind die Bauteile der Primärkonstruktion einfach zu demontieren. Es müssen keine Schrauben oder andere Verbinder gelöst werden. In der Praxis werden bei einem Rückbau die Verbinder nicht zurückgebaut. Die Bauteile werden mit Gewalt zurückgebaut und die Verbinder bleiben in der Abbruchmasse.

ERGEBNISSE

VERALLGEMEINERUNGEN

Im letzten Abschnitt sollen die Ergebnisse des Forschungshabens reflektiert werden.

ANALYSE VON STÄRKEN UND SCHWÄCHEN DES BAUSYSTEMS

Zunächst werden die Vor- und Nachteile des Bausystems betrachtet.

Konstruktive Vor- und Nachteile

Die Grundidee des Bausystems ist eine Vereinheitlichung des Produktionsprozess im Holzbau, so dass möglichst viele der Anschlüsse direkt durch die Geometrie der Bauteile und damit im Abbund hergestellt werden können. Dadurch soll die Anzahl der sekundären Verbindungsmittel, die in der Herstellung und Montage zeitaufwendig und teuer sind, reduziert werden. Auch können metallische Verbindungsmittel durch Holzverbinder ersetzt werden.

Durch die Fortschritte bei Planungs- und Produktionstechnik können auch komplizierte Geometrien mit computergesteuerten Maschinen (CAD, CAM, CNC-Abbund) wirtschaftlich hergestellt werden. DGJ Architektur hat in einer Serie von Fallstudien (Case-Studies) und zwei Forschungsprojekten im Verbund mit Pirmin Jung Ingenieure, ein Holz-Skelett-Bausystem entwickelt, bei dem alle Verbindungen und Knotenpunkte durch form- und kraftschlüssige Verbindungen konstruiert sind. Es wurden neue Details und Konstruktionen entwickelt, sodass das Bausystem den aktuellen Anforderungen (Brand-schutz, Schallschutz, Standsicherheit, Berechnungsmethoden, Nachweisverfahren, Normen) genügt.

Form- und kraftschlüssige Verbindungen erfordern ein hohes Maß an Präzision in der Herstellung und der Montage. Insbesondere bei größeren Gebäuden, bei denen sich die Ungenauigkeiten der Bauteile und Fügungen summieren können, ist eine form- und kraftschlüssige Fügung eine Herausforderung. Im Rahmen der System-Entwicklung wurden zwei Methoden entwickelt, wie mit unvermeidlich auftretenden Toleranzen am Bau umgegangen werden kann: Eine Methode, die bei einer integrierten Ausbildung der Knoten (siehe dazu Abschnitt lokales Tragwerk) angewandt werden kann, ist die Einführung von Toleranzen in den Anschlussdetails, indem die Passstücke mit einer Fuge (je nach Ausbildung des Systems ca. 5mm-10mm) gefertigt werden. Dadurch lassen sich die einzelnen Bauteile leichter fügen und innerhalb des geplanten Toleranzbereichs repositionieren. So lassen sich beim Versetzen der einzelnen Elemente Maßabweichungen ausgleichen. Ziel der Systementwicklung muss es sein, die Toleranzen so weit zu reduzieren, dass das Bausystem auch ohne Füllstoffe stabilisiert werden kann. Eine andere Methode besteht darin, die geometrischen Räume der einzelnen Schichten zu trennen, wodurch sich die einzelnen Bauteile und Schichten unabhängig positionieren lassen.

Konstruktiv betrachtet sind die Stahlverbindungen als verbreitetste Verbindungsmittel im Holzbau zwar leistungsfähig. Allerdings führen die Stahlverbinder im umgebenden Holz zu Spannungsspitzen und einem ungleichmäßigen Kraftfluss im gesamten Tragwerk. So werden im Holzbau nicht nur die Schnittkräfte in den Querschnitten, sondern die Spannungsspitzen an Verbindungsflächen maßgebend.

Ökologische Vor- und Nachteile

Eine Würdigung des Bausystems muss als Vergleich gegenüber der gängigen Praxis im Bauen allgemein und im Holzbau geschehen. Wie im Abschnitt 3.3.1 Materialität Holz // Ökologie und Nachhaltigkeit gezeigt wurde, ist der Holzbau nicht nur die überlegene Bauweise in Hinblick auf Ressourcenverbrauch und CO₂-Emissionen, sondern auch die einzige Bauweise, die zuverlässig die Klimaziele 2050 umsetzen kann. Holz ist als einheimischer, nachwachsender Rohstoff der zukunftsfähigste Baustoff, da es der einzige Baustoff ist, der in großen Mengen für alle Bauaufgaben eingesetzt werden kann und nicht auf limitierten Ressourcen (fossile Energien, Sand, Erze...) basiert. Durch die in Deutschland etablierte nachhaltige Forstwirtschaft kann Holz als nachwachsender Rohstoff auf Dauer genutzt werden. Modellrechnungen gehen davon aus, dass mit nur einem Drittel des jährlich produzierten Holzvolumens die gesamte Bautätigkeit in Deutschland gedeckt werden kann.⁵⁴ Das Bausystem hat aufgrund des Einsatz von Holz als nachwachsendem Baustoff, ökologische Vorteile, die aber durch die bessere Wiederverwendbarkeit der Bauteile noch verbessert werden. Für die Herstellung und Verarbeitung ist deutlich weniger Primär-Energie erforderlich. Im Holz wird atmosphärische Kohlendioxid gebunden und damit für die Lebensdauer des Gebäudes zwischengelagert.

Verglichen mit den konventionellen Holzbauten kann man eine deutliche Reduktion der Anteile von Stahlbauteilen und Verbindungsmitteln feststellen. Im heutigen Holzbau werden zunehmend auch Kleber, Stahl und Beton verwendet, um Tragfähigkeit, Feuerwiderstand und Dauerhaftigkeit zu verbessern. Auch wenn die Hybridisierung zu neuen Einsatzmöglichkeiten führt, gehen positive Eigenschaften des Holzbaus verloren. Bei der Hybrid-Bauweise wird Reduktion der CO₂-Emissionen durch die Verwendung von Holz durch die hohen Emissionen der Sekundärstoffe (Beton und Stahl) in Teilen aufgehoben. Das neue Bausystem ist in jedem Fall ökologisch den konventionellen Massivbauweisen aus Mauerwerk und/oder Stahlbeton überlegen.

Auch lassen sich die Verbundstoffe schwer sortenrein trennen und recyceln. Reine Holz-Konstruktionen lassen sich wiederverwenden (Recycling, downcycling zu Holzwerkstoffen). Die sortenreine Trennung, die eine wichtige Voraussetzung für ein stoffliches Recycling oder eine Kompostierung wäre,

ist somit in der Praxis nicht mehr möglich. Der Einsatz von nicht-nachwachsenden Baustoffen und die fehlende Rückbau- und Trennbarkeit der meisten Baukonstruktionen führt dazu, dass das Bauwesen für einen Großteil der Abfallaufkommen verantwortlich ist. Auch ergibt sich daraus ein hoher Ressourcenverbrauch. Nachhaltige Gebäude müssen anders konstruiert werden: Die einzelnen Bauteile sollten mit lösbaren Verbindungen gefügt werden. Konstruktive Schichten und Bauteile sollten so gefügt sein, dass sie sich einzeln warten, instand setzen oder austauschen lassen, da ihre Beanspruchung und Lebensdauer unterschiedlich sind. Die reinen Holzkonstruktionen lassen sich wiederverwenden (Recycling, Downcycling zu Holzwerkstoffen). So wird auch eine sortenreine Trennung begünstigt, die eine wichtige Voraussetzung für ein stoffliches Recycling oder effiziente energetische Nutzung ist. Hierfür bieten die Holz-Holz-Verbindungen einen idealen Ansatzpunkt: Das Bausystem wurde entwickelt, um möglichst zerstörungsfrei umgebaut, rückgebaut und wiederverwendet werden zu können. Die Bauteile lassen sich theoretisch wie Puzzle-Steine zusammensetzen und auseinandernehmen. Bauteile und Materialien können in geschlossenen Stoffkreisläufen geführt werden. So wird das Konzept des Abfalls eliminiert.⁵⁵ In der Praxis wird die Rückbaubarkeit der Primärkonstruktion durch den Ausbau mit inneren Verkleidungen, Fassaden und Gebäudetechnik eingeschränkt. So konzentriert sich die Forschung im Moment zunächst auf das Tragwerk. Die sekundären und tertiären Systeme werden aber konstruiert, dass sie sich möglichst leicht vom Tragwerk trennen lassen.

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.

⁵⁵ Michael Braungart und William McDonough haben mit Cradle-to-Cradle das Konzept einer Wirtschaft entwickelt, bei der Produkte und Materialien in geschlossenen Stoffkreisläufen geführt werden. Braungart, Michael; McDonough, William; Cradle to Cradle; New York, 2002.

Ökonomische Vor- und Nachteile

In den ersten im Rahmen des Forschungsprojekts vorgenommenen ökonomischen Vergleichen konnten noch keine Vorteile der Holz-Holz-Bauweise gegenüber dem Holzbau mit metallischen Verbindungsmitteln nachgewiesen werden. Dafür lassen sich zwei Gründe benennen: Zum einen liegen noch keine Erfahrungen seitens der Firmen vor, bei dem die Bauweise in einem größeren Maßstab eingesetzt wurde. Die Kalkulation basierte auf den Erfahrungen mit den kleinen Musterstücken und ist in Hinblick auf eine große Baustelle nur schwer zu skalieren. Deswegen wurde bewusst konservativ gerechnet, um etwaige Risiken auf der Baustelle abzudecken. Zum zweiten kann die Bauweise und die Fertigung weiter optimiert werden. Die Anzahl der notwendigen Verbindungsmittel könnte in der weiteren Forschung reduziert werden, was Aufwand und Kosten senkt. Ein wesentlicher Kostentreiber ist das manuelle Eintreiben der Buchendübel. Hier wurde mit dem Industriepartner überlegt, ob eine kleine hydraulische Presse eingesetzt werden könnte, um die Buchendübel einzutreiben. Die Herausforderung besteht dabei nur darin, dass die Presse so schwer oder gut verankert sein müsste, dass sie sich nicht vom Dübel und Untergrund abhebt, wenn der Dübel in das Material eingedrückt wird.

Der aktuelle Entwicklungsstand des Systems zeigt, dass die sekundären Elemente aus Metall (Schlitzbleche und Vollgewindeschrauben) durch Verbindungselemente aus Holz (Holz-Laschen und Holzdübel) ersetzt wurden. Im nächsten Schritt der Entwicklung müsste untersucht werden:

- Wie sich die Anzahl der Holzverbinder so weit reduzieren lässt, dass die Bauweise wirtschaftlich vergleichbar ist mit den konventionellen (metallischen) Verbindern
- Das Einbringen der Holz-Verbinder so weit automatisiert oder maschinell unterstützt werden kann, dass die Kosten für das Einbringen sinken. So ist die Technologie zum Einbringen der Holznägel nicht ausgereift. Für das Einbringen der Buchendübel stehen noch gar keine Geräte zur Verfügung, was die hohen Kosten erklärt.

Die Mehrkosten des Bausystems gegenüber dem konventionellen Holzbau, die in den fünf untersuchten Fällen zwischen 3.000,00 Euro und 7.000,00 Euro lagen, sind im Vergleich zu den Gesamtkosten eines Bauwerks sehr überschaubar und machen weit weniger als 1% der Baukosten aus.

MARKTCHANCEN

Das Bausystem geht auf traditionelle Handwerkskunst zurück, die bei den Zimmerleuten hoch angesehen ist. Gerade bei Handwerksberufen besteht eine Grundtendenz, Bekanntes und Bewehrtes zu wiederholen und Neues und Ungewohntes abzulehnen. Durch diesen Rückgriff und die Anknüpfung an die Wertigkeit des Berufsstands wird die neue Bauweise von den ausführenden Menschen als angemessen und natürlich empfunden. Dadurch ist gewährleistet, dass Diejenigen, die mit dem System arbeiten werden, das Bausystem nicht ablehnen. Dies ist für die Marktchancen des Systems wichtig.

Das Bausystem nutzt auf allen Ebenen eingeführte Materialien, Technologien und Prozesse, um eine möglichst schnellen und breiten Einsatz zu ermöglichen. Es werden standardisierte, kostengünstig und in großen Mengen verfügbare Baumaterialien eingesetzt: Konstruktionsvollholz (KVH), Brett-schichtholz (BSH) und Brettspertholz (BSP), bzw. Brettstapeldecken. Nachweis und Dimensionierung von Tragwerk und Verbindungen basieren auf den aktuellen Eurocodes und können dem Grunde nach von jeder IngenieurIn berechnet und bemessen werden. Die Innovation besteht also nicht in der Entwicklung von neuen Materialien oder Bauteilen, sondern darin, die vorhandenen Methoden, Technologien und Materialien intelligenter einzusetzen und konsequent zu einem System zusammenzuführen.

Nachteil des aktuellen Entwicklungsstands ist, dass die Kosten für die Bauweise derzeit noch höher sind als im konventionellen Holzbau mit geschraubten Verbindungen.

BEWERTUNG DES ENTWICKLUNGSSTAND // WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Im nächsten Entwicklungsschritt gilt es, das Bausystem weiter zu optimieren, um die festgestellten technischen und ökonomischen Fragestellungen zu verbessern.

Die vorliegende Forschung beschränkt sich ausschließlich auf das Tragwerk und nicht den Ausbau des Gebäudes. Bei der Planung des Modellvorhabens ist deutlich geworden, dass das Bausystem (so wie jedes moderne Gebäude) nicht nur durch das Tragwerk bestimmt wird, sondern vor allem durch die Interaktion des Tragwerks mit anderen Planungsthemen, die sich in den Ausbau-Gewerken manifestieren: Schallschutz, thermische Bauphysik (Wärmeschutz), Feuchteschutz und Brandschutz (nicht nur auf das Tragwerk bezogen, sondern das gesamte Gebäude). Das Tragwerk ist wichtiger Bestandteil dieser Planungsthemen, sodass das Bausystem integral mit den anderen Fachplanungen betrachtet werden muss. Im nächsten Schritt soll nun eine solche umfassende System-Entwicklung, die das Tragwerk und den Ausbau (Innenwände, Fassade, Innenausbau) einbezieht, erfolgen.

ANHANG A:

GEBÄUDEKUNDLICHE STUDIEN / AUSWERTUNG TYPOLOGIEN

Im Forschungsprojekt wurden alle in der Matrix aufgelisteten Rastermaße überprüft und bewertet. Um einen Einblick in die Methodik und die Ergebnisse, werden an dieser Stelle nur wenige Raster exemplarisch analysiert.

Der vollständige Satz von 46 Fällen kann bei den AutorInnen der Studie nachgefragt werden.

235 Holz: Form- und Kraftschlüssig

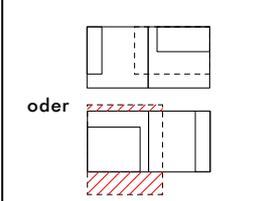
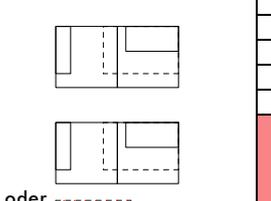
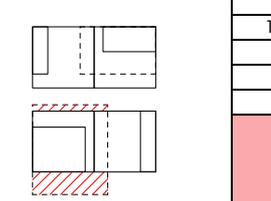
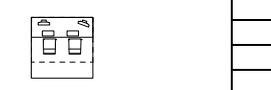
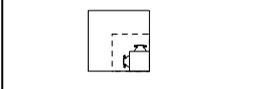
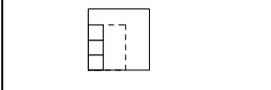
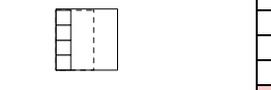
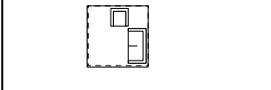
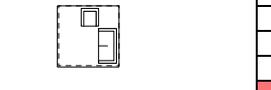
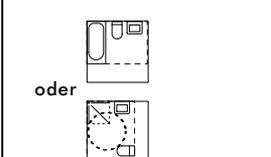
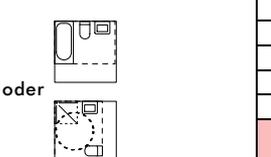
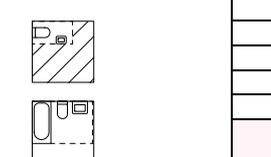
I. Rastermaß 2,65m ungerichtet

Das Rastermaßes 2,65m x 2,65m in der gebäudekundlichen Analyse ist ein ungerichtetes System, quadratisch und das kleinste der untersuchten Fallbeispiele. Es werden nur die Haushaltsgrößen für eine bis fünf Personen untersucht.

Funktionalität:

- Betten inkl. Bewegungsflächen passen nicht in ein Rastermodul
- Gästezimmer benötigt zwei Raster
- Die Bewegungsfläche in Eltern- und Doppelzimmern muss reduziert werden
- Für eine höhere Effizienz empfiehlt es sich, zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammen zu legen
- Längliche Wohnzimmer bei Haushalten über vier Personen
- Bad und Gäste-WC lassen sich nicht in einem Rastermodul zusammenfassen
- Innere Erschließung bei großen Wohnungen schwierig

Raster x y	2,65 m	2,65 m
Raster nutzbar	2,45 m	2,45 m
Fläche Raster		7,02 qm
Fläche nutzbar		6,00 qm

Haushaltsgröße	1PHH	2PHH	3PHH	
Schlafen	 oder	 oder		7,17 qm
				10,80 qm
				7,2 qm
				18,0 qm
	2	2	4	
	60%	90%	75%	
Gast / Arbeit				4,41 qm
				4,4 qm
				-
				73%
	-	-	-	
Essen				2,57 qm
				2,6 qm
				1
				43%
	1	1	1	
Küche				2,70 qm
				2,7 qm
				1
				45%
	1	1	1	
Wohnen				5,76 qm
				5,8 qm
				1
				96%
	1	1	1	
Bad	 oder	 oder	 oder	4,08 qm
				4,1 qm
				1
				68%
	1	1	2	
Erschließung				4,08 qm
				1,44 qm
				5,5 qm
				100%
	-	-	-	
Min. Einheiten	6	6	11	
WFL je Person	36 qm/pP	18 qm/pP	22 qm/pP	

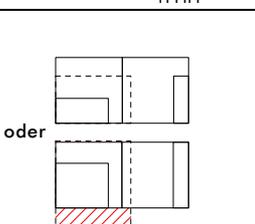
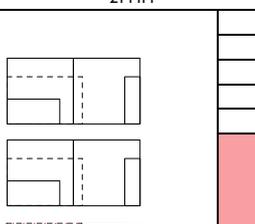
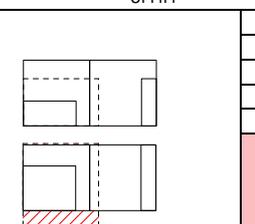
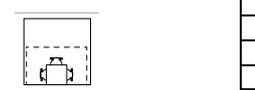
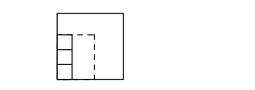
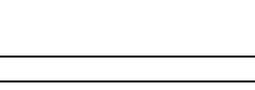
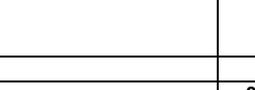
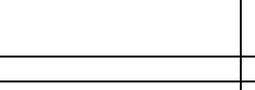
II. Rastermaß 2,85m ungerichtet

Das Rastermaß 2,85m x 2,85m der gebäudekundlichen Analyse ist ein ungerichtetes System und quadratisch. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Betten inkl. Bewegungsflächen passen nicht in ein Rastermodul
- Gästezimmer benötigt zwei Raster
- Die Bewegungsfläche in Eltern- und Doppelzimmern muss reduziert werden
- Für eine höhere Effizienz empfiehlt es sich, zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammen zu legen
- Längliche Wohnzimmer bei Haushalten über vier Personen
- Bad und Gäste-WC lassen sich nicht in einem Rastermodul zusammenfassen
- Innere Erschließung bei großen Wohnungen schwierig
- + Küche ist bei Haushalten unter fünf Personen sehr kompakt
- + Das einzelne Bad kann effizient mit Schacht im Rastermodul untergebracht werden

Raster x y	2,85 m	2,85 m
Raster nutzbar	2,65 m	2,65 m
Fläche Raster		8,12 qm
Fläche nutzbar		7,02 qm

Haushaltsgröße	1PHH	2PHH	3PHH	
Schlafen	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>		7,17 qm
				10,80 qm
				18,0 qm
				7,2 qm 2
				10,8 qm 2
				4,41 qm
				4,4 qm 1
				63%
				3,60 qm
Gast / Arbeit	-	-	-	3,6 qm 1
Essen				2,57 qm
				2,6 qm 1
				37%
Küche				2,70 qm
				2,7 qm 1
				38%
Wohnen				2,57 qm
				2,6 qm 1
				37%
Bad	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	2,70 qm
				2,7 qm 1
				38%
Bad	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	5,76 qm
				5,8 qm 1
				82%
				4,08 qm
Bad	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	4,08 qm
				4,1 qm 1
				58%
				4,1 qm 1
Bad	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	4,08 qm
				1,44 qm
				5,5 qm 1
Erschließung				9
				Flur
Min. Einheiten				6
WFL je Person				6
				21 qm/pP
				21 qm/pP

Flexibilität und Möblierbarkeit:

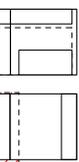
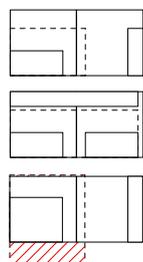
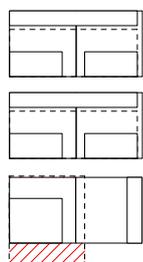
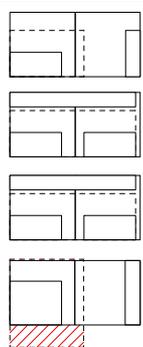
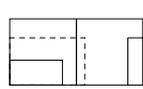
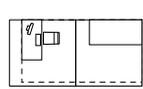
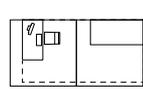
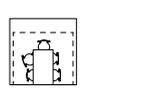
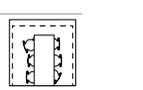
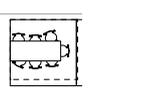
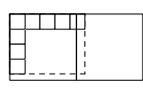
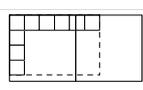
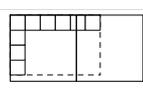
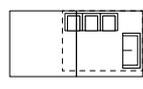
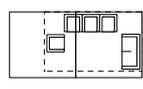
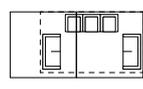
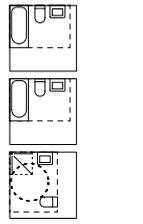
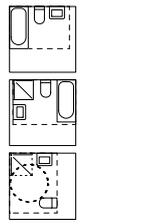
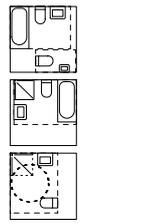
- Schlafräume benötigen immer zwei Rastermodule
- Geringe Varianz in der Möblierung
- Wohnzimmer ab vier PHH haben große ungenutzte Flächen
- Bäder ab vier PHH haben große ungenutzte Flächen
- + Funktionen sind gut austauschbar Bewegungsflächen sind ausreichend
- o Räume sind nur mit einer Funktion belegt

Gebäude:

- vier bis fünf Raster für Gebäudetiefe können zu Belichtungsproblemen führen
- + hohe Flexibilität durch hohe Anzahl an Rastermodulen

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass viele Module sehr effizient ausgenutzt werden und die Mindestmaße für die Nutzung eingehalten werden. Jedoch ist das Schlafzimmer nur begrenzt nutzbar. Große Wohneinheiten sind aufgrund dieser nahezu Vollaussutzung der Flächen ggf. schwierig bei der internen Erschließung. Diese Rastergröße ist für Personengruppen mit geringen Anforderungen denkbar. Dazu könnte für die Schlafräume ein Sondermöbel helfen (siehe auch Punkt 6.5 Fallstudie 3 // Studierendenwohnheim DGJ223). Für kleine Nutzungseinheiten und Wohnheime anwendbar.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
	10,33 qm 10,80 qm 21,1 qm 4		7,17 qm 10,33 qm 10,80 qm 28,3 qm 6		20,65 qm 10,80 qm 31,5 qm 6		7,17 qm 20,65 qm 10,80 qm 38,6 qm 8
	75%		67%		75%		69%
	5,70 qm 5,7 qm 2		5,70 qm 5,7 qm 2		11,13 qm 11,1 qm 2		11,13 qm 11,1 qm 2
	41%		41%		79%		79%
	4,32 qm 4,3 qm 1		5,04 qm 5,0 qm 1		5,76 qm 5,8 qm 1		6,48 qm 6,5 qm 2
	62%		72%		82%		46%
	5,76 qm 5,8 qm 1		7,20 qm 7,2 qm 2		8,82 qm 8,8 qm 2		8,82 qm 8,8 qm 2
	82%		51%		63%		63%
	5,76 qm 5,8 qm 1		7,34 qm 7,3 qm 2		9,18 qm 9,2 qm 2		9,42 qm 9,4 qm 2
	82%		52%		65%		67%
	8,16 qm 8,2 qm 2		8,16 qm 8,2 qm 2		4,08 qm 4,50 qm 8,6 qm 2		4,08 qm 4,50 qm 1,44 qm 10,0 qm 2
	58%	oder	58%	oder	61%	oder	71%
	1	Flur	1	Flur	1	Flur	1
	100%		100%		100%		100%
	12		16		16		19
	21 qm/pP		22 qm/pP		22 qm/pP		27 qm/pP

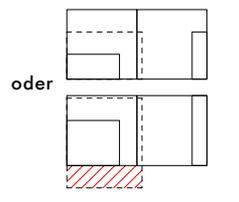
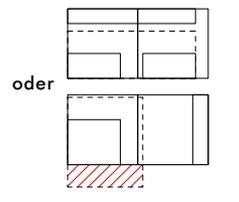
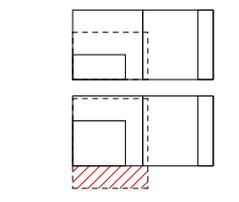
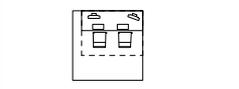
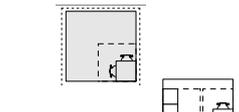
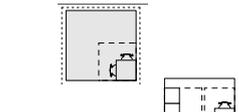
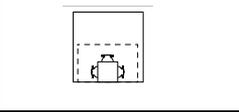
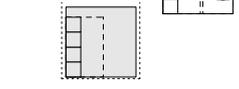
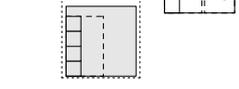
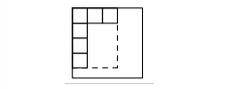
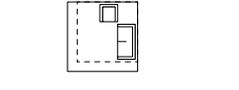
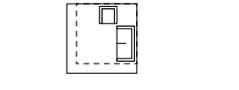
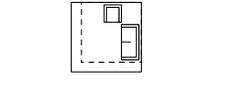
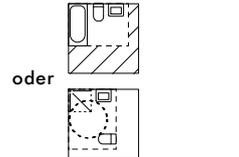
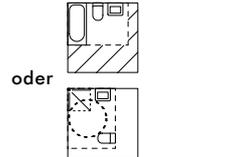
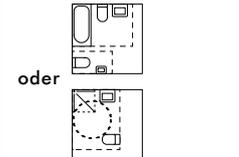
III. Rastermaß 3,00m ungerichtet

Das Rastermaß 3,00m x 3,00m der gebäudekundlichen Analyse ist ein ungerichtetes System und quadratisch. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Betten inkl. Bewegungsflächen passen nicht in ein Rastermodul
- Arbeits- und Gästezimmer benötigt zwei Raster
- Reduzierung der Bewegungsflächen in Elternzimmern
- Für eine höhere Effizienz empfiehlt es sich, zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammen zu legen
- Längliche Wohnzimmer bei Haushalten über vier Personen
- Innere Erschließung bei großen Wohnungen schwierig
- Einzelbettzimmer nutzen Rastermodul ineffizient aus
- + Kinderzimmer ohne Einschränkungen nutzbar
- + Küche und Essbereich lassen sich bei 1 und 2 PHH in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Bad und Gäste-WC lassen sich in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Insgesamt sind kompakte Wohnungen möglich

Raster x y	3,00 m	3,00 m
Raster nutzbar	2,80 m	2,80 m
Fläche Raster		9,00 qm
Fläche nutzbar		7,84 qm

Haushaltsgröße	1PHH	2PHH	3PHH	
Schlafen	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>		7,17 qm
				10,80 qm
				7,2 qm 2
				10,8 qm 2
				7,17 qm
				10,80 qm
				18,0 qm 4
				46%
				69%
				57%
Gast / Arbeit				4,41 qm
				4,4 qm
				1
				56%
Essen				2,57 qm
				2,70 qm
				5,3 qm
				1
Küche				2,57 qm
				3,60 qm
				6,2 qm
				1
				3,60 qm
				46%
				4,41 qm
				67%
				79%
				56%
Wohnen				5,76 qm
				5,8 qm
				1
				73%
Bad	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	4,08 qm
				1,44 qm
				4,1 qm
				1
				4,08 qm
				1,44 qm
				5,5 qm
				52%
				52%
				70%
Erschließung				-
				-
Min. Einheiten				5
WFL je Person				9
				39 qm/pP
				20 qm/pP
				24 qm/pP

Flexibilität und Möblierbarkeit:

- Schlafräume benötigen immer zwei Rastermodule
- Große ungenutzte Fläche in 5 PHH in der Küche und im Wohnzimmer
- + Funktionen relativ gut austauschbar, mittlere Flexibilität
- + große Anzahl an Stelloptionen für Möbel

Gebäude:

- Vier Raster, je nach Ausrichtung, für Gebäudetiefe können zu Belichtungsproblemen führen
- + Flexibilität durch relativ hohe Anzahl an Rastermodulen

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass viele Module recht effizient ausgenutzt werden und die Mindestmaße für die Nutzung eingehalten werden. Das Schlafzimmer ist jedoch nur mit Einschränkungen nutzbar. Große Wohneinheiten sind mit zusätzlichen Erschließungsflächen nutzbar. Diese Rastergröße ist für Personengruppen mit geringen bis durchschnittlichen Anforderungen nutzbar. Die Schlafräume müssen im Einzelfall betrachtet werden. Für kleine Nutzungseinheiten und kompakte Wohnungen anwendbar.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
	10,33 qm 10,80 qm 21,1 qm 4 67%		7,17 qm 10,33 qm 10,80 qm 28,3 qm 6 60%		20,65 qm 10,80 qm 31,5 qm 6 67%		7,17 qm 20,65 qm 10,80 qm 38,6 qm 7 70%
	5,70 qm 5,7 qm 2 36%		5,70 qm 5,7 qm 2 36%		11,13 qm 11,1 qm 2 71%		11,13 qm 11,1 qm 2 71%
	4,32 qm 4,3 qm 1 55%		5,04 qm 5,0 qm 1 64%		5,76 qm 5,8 qm 1 73%		6,48 qm 6,5 qm 1 83%
	5,76 qm 5,8 qm 1 73%		7,20 qm 7,2 qm 2 46%		8,82 qm 8,8 qm 2 56%		8,82 qm 8,8 qm 2 56%
	5,76 qm 5,8 qm 1 73%		7,34 qm 7,3 qm 2 47%		9,18 qm 9,2 qm 2 59%		9,42 qm 9,4 qm 2 60%
	8,16 qm 8,2 qm 2 52%		8,16 qm 8,2 qm 2 52%		4,08 qm 4,50 qm 8,6 qm 2 55%		4,08 qm 4,50 qm 1,44 qm 10,0 qm 2 64%
	1 100%	Flur	1 100%	Flur	1 100%	Flur	1 100%
	12 24 qm/pP		16 25 qm/pP		16 25 qm/pP		17 27 qm/pP

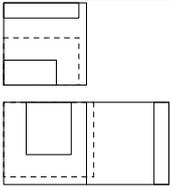
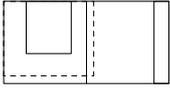
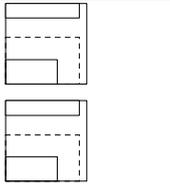
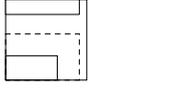
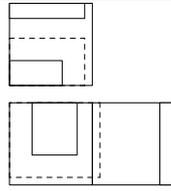
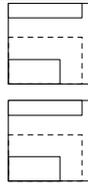
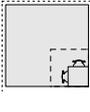
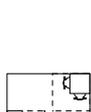
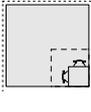
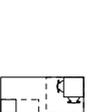
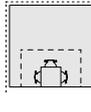
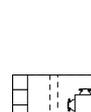
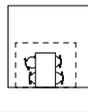
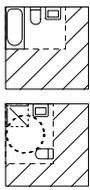
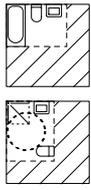
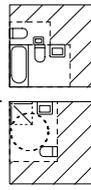
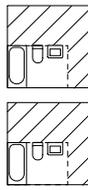
IV. Rastermaß 3,50m ungerichtet

Das Rastermaß 3,50m x 3,50m der gebäudekundlichen Analyse ist ein ungerichtetes System und quadratisch. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Doppelbett inkl. Bewegungsflächen passen nicht in ein Rastermodul
- Innere Erschließung bei großen Wohnungen schwierig
- Bäder weisen sehr großer ungenutzter Fläche auf
- Insgesamt eine schlechte Flächenausnutzung
- + Elternschlafzimmer ohne Einschränkungen nutzbar
- + Küche und Essbereich lassen sich bei 1,2 und 3 PHH in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Bad und Gäste-WC lassen sich in einem Rastermodul zusammenfassen

Raster x y	3,50 m	3,50 m
Raster nutzbar	3,30 m	3,30 m
Fläche Raster		12,25 qm
Fläche nutzbar		10,89 qm

Haushaltsgröße	1PHH	2PHH	3PHH	Flur
Schlafen	 oder 	 oder 		
	7,17 qm 7,2 qm 1	10,80 qm 10,8 qm 2	7,17 qm 10,80 qm 18,0 qm 3	
Schlafen	66%	50%	55%	
Gast / Arbeit				
			4,41 qm 4,4 qm 1	
Gast / Arbeit	-	-	40%	
Essen	 	 	 	
	2,57 qm 2,70 qm 5,3 qm 1	2,57 qm 3,60 qm 6,2 qm 1	3,60 qm 4,41 qm 8,0 qm 1	
Essen				
Küche				
	48%	57%	74%	
Küche				
Wohnen				
	5,76 qm 5,8 qm 1	5,76 qm 5,8 qm 1	5,76 qm 5,8 qm 1	
Wohnen	53%	53%	53%	
Bad	 oder 	 oder 	 oder 	
	4,08 qm 4,1 qm 1	4,08 qm 4,1 qm 1	4,08 qm 1,44 qm 5,5 qm 1	
Bad	37%	37%	51%	
Erschließung	-	-		
Min. Einheiten	4	5	7	
WFL je Person	44 qm/pP	27 qm/pP	25 qm/pP	

Flexibilität und Möblierbarkeit:

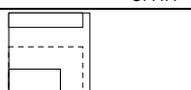
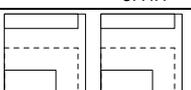
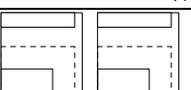
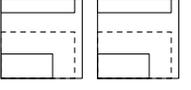
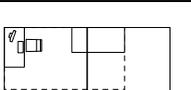
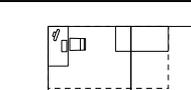
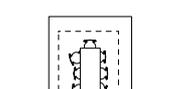
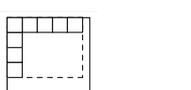
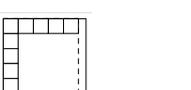
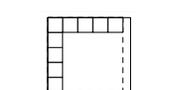
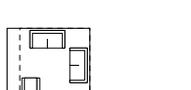
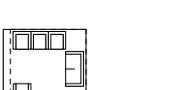
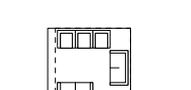
- Elternschlafzimmer benötigen immer zwei Rastermodule
- Schlafzimmer und Bäder mit großen ungenutzten Flächen
- + Funktionen relativ gut austauschbar, mittlere Flexibilität
- + Viele Möblierungsvarianten möglich

Gebäude:

- Bis zu vier Raster, je nach Ausrichtung, für Gebäudetiefe können zu Belichtungsproblemen führen
- + Flexibilität durch relativ hohe Anzahl an Rastermodulen

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass die Effizienz der Ausnutzung der Module schwankt. Die Schlafzimmer sind hier gut nutzbar, jedoch benötigen die Doppelschlafzimmer zwei Rastermodule und haben noch keinen Flächeneinsparungseffekt. Zusätzliche Rastermodule zur Erschließung sind kaum notwendig. Große Wohneinheiten sind mit zusätzlichen Erschließungsflächen nutzbar. Diese Rastergröße ist für Personengruppen mit durchschnittlichen bis größeren Anforderungen nutzbar. Für mittlere Nutzungseinheiten gut anwendbar. Einpersonenhaushalte sind hingegen überproportional groß.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
	14,34 qm 10,80 qm		21,51 qm 10,80 qm		28,68 qm 10,80 qm		35,85 qm 10,80 qm
	25,1 qm		32,3 qm		39,5 qm		46,7 qm
	4		5		6		7
	58%		59%		60%		61%
	5,70 qm		5,70 qm		11,13 qm		11,13 qm
	5,7 qm		5,7 qm		11,1 qm		11,1 qm
	1		1		2		2
	52%		52%		51%		51%
	4,32 qm		5,04 qm		5,76 qm		6,48 qm
	4,3 qm		5,0 qm		5,8 qm		6,5 qm
	1		1		1		1
	40%		46%		53%		60%
	5,76 qm		7,20 qm		8,82 qm		8,82 qm
	5,8 qm		7,2 qm		8,8 qm		8,8 qm
	1		1		1		1
	53%		66%		81%		81%
	5,76 qm		7,34 qm		9,18 qm		9,42 qm
	5,8 qm		7,3 qm		9,2 qm		9,4 qm
	1		1		1		1
	53%		67%		84%		87%
oder	8,16 qm		8,16 qm		4,08 qm		4,08 qm
		oder		oder	4,50 qm	oder	4,50 qm
	8,2 qm		8,2 qm		8,6 qm		10,0 qm
	2		2		2		2
	37%		37%		39%		46%
	1	Flur	1	Flur	1	Flur	1
	100%		100%		100%		100%
	11		12		14		15
	30 qm/pP		26 qm/pP		30 qm/pP		33 qm/pP

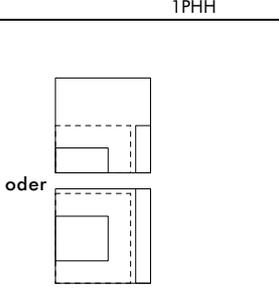
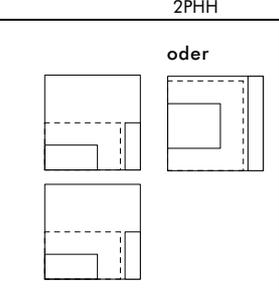
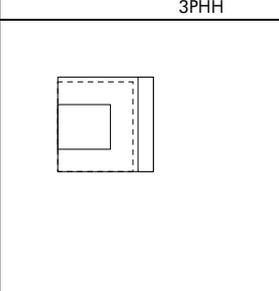
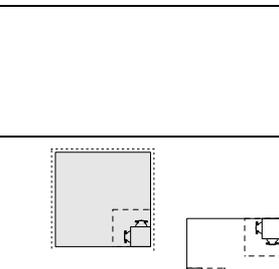
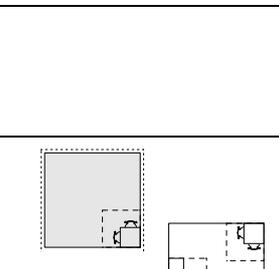
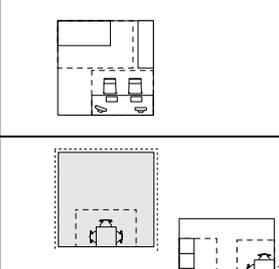
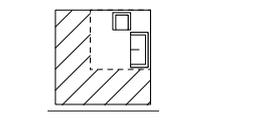
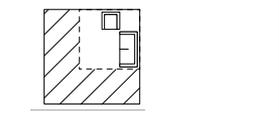
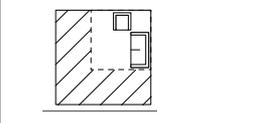
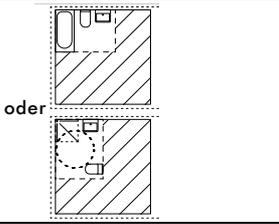
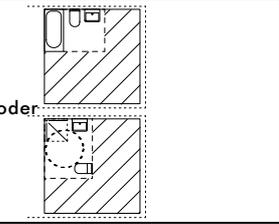
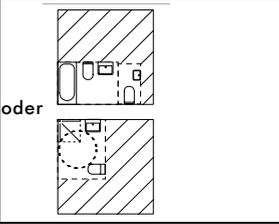
V. Rastermaß 4,00m ungerichtet

Das Rastermaß 4,00m x 4,00m der gebäudekundlichen Analyse ist ein ungerichtetes System und quadratisch. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Allgemein eine sehr ineffiziente Flächenausnutzung mit Ausnahme der Elternschlafzimmer, zusammgelegten Kinderzimmern und dem Gäste- und Arbeitszimmer
- Einzelschlafzimmer, die nicht mit anderen Funktionen kombiniert werden können, nutzen Raster sehr ineffizient aus
- + Küche und Essbereich lassen sich in 1, 2 und 3 PHH in einem Rastermodul zusammenlegen
- + Zwei Kinderzimmer oder ein Kinderzimmer und Arbeitszimmer oder Gästezimmer können in einem Rastermodul untergebracht werden
- + Alle Räume benötigen nur ein oder ein halbes Rastermodul
- + Gäste- und Arbeitszimmer passt in ein Rastermodul
- o Rastermodule bieten teilweise Platz für zwei Räume

Raster x y	4,00 m	4,00 m
Raster nutzbar	3,80 m	3,80 m
Fläche Raster		16,00 qm
Fläche nutzbar		14,44 qm

Haushaltsgröße	1PHH	2PHH	3PHH
Schlafen	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	
	7,17 qm 7,2 qm 1	10,80 qm 10,8 qm 1	7,17 qm 10,80 qm 4,41 qm 22,4 qm 2
	50%	75%	77%
Gast / Arbeit			
	-	-	
Essen			
	2,57 qm 2,70 qm 5,3 qm 1	2,57 qm 3,60 qm 6,2 qm 1	3,60 qm 4,41 qm 8,0 qm 1
Küche			
	36%	43%	55%
Wohnen			
	5,76 qm 5,8 qm 1	5,76 qm 5,8 qm 1	5,76 qm 5,8 qm 1
Bad	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>	 <p>oder</p>
	4,08 qm 4,1 qm 1	4,08 qm 4,1 qm 1	4,08 qm 1,44 qm 5,5 qm 1
	28%	28%	38%
Erschließung			
	-	-	
Min. Einheiten	4	4	5
WFL je Person	58 qm/pP	29 qm/pP	24 qm/pP

Flexibilität und Möblierbarkeit:

- Eine Vielzahl der Räume weisen ungenutzte Flächen auf
- Eingeschränkte Flexibilität in kleinen bis mittelgroßen Wohnungen durch Zusammenlegung mehrerer Funktionen
- + Bessere Flächenausnutzung durch Mehrfachbelegung von Rastermodulen
- + Große Wohnungen sind sehr kompakt

Gebäude:

- o Je nach Grundrissorganisation sind bei diesem Raster keine Belichtungsprobleme zu erwarten

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass effiziente Grundrisse nur bei Zusammenlegungen von Funktionen, primär Küche, Essen und Wohnen in kleinen Nutzungseinheiten möglich sind. Ungenutzte Flächen bei Bädern könnten als interne Erschließung mitgenutzt werden. Zusätzliche Rastermodule zur Erschließung sind praktisch nicht notwendig. Diese Rastergröße ist für Personengruppen bei großen Nutzungseinheiten mit durchschnittlichen Anforderungen, sowie bei kleinen Nutzungseinheiten mit großen Anforderungen nutzbar. Für mittlere und große Nutzungseinheiten gut anwendbar. Einpersonenhaushalte sind überproportional groß.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
	14,34 qm 10,80 qm 25,1 qm 2		21,51 qm 10,80 qm 5,70 qm 38,0 qm 3		28,68 qm 10,80 qm 39,5 qm 3		35,85 qm 10,80 qm 46,7 qm 4
	87%				91%		81%
	5,70 qm 5,7 qm 1				11,13 qm 11,1 qm 1		11,13 qm 11,1 qm 1
	39%		88%		77%		77%
	4,32 qm 4,3 qm 1		5,04 qm 5,0 qm 1		5,76 qm 5,8 qm 1		6,48 qm 6,5 qm 1
	30%		35%		40%		45%
	5,76 qm 5,8 qm 1		7,20 qm 7,2 qm 1		8,82 qm 8,8 qm 1		8,82 qm 8,8 qm 1
	40%		50%		61%		61%
	5,76 qm 5,8 qm 1		7,34 qm 7,3 qm 1		9,18 qm 9,2 qm 1		9,42 qm 9,4 qm 1
	40%		51%		64%		65%
	8,16 qm 8,2 qm 1		8,16 qm 8,2 qm 1		4,08 qm 4,50 qm 8,6 qm 1		4,08 qm 4,50 qm 1,44 qm 10,0 qm 1
	57%	oder	57%	oder	59%	oder	69%
						Flur	1
							100%
	7		7		8		9
	25 qm/pP		20 qm/pP		23 qm/pP		26 qm/pP

VI. Rastermaß 4,50m ungerichtet

Das Rastermaß 4,50m x 4,50m der gebäudekundlichen Analyse ist ein ungerichtetes System und quadratisch. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Bäder weisen allgemein eine sehr ineffiziente Flächenausnutzung auf
- Einzelschlafzimmer, die nicht mit anderen Funktionen kombiniert werden können, nutzen Raster ineffizient aus
- + Küche, Wohn- und Essbereich lassen sich in 1, 2 und 3 PHH in einem Rastermodul zusammenlegen
- + Küche und Essbereich lassen sich in 4 PHH in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Zwei Kinderzimmer oder ein Kinderzimmer und Arbeitszimmer oder Gästezimmer können in einem Rastermodul untergebracht werden
- + Alle Räume benötigen nur ein oder ein halbes Rastermodul
- o Rastermodule bieten teilweise Platz für zwei Räume

Raster x y	4,50 m	4,50 m
Raster nutzbar	4,30 m	4,30 m
Fläche Raster	20,25 qm	
Fläche nutzbar	18,49 qm	

Haushaltsgröße	1PHH	2PHH	3PHH	
Schlafen				
	7,17 qm	10,80 qm	7,17 qm	10,80 qm
	7,2 qm	10,8 qm	22,4 qm	4,41 qm
	1	1	2	
	oder			
	39%	58%		
Gast / Arbeit				
			61%	
Essen				
	2,57 qm	2,57 qm	3,60 qm	3,60 qm
	2,70 qm	3,60 qm	4,41 qm	4,41 qm
	5,76 qm	5,76 qm	5,76 qm	5,76 qm
	11,0 qm	11,9 qm	13,8 qm	
	1	1	1	
Küche				
Wohnen				
	60%	64%	74%	
Bad				
	4,08 qm	4,08 qm	4,08 qm	4,08 qm
	4,1 qm	4,1 qm	5,5 qm	1,44 qm
	1	1	1	1
	oder	oder	oder	
	22%	22%	30%	
Erschließung				
Min. Einheiten	3	3	4	
WFL je Person	55 qm/pP	28 qm/pP	25 qm/pP	

Flexibilität und Möblierbarkeit:

- Ungenutzte Fläche in Esszimmern, Küchen und Wohnzimmern der 5-7 PHH, sowie im 4 PHH im Wohnzimmer
- Eingeschränkte Flexibilität in kleinen bis mittelgroßen Wohnungen durch Zusammenlegung mehrerer Funktionen
- Rastermodule mit Bädern große ungenutzte Flächen trotz Doppelbelegung
- + Bessere Flächenausnutzung durch Mehrfachbelegung von Rastermodulen

Gebäude:

- o Je nach Grundrissorganisation sind bei diesem Raster keine Belichtungsprobleme zu erwarten

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass effiziente Grundrisse ohne Zusammenlegung von Funktionen nicht möglich sind. Ungenutzte Flächen bei Bädern könnten als interne Erschließung mitgenutzt werden. Zusätzliche Rastermodule zur Erschließung sind praktisch kaum notwendig. Diese Rastergröße ist für Personengruppen mit durchschnittlichen Anforderungen nutzbar. Einpersonenhaushalte sind überproportional groß.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
	14,34 qm 10,80 qm 25,1 qm 2		21,51 qm 10,80 qm 5,70 qm 38,0 qm 3		28,68 qm 10,80 qm 39,5 qm 3		35,85 qm 10,80 qm 11,13 qm 57,8 qm 4
	68%				71%		78%
	5,70 qm 5,7 qm 1				11,13 qm 11,1 qm 1		11,13 qm 11,1 qm 1
	31%		69%		60%		60%
	4,32 qm 5,76 qm 10,1 qm 1		5,04 qm 5,0 qm 1		5,76 qm 5,8 qm 1		6,48 qm 6,5 qm 1
	55%		27%		31%		35%
	7,20 qm 7,2 qm 1		7,20 qm 7,2 qm 1		8,82 qm 8,8 qm 1		8,82 qm 8,8 qm 1
	39%		39%		48%		48%
	5,76 qm 5,8 qm 1		7,34 qm 7,3 qm 1		9,18 qm 9,2 qm 1		9,42 qm 9,4 qm 1
	31%		40%		50%		51%
	8,16 qm 8,2 qm 1		8,16 qm 8,2 qm 1		4,08 qm 4,50 qm 8,6 qm 1		4,08 qm 4,50 qm 1,44 qm 10,0 qm 1
oder	44%	oder	44%	oder	46%	oder	54%
						Flur	1
							100%
	6		7		8		10
	28 qm/pP		26 qm/pP		30 qm/pP		37 qm/pP

- + Küche ist bei Haushalten unter fünf Personen sehr kompakt
- + Das einzelne Bad kann effizient mit Schacht im Rastermodul untergebracht werden
- + Bad und Gäste-WC lassen sich in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Kleine Wohnungen sind relativ kompakt

Flexibilität und Möblierbarkeit:

- Schlafräume benötigen immer zwei Rastermodule
- Geringe Varianz in der Möblierung
- Große ungenutzte Flächen in 1 PHH in der Küche und im Esszimmer
- Große ungenutzte Fläche bei 2 PHH im Esszimmer
- + Funktionen außer das Bad sind gut austauschbar
- + Bewegungsflächen sind ausreichend
- o Räume sind nur mit einer Funktion belegt

Gebäude:

- vier bis fünf Raster für Gebäudetiefe können zu Belichtungsproblemen führen
- + hohe Flexibilität durch hohe Anzahl an Rastermodulen

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass viele Module sehr effizient ausgenutzt werden und die Mindestmaße für die Nutzung eingehalten werden. Jedoch stellt das Schlafzimmer ein besonders kritisches Problem dar. Große Wohneinheiten werden aufgrund dieser nahezu Vollaussnutzung der Flächen große Schwierigkeiten bei der internen Erschließung haben. Dieses gerichtete Raster ist das Kleinste seiner Art des Untersuchungsspektrums und ermöglicht insgesamt kompakte Wohnungen. Es ist aber de facto kaum anwendbar.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
10,33 qm	Schlafzimmer	7,17 qm	2 x Doppelzimmer	20,65 qm	Schlafzimmer	7,17 qm	
10,80 qm	Doppelzimmer	10,33 qm	Elternzimmer	10,80 qm	2 x Doppelzimmer	20,65 qm	
	Elternzimmer	10,80 qm			Elternzimmer	10,80 qm	
21,1 qm	Gesamt	28,3 qm	Gesamt	31,5 qm	Gesamt	38,6 qm	
4	Anzahl Raster	6	Anzahl Raster	6	Anzahl Raster	8	
81%		73%		81%		74%	
5,70 qm	Gästezimmer	5,70 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	
5,7 qm	Gesamt	5,7 qm	Gesamt	11,1 qm	Gesamt	11,1 qm	
2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	
44%		44%		86%		86%	
4,32 qm		5,04 qm		5,76 qm		6,48 qm	
4,3 qm		5,0 qm		5,8 qm		6,5 qm	
1		1		1		1	
67%		78%		89%		100%	
5,76 qm		7,20 qm		8,82 qm		8,82 qm	
5,8 qm		7,2 qm		8,8 qm		8,8 qm	
1		2		2		2	
89%		55%		68%		68%	
5,76 qm		7,34 qm		9,18 qm		9,42 qm	
5,8 qm		7,3 qm		9,2 qm		9,4 qm	
1		2		2		2	
89%		57%		71%		73%	
8,16 qm	2 x Badezimmer	8,16 qm	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm	
			Vollbad	4,50 qm	Vollbad	4,50 qm	
					Gäste-WC	1,44 qm	
8,2 qm	Gesamt	8,2 qm	Gesamt	8,6 qm	Gesamt	10,0 qm	
2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	
63%		63%		66%		77%	
1	Flur	1	Flur	1	Flur	1	
100%		100%		100%		100%	
12		16		16		18	
19 qm/pP		21 qm/pP		21 qm/pP		23 qm/pP	

VIII. Rastermaß 2,65m x 3,00m gerichtet

Das Rastermaßes 2,65m x 3,00m in der gebäudekundlichen Analyse ist ein gerichtetes System und rechteckig. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Betten inkl. Bewegungsflächen passen nicht in ein Rastermodul
- Arbeits- und Gästezimmer benötigt zwei Raster
- Reduzierung der Bewegungsflächen in Elternzimmern
- Für eine höhere Effizienz empfiehlt es sich, zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammen zu legen
- Längliche Wohnzimmer bei Haushalten über vier Personen
- Innere Erschließung bei großen Wohnungen schwierig
- + Kinderzimmer ohne Einschränkungen nutzbar
- + Küche und Essbereich lassen sich bei 1 und 2 PHH in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Bad und Gäste-WC lassen sich in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Insgesamt sind kompakte Wohnungen möglich

Raster x\y	2,65 m	3,00 m
Raster nutzbar	2,45 m	2,80 m
Fläche Raster		7,95 qm
Fläche nutzbar		6,86 qm

Haushaltsgrö	1PHH	2PHH	3PHH
Schlafen	Schlafzimmer	Elternzimmer	Schlafzimmer
			Elternzimmer
	Gesamt	Gesamt	Gesamt
	Anzahl Raster	Anzahl Raster	Anzahl Raster
	7,17 qm	10,80 qm	7,17 qm
			10,80 qm
	7,2 qm	10,8 qm	18,0 qm
	2	2	4
	52%	79%	65%
Gast / Arbeit			Arbeitszimmer
			Gesamt
			Anzahl Raster
	-	-	4,41 qm
			4,4 qm
			1
			64%
Essen	Essbereich	Essbereich	
	Küche	Küche	
	Gesamt	Gesamt	
	Anzahl Raster	Anzahl Raster	
	2,57 qm	2,57 qm	3,60 qm
	2,70 qm	3,60 qm	
	2,7 qm	3,6 qm	3,6 qm
	1	1	1
			52%
Küche			4,32 qm
			4,3 qm
			1
	39%	52%	63%
Wohnen			5,76 qm
			5,8 qm
			1
	84%	84%	84%
Bad	Badezimmer	Badezimmer	Badezimmer
			Gäste-WC
	Gesamt	Gesamt	Gesamt
	Anzahl Raster	Anzahl Raster	Anzahl Raster
	4,08 qm	4,08 qm	4,08 qm
			1,44 qm
	4,1 qm	4,1 qm	5,5 qm
	1	1	1
	59%	59%	80%
Erschließung			
Min. Einheiten	5	5	9
WFL je Person	34 qm/pP	17 qm/pP	21 qm/pP

Flexibilität und Möblierbarkeit:

- Schlafräume benötigen immer zwei Rastermodule
- Geringe Varianz in der Möblierung
- Große ungenutzte Fläche in 1 PHH in der Küche mit Essecke
- + Funktionen relativ gut austauschbar, mittlere Flexibilität

Gebäude:

- Bis zu fünf Raster, je nach Ausrichtung, für Gebäudetiefe können zu Belichtungsproblemen führen
- + Flexibilität durch relativ hohe Anzahl an Rastermodulen

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass relativ viele Module sehr effizient ausgenutzt werden und die Mindestmaße für die Nutzung eingehalten werden. Das Schlafzimmer hat geringe Einbußen in den Bewegungsflächen. Große Wohneinheiten werden aufgrund dieser nahezu Vollaussutzung der Flächen große Schwierigkeiten bei der internen Erschließung haben. Dieses gerichtete Raster ermöglicht insgesamt kompakte Wohnungen.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
10,33 qm	Schlafzimmer	7,17 qm	2 x Doppelzimmer	20,65 qm	Schlafzimmer	7,17 qm	
10,80 qm	Doppelzimmer	10,33 qm	Elternzimmer	10,80 qm	2 x Doppelzimmer	20,65 qm	
	Elternzimmer	10,80 qm			Elternzimmer	10,80 qm	
21,1 qm	Gesamt	28,3 qm	Gesamt	31,5 qm	Gesamt	38,6 qm	
4	Anzahl Raster	6	Anzahl Raster	6	Anzahl Raster	8	
77%		69%		76%		70%	
5,70 qm	Gästezimmer	5,70 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	
5,7 qm	Gesamt	5,7 qm	Gesamt	11,1 qm	Gesamt	11,1 qm	
2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	
42%		42%		81%		81%	
4,32 qm		5,04 qm		5,76 qm		6,48 qm	
4,3 qm		5,0 qm		5,8 qm		6,5 qm	
1		1		1		1	
63%		73%		84%		94%	
5,76 qm		7,20 qm		8,82 qm		8,82 qm	
5,8 qm		7,2 qm		8,8 qm		8,8 qm	
1		2		2		2	
84%		52%		64%		64%	
5,76 qm		7,34 qm		9,18 qm		9,42 qm	
5,8 qm		7,3 qm		9,2 qm		9,4 qm	
1		2		2		2	
84%		53%		67%		69%	
8,16 qm	2 x Badezimmer	8,16 qm	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm	
			Vollbad	4,50 qm	Vollbad	4,50 qm	
					Gäste-WC	1,44 qm	
8,2 qm	Gesamt	8,2 qm	Gesamt	8,6 qm	Gesamt	10,0 qm	
2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	
59%		59%		63%		73%	
1	Flur	1	Flur	1	Flur	1	
100%		100%		100%		100%	
12		16		16		18	
21 qm/pP		22 qm/pP		22 qm/pP		25 qm/pP	

251 Holz: Form- und Kraftschlüssig

IX. Rastermaß 2,65m x 3,50m gerichtet

Das Rastermaßes 2,65m x 3,50m in der gebäudekundlichen Analyse ist ein gerichtetes System und rechteckig. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Betten inkl. Bewegungsflächen passen nicht in ein Rastermodul
- Arbeits- und Gästezimmer benötigt zwei Raster
- Für eine höhere Effizienz empfiehlt es sich, zwei Kinderzimmer zu einem Doppelzimmer zusammen zu legen
- Längliche Wohnzimmer bei Haushalten über vier Personen
- Innere Erschließung bei großen Wohnungen schwierig
- + Schlafzimmer ohne Einschränkungen nutzbar
- + Küche und Essbereich lassen sich bei 1- 3 PHH in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Bad und Gäste-WC lassen sich in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Insgesamt sind kompakte Wohnungen möglich

Raster x y	2,65 m	3,50 m
Raster nutzbar	2,45 m	3,30 m
Fläche Raster		9,28 qm
Fläche nutzbar		8,09 qm

Haushaltsgrö	1PHH		2PHH		3PHH		
Schlafen	Schlafzimmer	7,17 qm	Elternzimmer	10,80 qm	Schlafzimmer	7,17 qm	Doppelzimmer
					Elternzimmer	10,80 qm	Elternzimmer
	Gesamt	7,2 qm	Gesamt	10,8 qm	Gesamt	18,0 qm	Gesamt
	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	4	Anzahl Raster
		44%		67%		56%	
Gast / Arbeit					Arbeitszimmer	4,41 qm	Gästezimmer
					Gesamt	4,4 qm	Gesamt
		-		-	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster
						55%	
Essen	Essbereich	2,57 qm	Essbereich	2,57 qm	Essbereich	3,60 qm	
	Küche	2,70 qm	Küche	3,60 qm	Küche	4,32 qm	
	Gesamt	2,7 qm	Gesamt	3,6 qm	Gesamt	4,3 qm	
	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1	
		33%		45%		53%	
Küche		5,76 qm		5,76 qm		5,76 qm	
		5,8 qm		5,8 qm		5,8 qm	
		1		1		1	
		71%		71%		71%	
Bad	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm	2 x Badezimmer
					Gäste-WC	1,44 qm	
	Gesamt	4,1 qm	Gesamt	4,1 qm	Gesamt	5,5 qm	Gesamt
	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster
		50%		50%		68%	
Erschließung							Flur
	Min. Einheiten	5		5		8	
WFL je Person		40 qm/pP		20 qm/pP		22 qm/pP	

Flexibilität und Möblierbarkeit:

- Schlafräume benötigen immer zwei Rastermodule
- Große ungenutzte Flächen in 1 PHH in der Küche mit Essecke und im Einzelschlafzimmer
- Große ungenutzte Fläche in 2 PHH in der Küche mit Essecke
- Große ungenutzte Flächen in 5 PHH in der Küche und im Wohnzimmer
- + Bewegungsflächen sind ausreichend
- + Viele Möblierungsvarianten möglich

Gebäude:

- Bis zu fünf Raster, je nach Ausrichtung, für Gebäudetiefe können zu Belichtungsproblemen führen
- + Flexibilität durch relativ hohe Anzahl an Rastermodulen

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass die Effizienz der Ausnutzung der Module recht schlecht ist. Die Schlafzimmer sind hier gut nutzbar, benötigen jedoch zwei Rastermodule. Zusätzliche Rastermodule zur Erschließung sind kaum notwendig. Große Wohneinheiten sind mit zusätzlichen Erschließungsflächen nutzbar. Diese Rastergröße ist für Personengruppen mit durchschnittlichen Anforderungen nutzbar und ermöglicht insgesamt relativ kompakte Wohnungen.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
10,33 qm	3 x Schlafzimmer	7,17 qm	2 x Doppelzimmer	20,65 qm	Schlafzimmer	7,17 qm	
10,80 qm	Doppelzimmer	10,33 qm	Elternzimmer	10,80 qm	2 x Doppelzimmer	20,65 qm	
	Elternzimmer	10,80 qm			Elternzimmer	10,80 qm	
21,1 qm	Gesamt	28,3 qm	Gesamt	31,5 qm	Gesamt	38,6 qm	
4	Anzahl Raster	6	Anzahl Raster	6	Anzahl Raster	8	
65%		58%		65%		60%	
5,70 qm	Gästezimmer	5,70 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	
5,7 qm	Gesamt	5,7 qm	Gesamt	11,1 qm	Gesamt	11,1 qm	
1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	
71%		71%		69%		69%	
4,32 qm		5,04 qm		5,76 qm		6,48 qm	
4,3 qm		5,0 qm		5,8 qm		6,5 qm	
1		1		1		1	
53%		62%		71%		80%	
5,76 qm		7,20 qm		8,82 qm		8,82 qm	
5,8 qm		7,2 qm		8,8 qm		8,8 qm	
1		2		2		2	
71%		45%		55%		55%	
5,76 qm		7,34 qm		9,18 qm		9,42 qm	
5,8 qm		7,3 qm		9,2 qm		9,4 qm	
1		2		2		2	
71%		45%		57%		58%	
8,16 qm	2 x Badezimmer	8,16 qm	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm	
			Vollbad	4,50 qm	Vollbad	4,50 qm	
					Gäste-WC	1,44 qm	
8,2 qm	Gesamt	8,2 qm	Gesamt	8,6 qm	Gesamt	10,0 qm	
2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	
50%		50%		53%		62%	
1	Flur	1	Flur	1	Flur	1	
100%		100%		100%		100%	
11		15		16		18	
22 qm/pP		24 qm/pP		26 qm/pP		29 qm/pP	

X. Rastermaß 2,65m x 4,00m gerichtet

Das Rastermaßes 2,65m x 4,00m in der gebäudekundlichen Analyse ist ein gerichtetes System und rechteckig. Es werden die Haushaltsgrößen für eine bis sieben Personen untersucht.

Funktionalität:

- Doppelbett inkl. Bewegungsflächen passen nicht in ein Rastermodul
- Arbeits- und Gästezimmer benötigt zwei Raster
- Innere Erschließung bei großen Wohnungen schwierig
- Rastermodul mit nur einem Bad mit großer ungenutzter Fläche
- + Kleines Schlafzimmer passt effizient inkl. Bewegungsfläche in ein Rastermodul
- + Elternschlafzimmer ohne Einschränkungen nutzbar
- + Küche und Essbereich lassen sich bei 1,2 und 3 PHH in einem Rastermodul zusammenfassen
- + Bäder lassen sich in einem Rastermodul zusammenfassen

Raster x y	2,65 m	4,00 m
Raster nutzbar	2,45 m	3,80 m
Fläche Raster		10,60 qm
Fläche nutzbar		9,31 qm

HaushaltsgröÙ	1PHH		2PHH		3PHH	
Schlafen	Schlafzimmer	7,17 qm	Elternzimmer	10,80 qm	Schlafzimmer	7,17 qm
					Elternzimmer	10,80 qm
	Gesamt	7,2 qm	Gesamt	10,8 qm	Gesamt	18,0 qm
	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	3
		77%		58%		64%
Gast / Arbeit					Arbeitszimmer	4,41 qm
					Gesamt	4,4 qm
					Anzahl Raster	1
						47%
Essen	Essbereich	2,57 qm	Essbereich	2,57 qm	Essbereich	3,60 qm
	Küche	2,70 qm	Küche	3,60 qm	Küche	4,32 qm
	Gesamt	5,3 qm	Gesamt	6,2 qm	Gesamt	7,9 qm
	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1
		57%		66%		85%
Küche		5,76 qm		5,76 qm		5,76 qm
		5,8 qm		5,8 qm		5,8 qm
		1		1		1
		62%		62%		62%
Bad	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm
					Gäste-WC	1,44 qm
	Gesamt	4,1 qm	Gesamt	4,1 qm	Gesamt	5,5 qm
	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1
		44%		44%		59%
Erschließung						
Min. Einheiten		4		5		7
WFL je Person		37 qm/pP		23 qm/pP		22 qm/pP

Flexibilität und Möblierbarkeit:

- Elternschlafzimmer benötigen immer zwei Rastermodule
- Große ungenutzte Flächen in 1 und 2 PHH im Bad
- Ungenutzte Fläche in 6 PHH im Wohnzimmer
- + Bewegungsflächen sind ausreichend
- + Viele Möblierungsvarianten möglich
- + Sehr gute Flächenausnutzung in 6 und 7 PHH in Küchen und Bädern

Gebäude:

- Bis zu fünf Raster, je nach Ausrichtung, für Gebäudetiefe können zu Belichtungsproblemen führen
- + Flexibilität durch relativ hohe Anzahl an Rastermodulen

Analyse:

Die Untersuchung zeigt, dass die Effizienz der Ausnutzung der Module leicht schwankt. Die Schlafzimmer sind hier gut nutzbar, jedoch benötigen die Elternschlafzimmer zwei Rastermodule. Zusätzliche Rastermodule zur Erschließung sind in großen Wohnungen notwendig. Diese Rastergröße ist für Personengruppen mit durchschnittlichen Anforderungen nutzbar.

4PHH		5PHH		6PHH		7PHH	
14,34 qm	3 x Schlafzimmer	21,51 qm	4 x Schlafzimmer	28,68 qm	5 x Schlafzimmer	35,85 qm	
10,80 qm	Elternzimmer	10,80 qm	Elternzimmer	10,80 qm	Elternzimmer	10,80 qm	
25,1 qm	Gesamt	32,3 qm	Gesamt	39,5 qm	Gesamt	46,7 qm	
4	Anzahl Raster	5	Anzahl Raster	6	Anzahl Raster	7	
68%		69%		71%		72%	
5,70 qm	Gästezimmer	5,70 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	Gäste- und Arbeitszimmer	11,13 qm	
5,7 qm	Gesamt	5,7 qm	Gesamt	11,1 qm	Gesamt	11,1 qm	
1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	2	Anzahl Raster	2	
61%		61%		60%		60%	
4,32 qm		5,04 qm		5,76 qm		6,48 qm	
4,3 qm		5,0 qm		5,8 qm		6,5 qm	
1		1		1		1	
46%		54%		62%		70%	
5,76 qm		7,20 qm		8,82 qm		8,82 qm	
5,8 qm		7,2 qm		8,8 qm		8,8 qm	
1		1		1		1	
62%		77%		95%		95%	
5,76 qm		7,34 qm		9,18 qm		9,42 qm	
5,8 qm		7,3 qm		9,2 qm		9,4 qm	
1		1		2		2	
62%		79%		49%		51%	
8,16 qm	2 x Badezimmer	8,16 qm	Badezimmer	4,08 qm	Badezimmer	4,08 qm	
			Vollbad	4,50 qm	Vollbad	4,50 qm	
					Gäste-WC	1,44 qm	
8,2 qm	Gesamt	8,2 qm	Gesamt	8,6 qm	Gesamt	10,0 qm	
1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	1	Anzahl Raster	2	
88%		88%		92%		54%	
1	Flur	1	Flur	1	Flur	1	
100%		100%		100%		100%	
10		11		14		16	
23 qm/pP		20 qm/pP		26 qm/pP		30 qm/pP	

ANHANG B:

GEGENÜBERSTELLUNG METALLISCHE
VERBINDUNGEN UND HOLZVERBINDUNGEN

Abbildung 124:
Gegenüberstellung metallische
Verbindung und Holzverbindung
Otto-Hahn-Straße
(DGJ Architektur und Pirmin Jung
Ingenieure, 2019).

Ausführung in Holz mit metallischen Verbindungsmitteln					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-200mm	480 m ²	0,2 m ³ /m ²	96,0 m ³	105,80 €/m ²	50.784 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	14,00 €/m ²	5.614,00 €
TGS 6x220mm Randverschr.	960 m ²			1,46 €/Stk	1.402 €
TGS 6x220mm an Unterzug	150 m ²			1,46 €/Stk	219 €
Unterzüge					
GL24h, 240/320mm	52,8 m	0,08 m ³ /m	4,1 m ³	69 €/lfdm	3.658 €
GL24h, 240/480mm	12,7 m	0,12 m ³ /m	1,5 m ³	94 €/lfdm	1.193 €
Stützen					
GL24h, 240/240mm	32,5 m	0,06 m ³ /m	1,9 m ³	57 €/lfdm	1.848 €
SUMME					64.718 €

Ausführung mit Holz-Holz-Verbindungen					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-200mm	480 m ²	0,2 m ³ /m ²	96,0 m ³	105,80 €/m ²	50.784 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	4,50 €/m ²	1.804,50 €
X-Fix-C-Verbinder	120 Stk.			24,80 €/Stk	2.976 €
Buchendübel Ø20mm	1230 Stk.			4,50 €/Stk	5.535 €
Unterzüge					
GL24h, 240/320mm	52,8 m	0,08 m ³ /m	4,1 m ³	69,28 €/lfdm	3.658 €
GL24h, 240/480mm	12,7 m	0,12 m ³ /m	1,5 m ³	93,92 €/lfdm	1.193 €
Stützen					
GL24h, 240/240mm	32,5 m	0,06 m ³ /m	1,9 m ³	56,96 €/lfdm	1.848 €
SUMME					67.799 €

Ausführung in Holz mit metallischen Verbindungsmitteln					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-260mm	705 m ²	0,26 m ³ /m ²	183,3 m ³	150,60 €/m ²	106.173 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	14,00 €/m ²	5.614,00 €
Randverschraubung	520 Stk.			1,65 €/Stk	858 €
Schrauben an Holzträger	270 Stk.			1,65 €/Stk	446 €
Unterzüge					
GL24h, 240/320mm	24,0 m	0,08 m ³ /m	1,8 m ³	69,28 €/lfdm	1.663 €
GL24h, 240/480mm	13,5 m	0,12 m ³ /m	1,6 m ³	93,92 €/lfdm	1.268 €
Stützen					
GL24h, 240/240mm	18,6 m	0,06 m ³ /m	1,1 m ³	56,96 €/lfdm	1.059 €
SUMME					117.081 €

Abbildung 125:
Gegenüberstellung metallische
Verbindung und Holzverbindung
Ganghoferstraße
(DGJ Architektur und Pirmin Jung
Ingenieure, 2019).

Ausführung mit Holz-Holz-Verbindungen					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-260mm	705 m ²	0,26 m ³ /m ²	183,3 m ³	150,60 €/m ²	106.173 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	4,50 €/m ²	1.804,50 €
X-Fix-C-Verbinder	176 Stk.			24,80 €/Stk	4.371 €
Buchendübel Ø20mm	890 Stk.			4,50 €/Stk	4.005 €
Unterzüge					
GL24h, 240/320mm	24,0 m	0,08 m ³ /m	1,8 m ³	69,28 €/lfdm	1.663 €
GL24h, 240/480mm	13,5 m	0,12 m ³ /m	1,6 m ³	93,92 €/lfdm	1.268 €
Stützen					
GL24h, 240/240mm	18,6 m	0,06 m ³ /m	1,1 m ³	56,96 €/lfdm	1.059 €
SUMME					120.344 €

Abbildung 126:
Gegenüberstellung metallische
Verbindung und Holzverbindung
Pistoriusplatz-Haus 1
(DGJ Architektur und Pirmin Jung
Ingenieure, 2019).

Ausführung in Holz mit metallischen Verbindungsmitteln					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-160mm	700 m ²	0,20 m ³ /m ²	140,0 m ³	83,10 €/m ²	58.170,00 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	14,00 €/m ²	5.614,00 €
Randverschraubung	994 Stk.			1,00 €/Stk	994,00 €
Schrauben an Holzträger	820 Stk.			1,05 €/Stk	861,00 €
Unterzüge					
GL24h, 320/360mm	120,0 m	0,12 m ³ /m	13,8 m ³	93,92 €/lfdm	11.270,40 €
Stützen					
GL24h, 320/320mm	47,0 m	0,10 m ³ /m	4,8 m ³	56,96 €/lfdm	2.677,12 €
SUMME					79.586,52 €

Ausführung mit Holz-Holz-Verbindungen					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-160mm	700 m ²	0,20 m ³ /m ²	140,0 m ³	83,10 €/m ²	58.170,00 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	4,50 €/m ²	1.804,50 €
X-Fix-C-Verbinder	175 Stk.			24,80 €/Stk	4.340,00 €
Buchendübel Ø20mm	2160 Stk.			3,84 €/Stk	8.294,40 €
Unterzüge					
GL24h, 320/360mm	120,0 m	0,12 m ³ /m	13,8 m ³	93,92 €/lfdm	11.270,40 €
Stützen					
GL24h, 320/320mm	47,0 m	0,10 m ³ /m	4,8 m ³	56,96 €/lfdm	2.677,12 €
SUMME					86.556,42 €

Ausführung in Holz mit metallischen Verbindungsmitteln					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkoste n
BSP-Decken					
BSP-120mm	400 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,0 m ³	62,90 €/m ²	25.160,00 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	14,00 €/m ²	5.614,00 €
TGS 6x180mm Randverschr.	800 Stk.			1,23 €/Stk	984 €
TGS 6x140mm an Holzträger	760 Stk.			0,44 €/Stk	334 €
Unterzüge					
GL24c, 200/280mm	94,0 m	0,06 m ³ /m	5,3 m ³	51,96 €/lfdm	4.884,24 €
GL24c, 120/280mm	94,0 m	0,03 m ³ /m	3,2 m ³	33,48 €/lfdm	3.147,12 €
Stützen					
GL24h, 200/200mm	90,0 m	0,04 m ³ /m	3,6 m ³	39,64 €/lfdm	3.567,60 €
GL24h, 200/120mm	120,0 m	0,02 m ³ /m	2,9 m ³	27,32 €/lfdm	3.278,40 €
BauBuche, 200/200mm	30,0 m	0,04 m ³ /m	1,2 m ³	63,08 €/lfdm	1.892,40 €
SUMME					48.862 €

Abbildung 127:
Gegenüberstellung metallische Ver-
bindung und Holzverbindung IBA
Heidelberg
(DGJ Architektur und Pirmin Jung
Ingenieure, 2019).

Ausführung mit Holz-Holz-Verbindungen					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkoste n
BSP-Decken					
BSP-120mm	400 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,0 m ³	62,90 €/m ²	25.160,00 €
Verlegekosten Decke	401 m ²	0,12 m ³ /m ²	48,1 m ³	4,50 €/m ²	1.804,50 €
X-Fix-C-Verbinder	100 Stk.			24,80 €/Stk	2.480,00 €
Buchendübel Ø20mm; l=220mm	1650 Stk.			3,84 €/Stk	6.336,00 €
Unterzüge					
GL24c, 200/280mm	94,0 m	0,06 m ³ /m	5,3 m ³	51,96 €/lfdm	4.884,24 €
GL24c, 120/280mm	94,0 m	0,03 m ³ /m	3,2 m ³	33,48 €/lfdm	3.147,12 €
Stützen					
GL24h, 200/200mm	90,0 m	0,04 m ³ /m	3,6 m ³	39,64 €/lfdm	3.567,60 €
GL24h, 200/120mm	120,0 m	0,02 m ³ /m	2,9 m ³	27,32 €/lfdm	3.278,40 €
BauBuche, 200/200mm	30,0 m	0,04 m ³ /m	1,2 m ³	63,08 €/lfdm	1.892,40 €
SUMME					52.550,26 €

Abbildung 128:
Gegenüberstellung metallische
Verbindung und Holzverbindung
Friedberger Landstraße
(DGJ Architektur und Pirmin Jung
Ingenieure, 2019).

Ausführung in Holz mit metallischen Verbindungsmitteln					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-120mm	835 m ²	0,12 m ³ /m ²	100,2 m ³	62,90 €/m ²	52.521,50 €
Verlegekosten Decke	836 m ²	0,12 m ³ /m ²	100,3 m ³	14,00 €/m ²	11.704,00 €
TGS 6x180mm Randverschr.	1670 Stk.			1,23 €/Stk	2.054,10 €
TGS 6x140mm an Holzträger	1130 Stk.			0,44 €/Stk	497,20 €
Unterzüge					
GL24c, 240/280mm	225,0 m	0,07 m ³ /m	15,1 m ³	58,12 €/lfdm	13.077,00 €
Stützen					
GL28c, 240/240mm	132,0 m	0,06 m ³ /m	7,6 m ³	51,96 €/lfdm	6.858,72 €
GL28c, 160/240mm	150,0 m	0,04 m ³ /m	5,8 m ³	39,64 €/lfdm	5.946,00 €
SUMME					92.658,52 €

Ausführung mit Holz-Holz-Verbindungen					
Bauteil	Menge/ Laufmeter	Volumen pro Einheit	Gesamt- volumen	Kosten pro Einheit	Gesamtkosten
BSP-Decken					
BSP-120mm	835 m ²	0,12 m ³ /m ²	100,2 m ³	62,90 €/m ²	52.521,50 €
Verlegekosten Decke	836 m ²	0,12 m ³ /m ²	100,3 m ³	4,50 €/m ²	3.762,00 €
X-Fix-C-Verbinder	209 Stk.			24,80 €/Stk	5.177,00 €
Buchendübel Ø20mm; l=220mm	3780 Stk.			3,84 €/Stk	14.515,20 €
Unterzüge					
GL24c, 240/280mm	225,0 m	0,07 m ³ /m	15,1 m ³	58,12 €/lfdm	13.077,00 €
Stützen					
GL28c, 240/240mm	132,0 m	0,06 m ³ /m	7,6 m ³	51,96 €/lfdm	6.858,72 €
GL28c, 160/240mm	150,0 m	0,04 m ³ /m	5,8 m ³	39,64 €/lfdm	5.946,00 €
SUMME					101.857,42 €

ANHANG C:

PLANUNG FALLSTUDIE 1

DGJ 219 ARRIVAL CITY 4.0

FALLSTUDIE 1
ARRIVAL CITY 4.0
2015

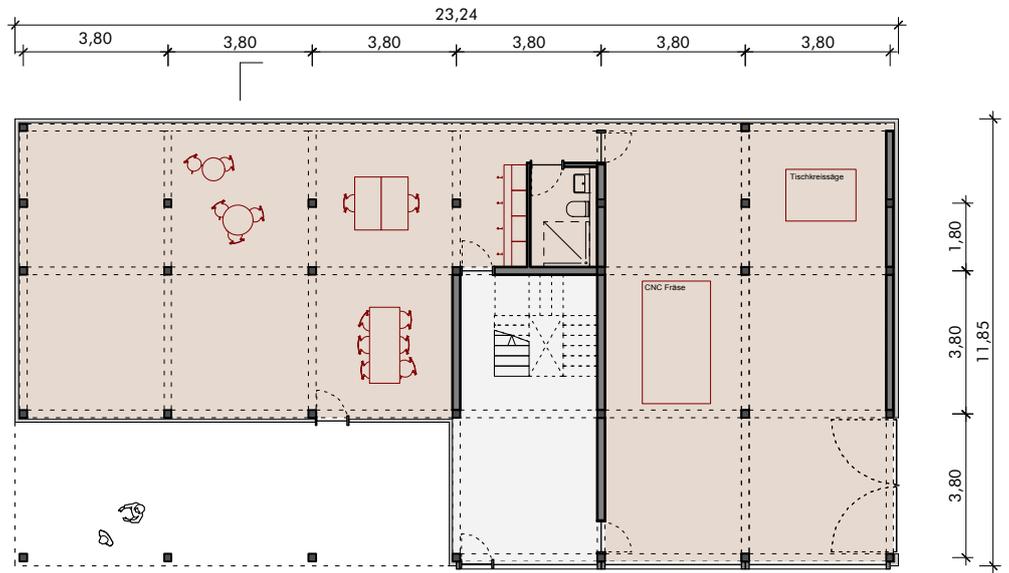
Grundrisse Baustufe 1
 M 1:200

Baufeld
 x-Achse 23,25m
 y-Achse: 11,85m

Raster: 3,80*3,80m
 Geschosse: 5

BFG: 1461,55m²
 WFL: 1092,47m²
 WFL/BGF: 0,75

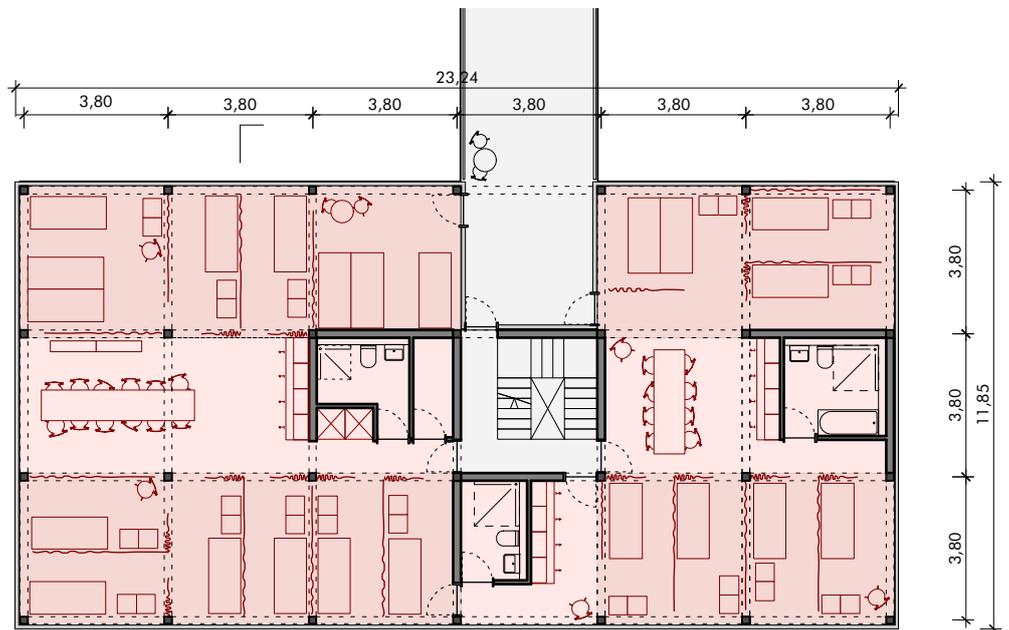
EG

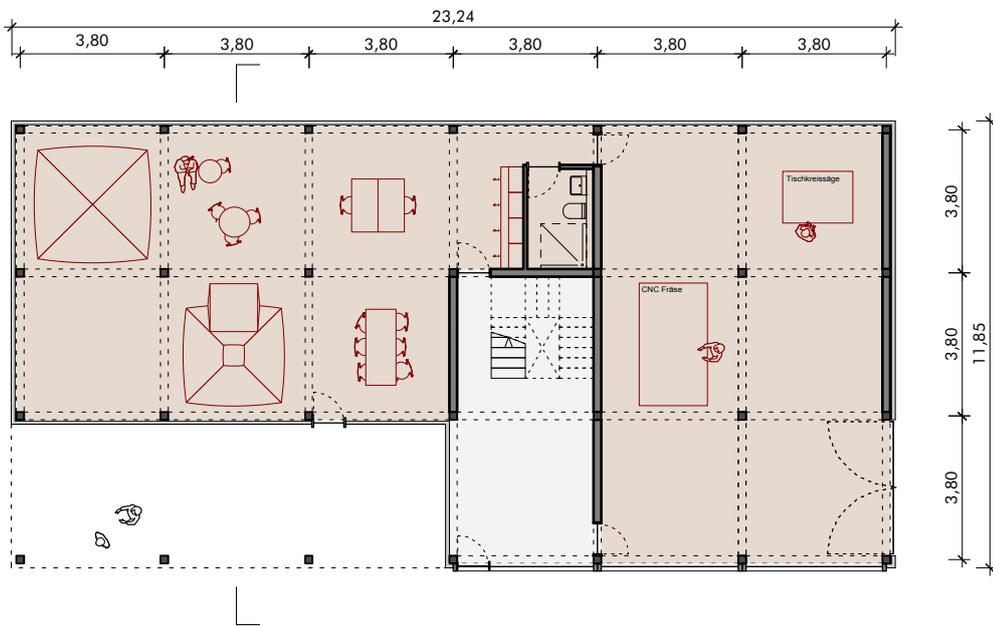


1. OG



2. OG

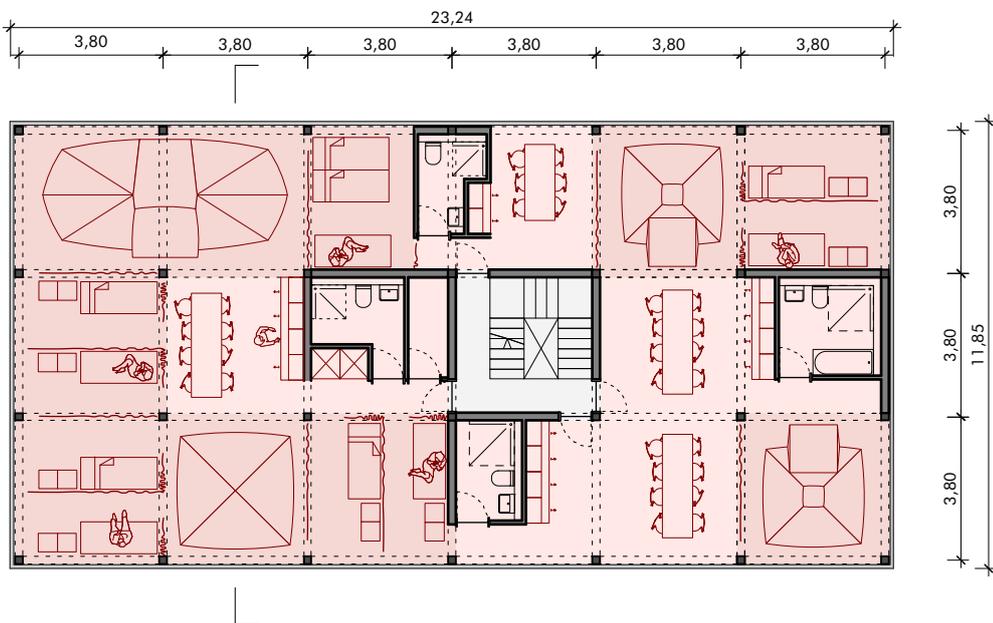




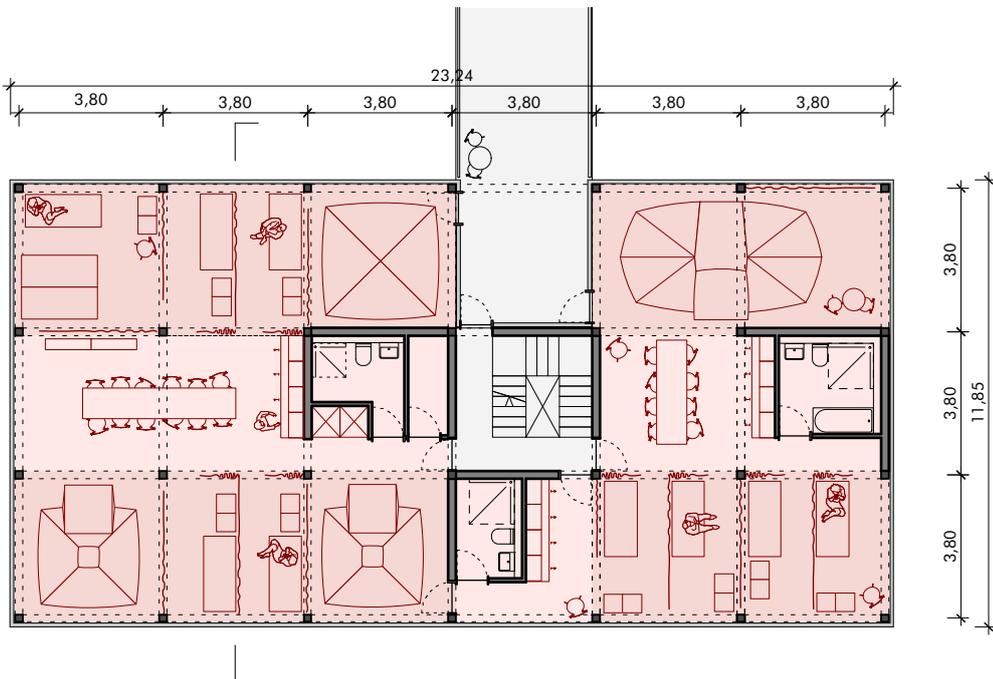
EG

FALLSTUDIE 1
ARRIVAL CITY 4.0
2015

Grundrisse Baustufe 2
 M 1:200



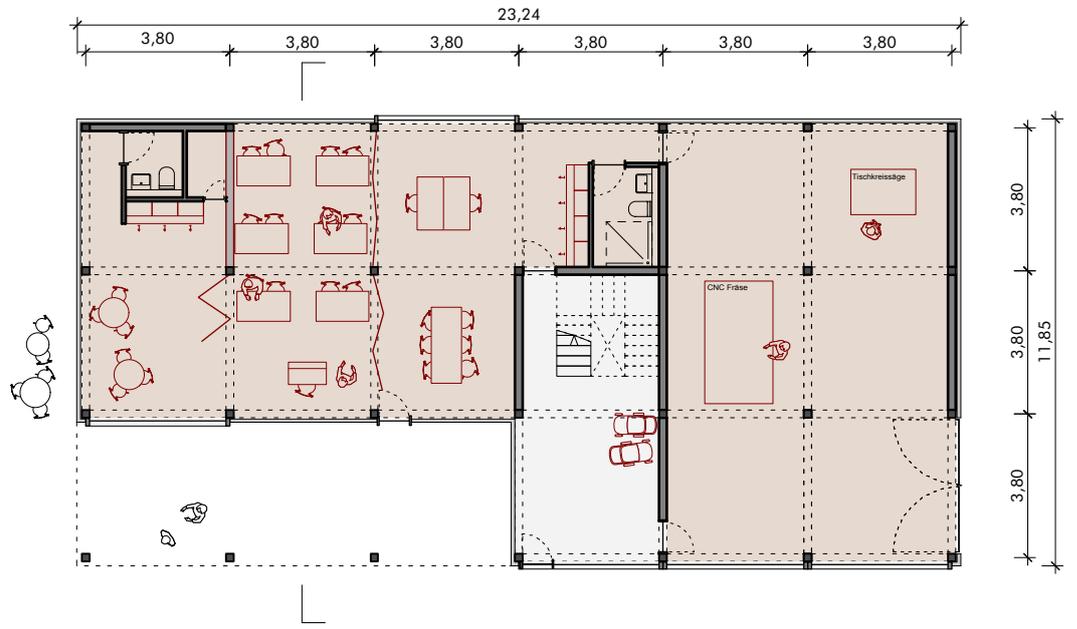
1. OG



2. OG

FALLSTUDIE 1
ARRIVAL CITY 4.0
2015

Grundrisse Baustufe 3
M 1:200



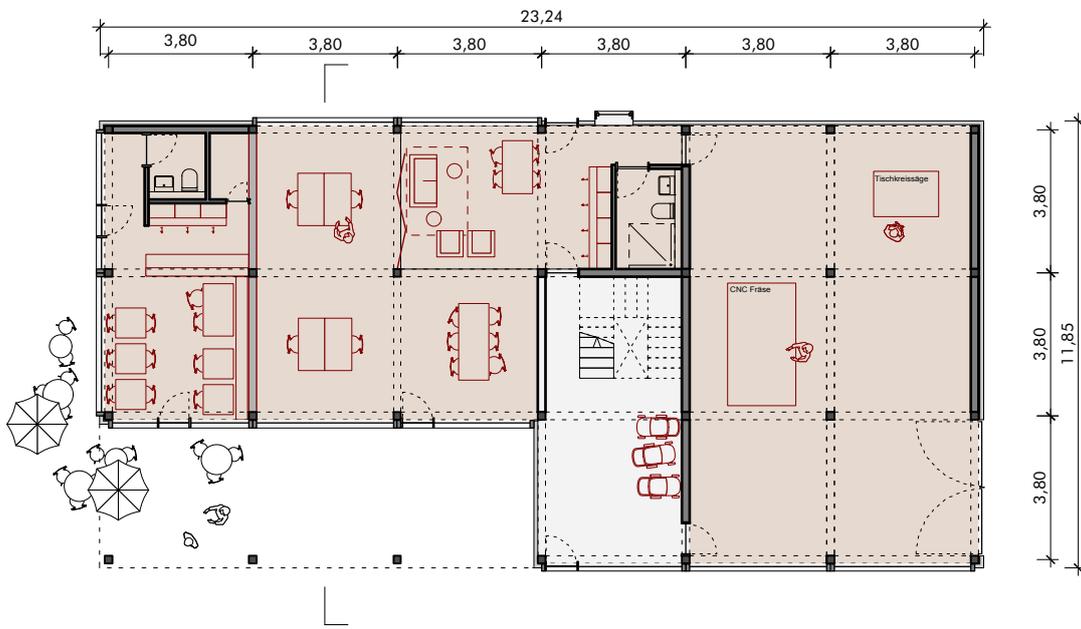
EG



1. OG



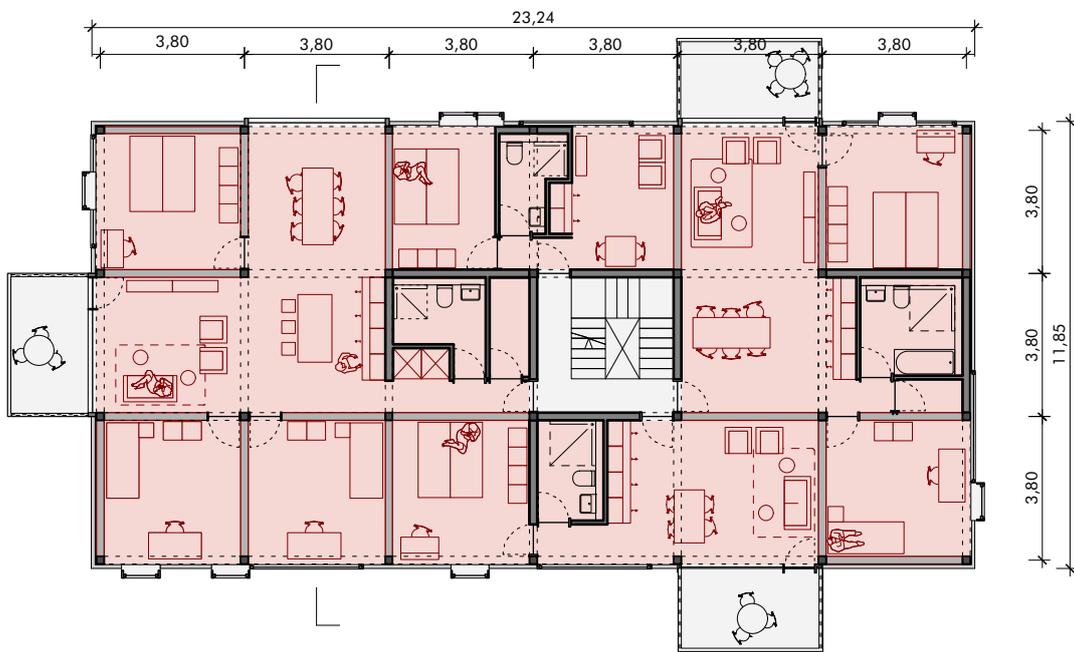
2. OG



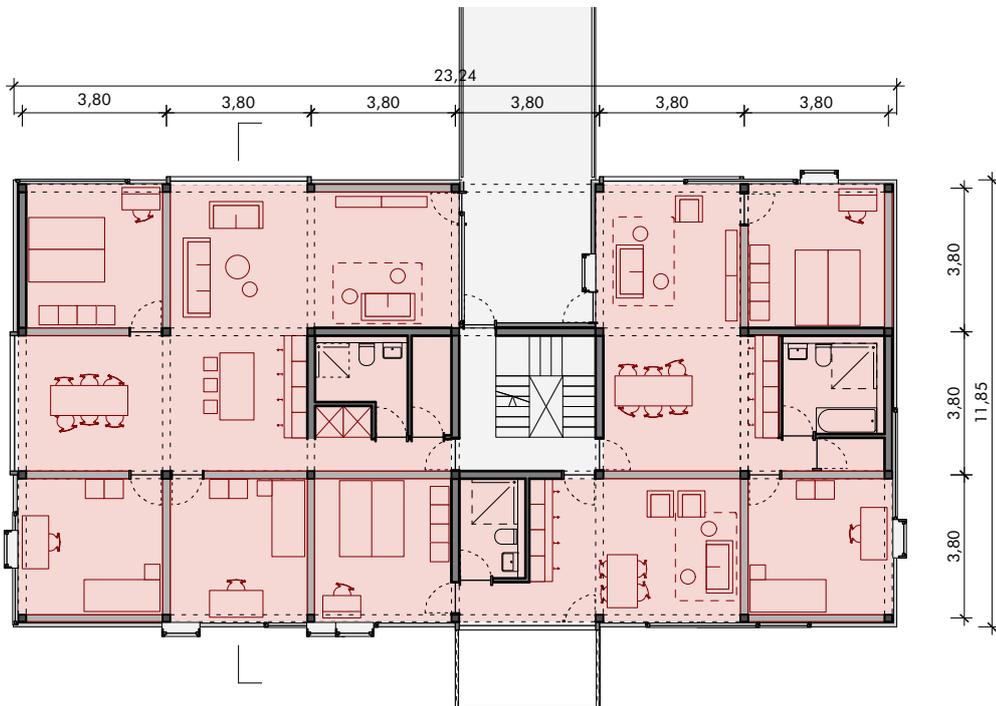
EG

**FALLSTUDIE 1
ARRIVAL CITY 4.0
2015**

Grundrisse Nutzungsphase
M 1:200



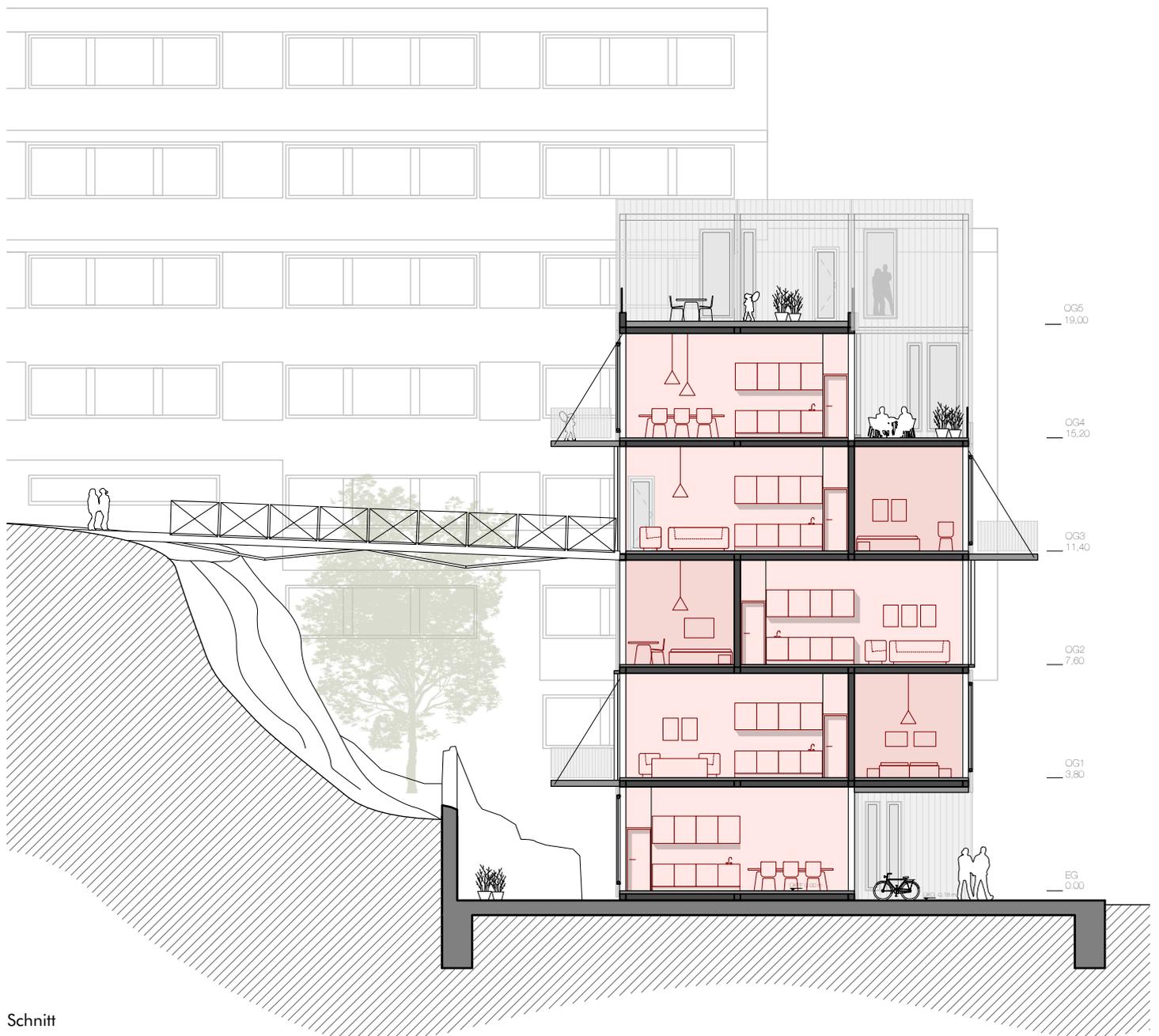
1. OG



2. OG

FALLSTUDIE 1
ARRIVAL CITY 4.0
2015

Schnitt
M 1:200



Schnitt

ANHANG D:

PLANUNG FALLSTUDIE 2

DGJ 228 - MEHRFAMILIENHAUS

WOHNGUPPE GEMEINSAM SUFFIZIENT WOHNEN

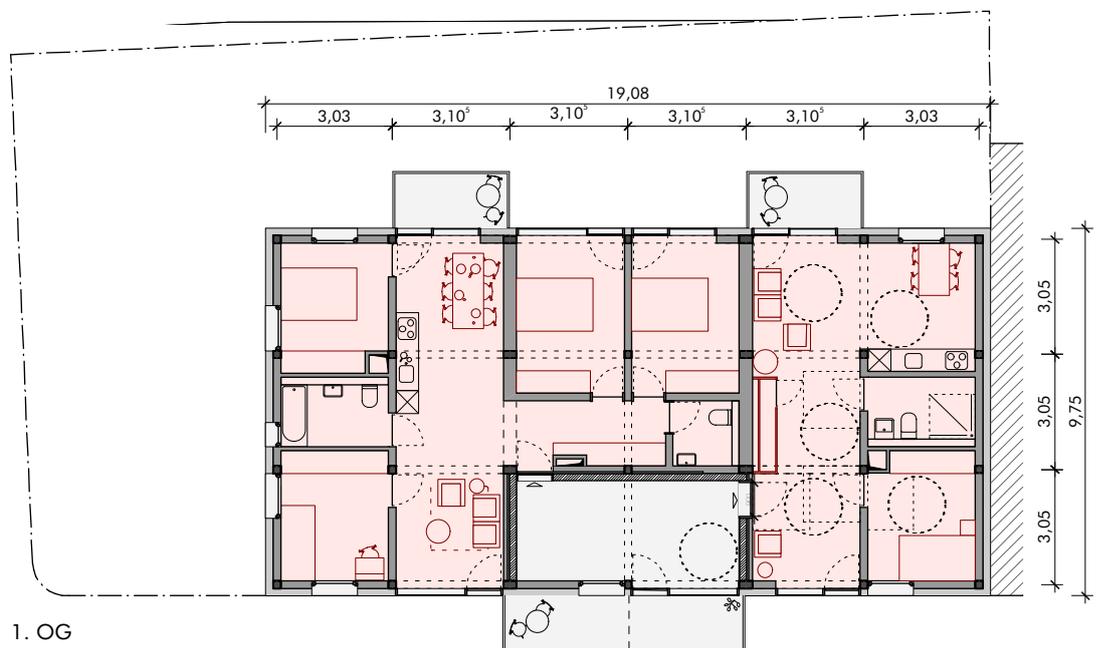
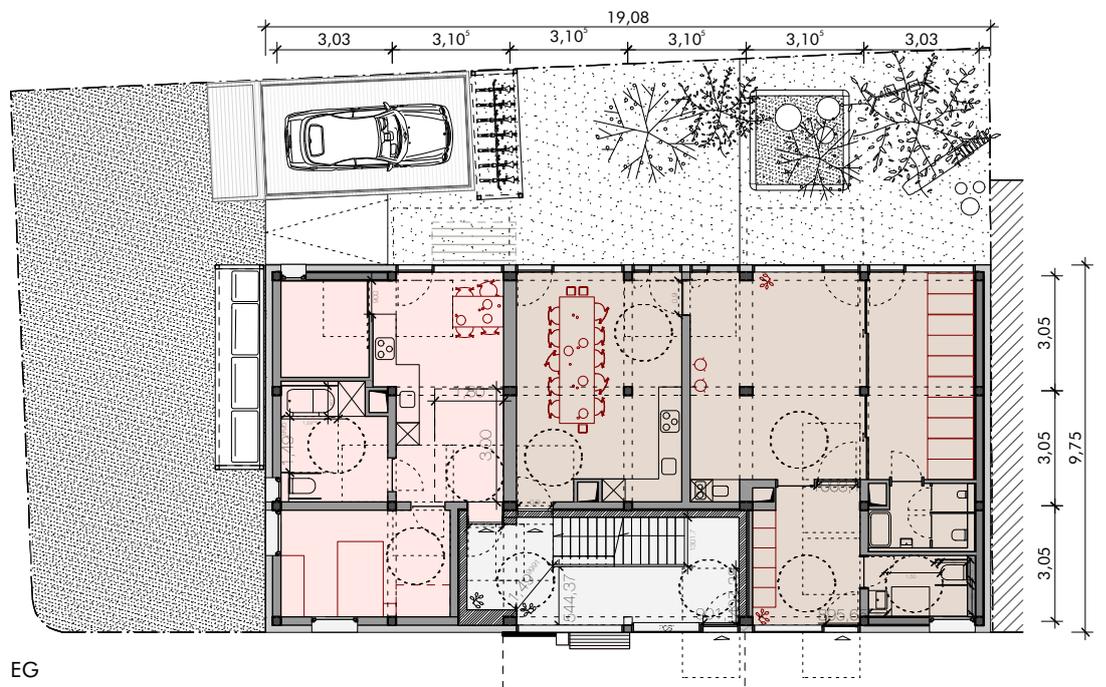
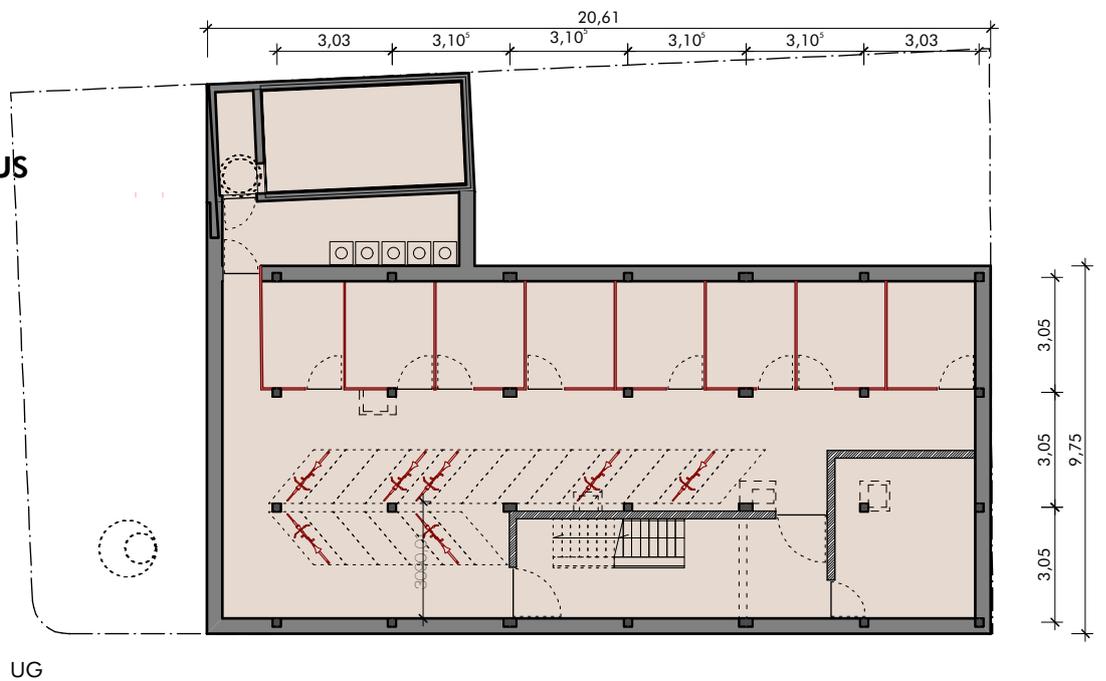
FALLSTUDIE 2 DGJ 228 - MEHRFAMILIENHAUS

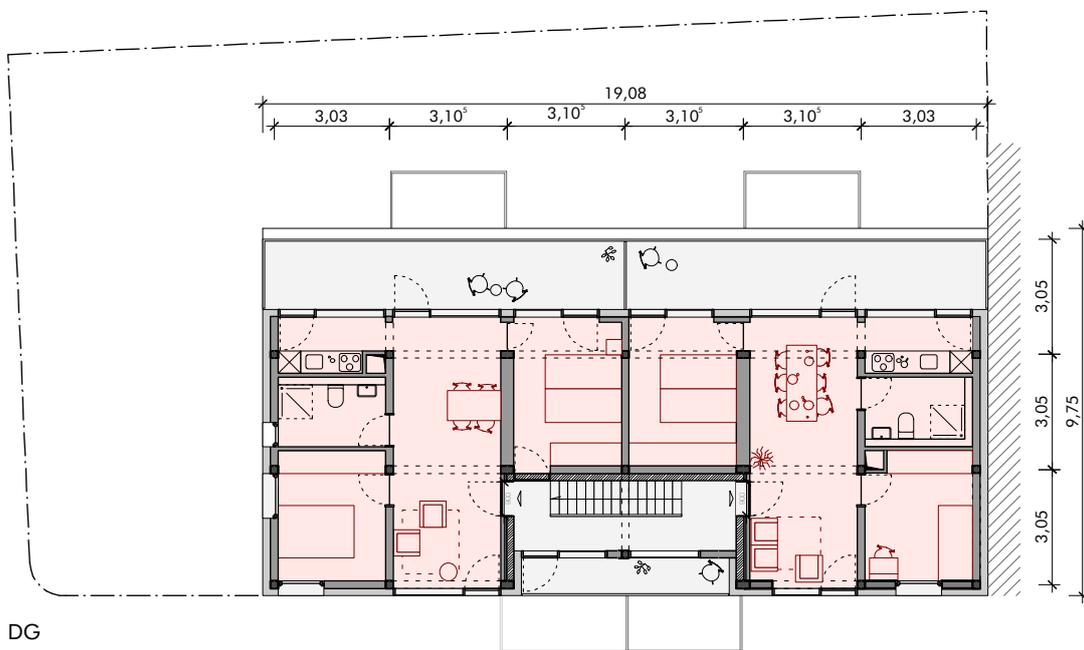
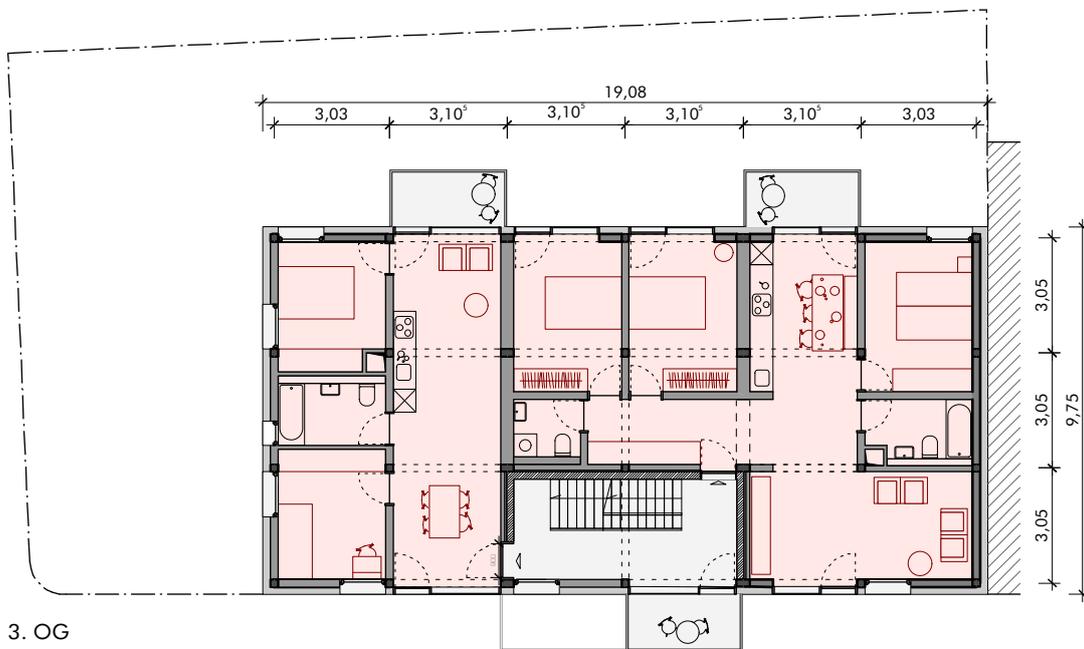
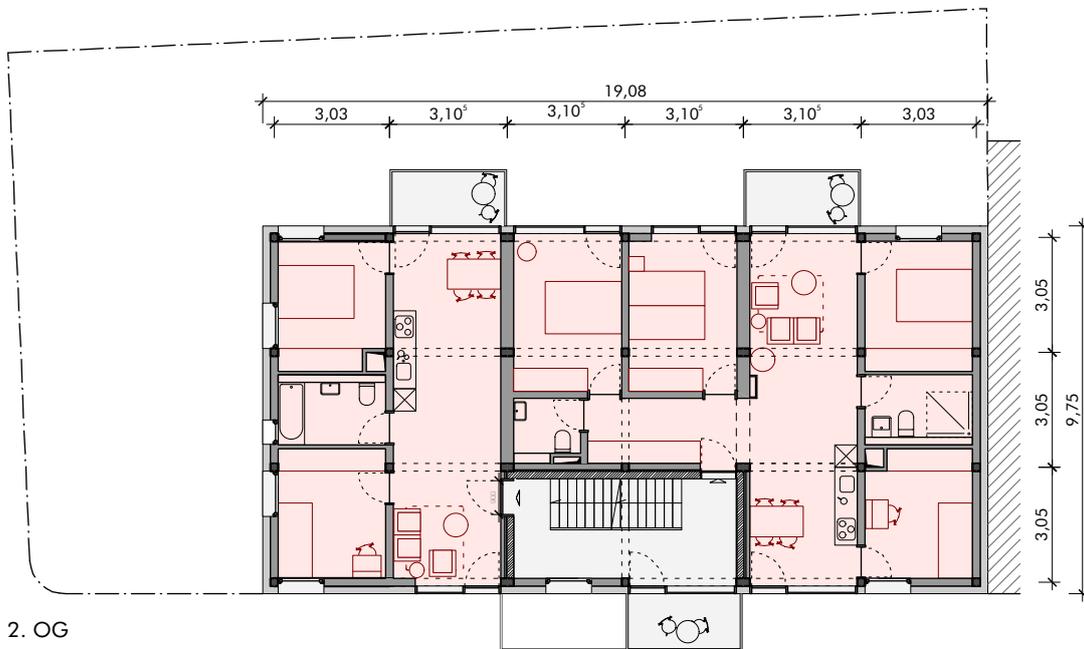
Grundrisse
M 1:200

Baufeld
x-Achse 19,08m
y-Achse: 9,75m

Raster: 3,105*3,05m
Geschosse: 6

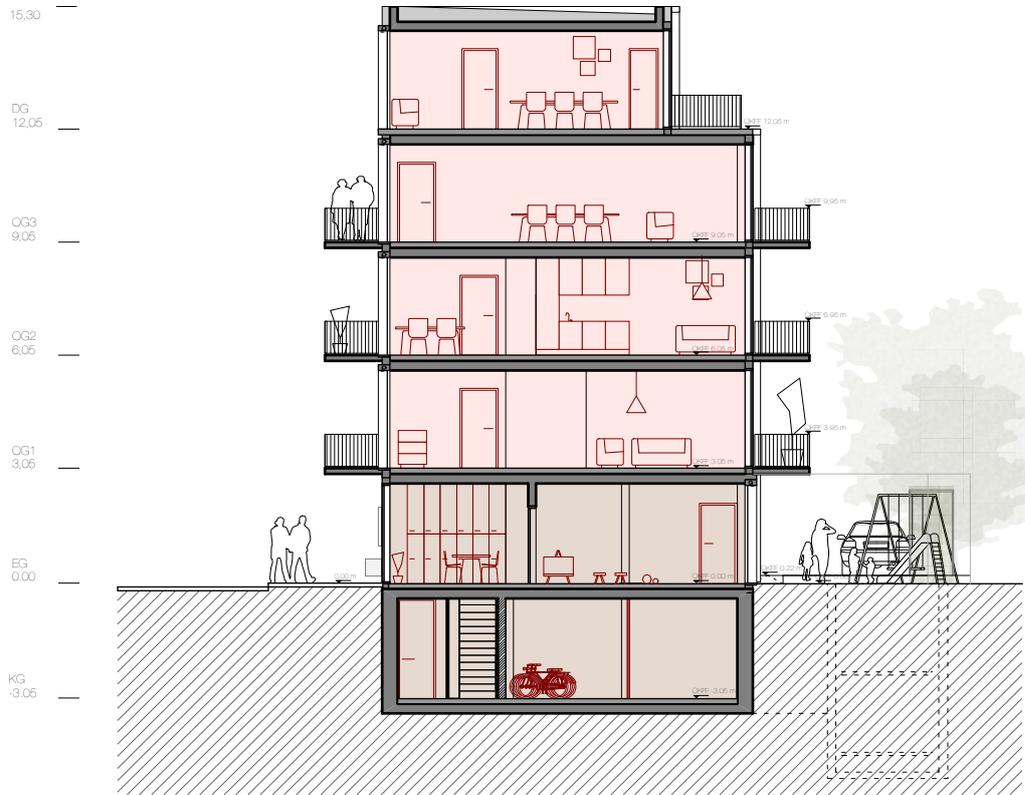
BFG: 1119,38m²
WFL: 567,70m²
WFL/BGF: 0,51



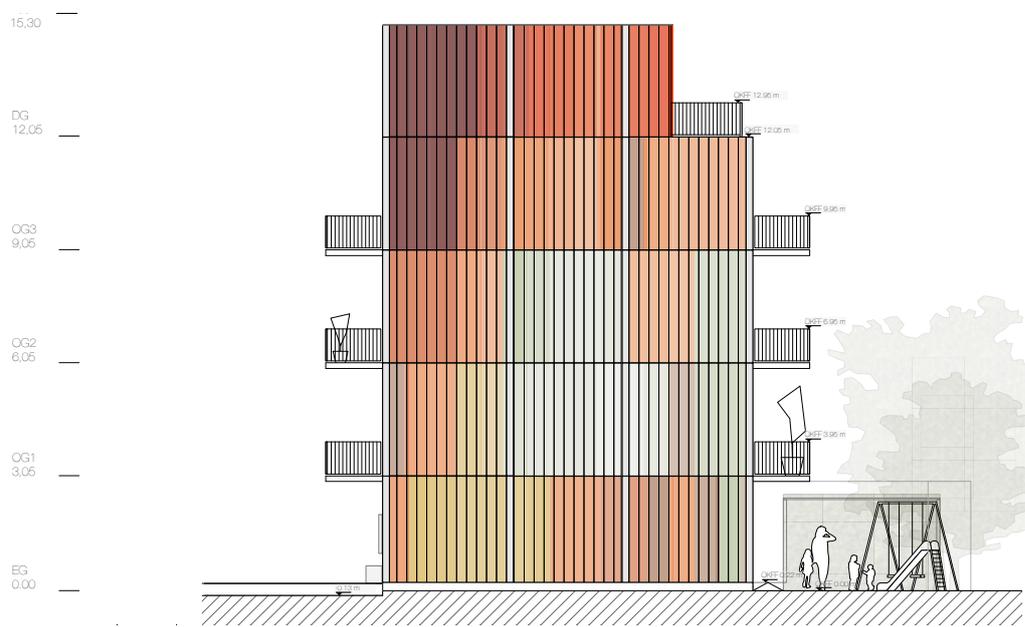


FALLSTUDIE 2
DGJ 228 -
MEHRFAMILIENHAUS

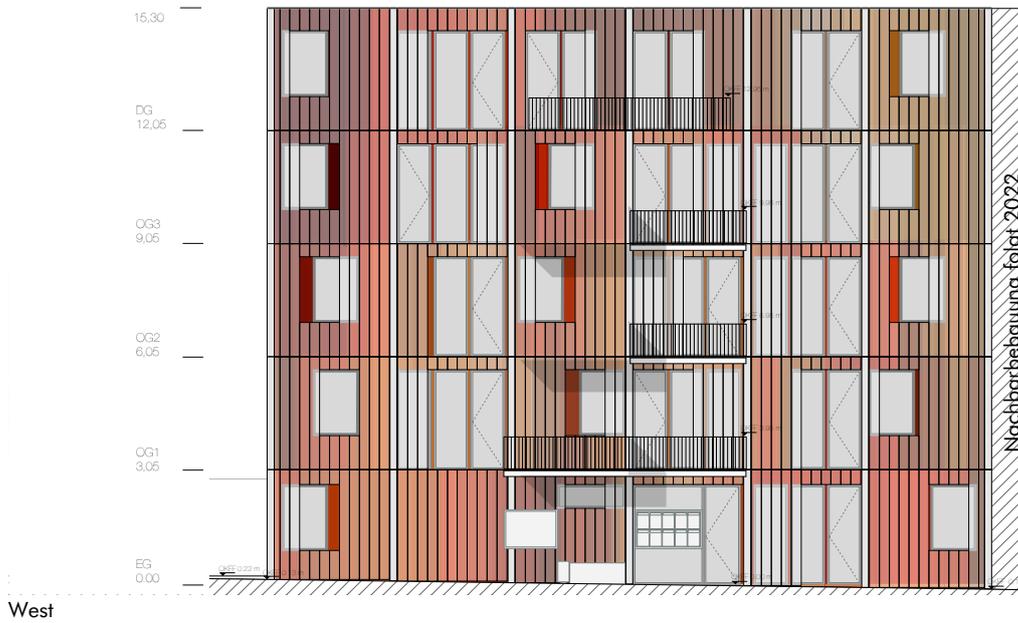
Schnitt
 M 1:200



Ansicht Süd
 M 1:200



FALLSTUDIE 2
DGJ 228 -
MEHRFAMILIENHAUS



Ansicht West
M 1:200

West



Ansicht Nord
M 1:200

Nord



Ansicht Ost
M 1:200

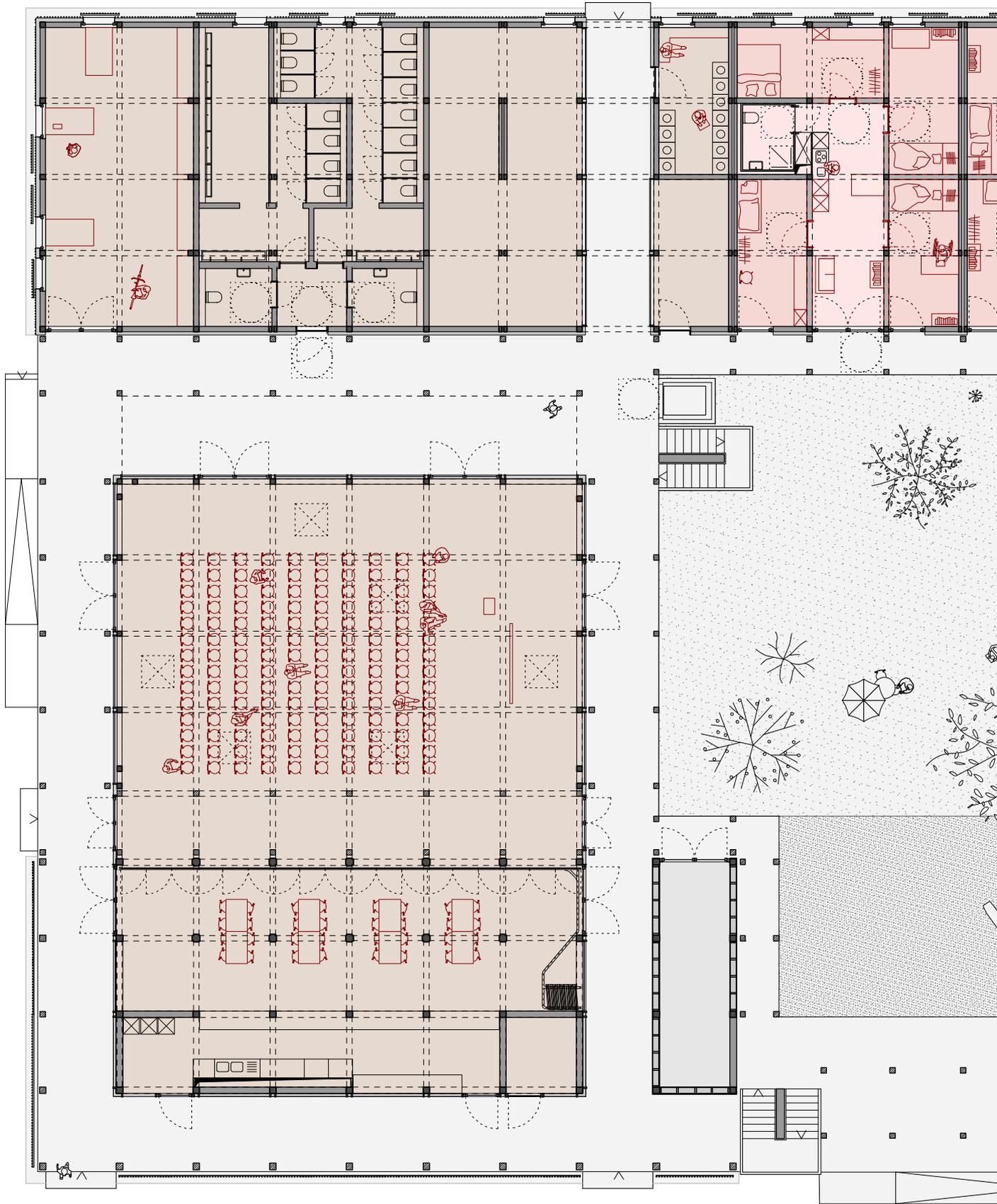
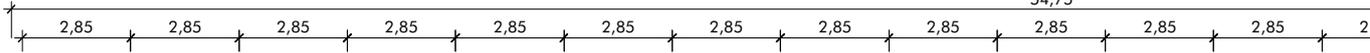
Ost

ANHANG E:

PLANUNG FALLSTUDIE 3

DGJ 223 STUDIERENDENWOHNHEIM

HEIDELBERG



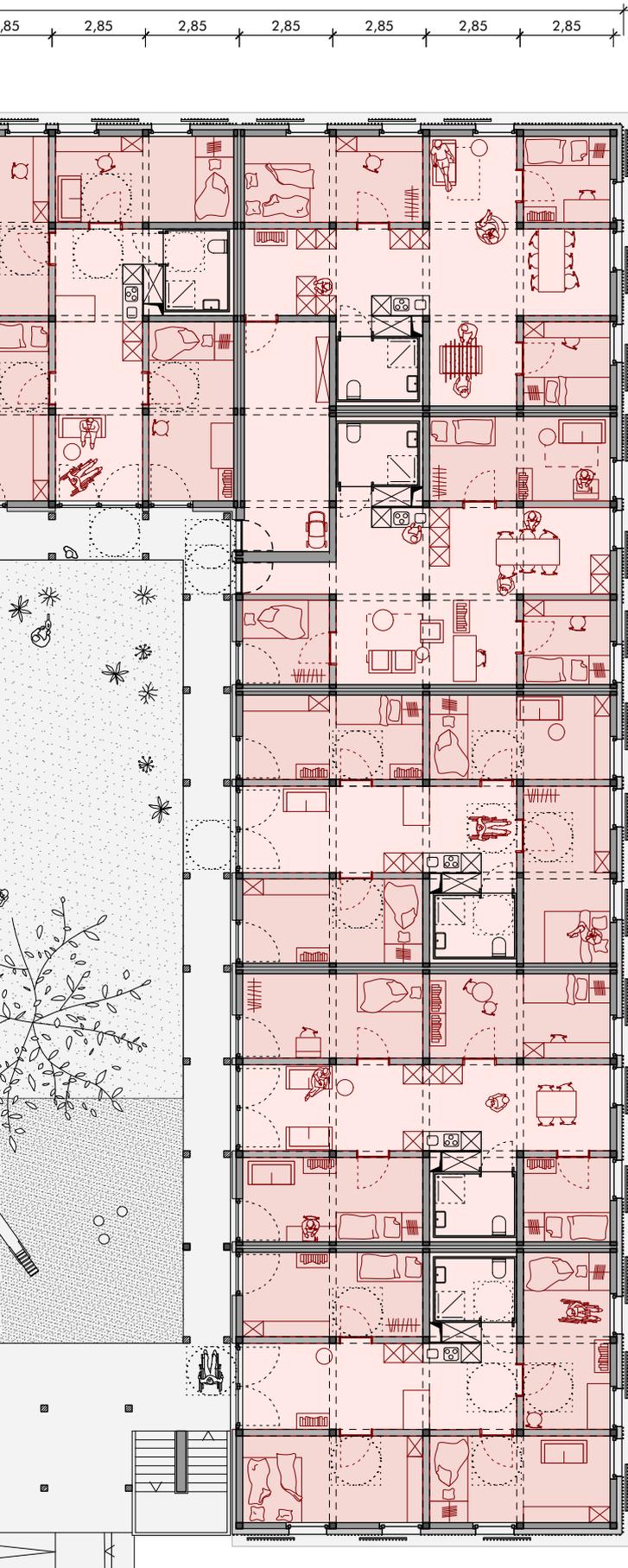
FALLSTUDIE 3 DGJ 223 - STUDIENDEN- WOHNHEIM HEIDELBERG

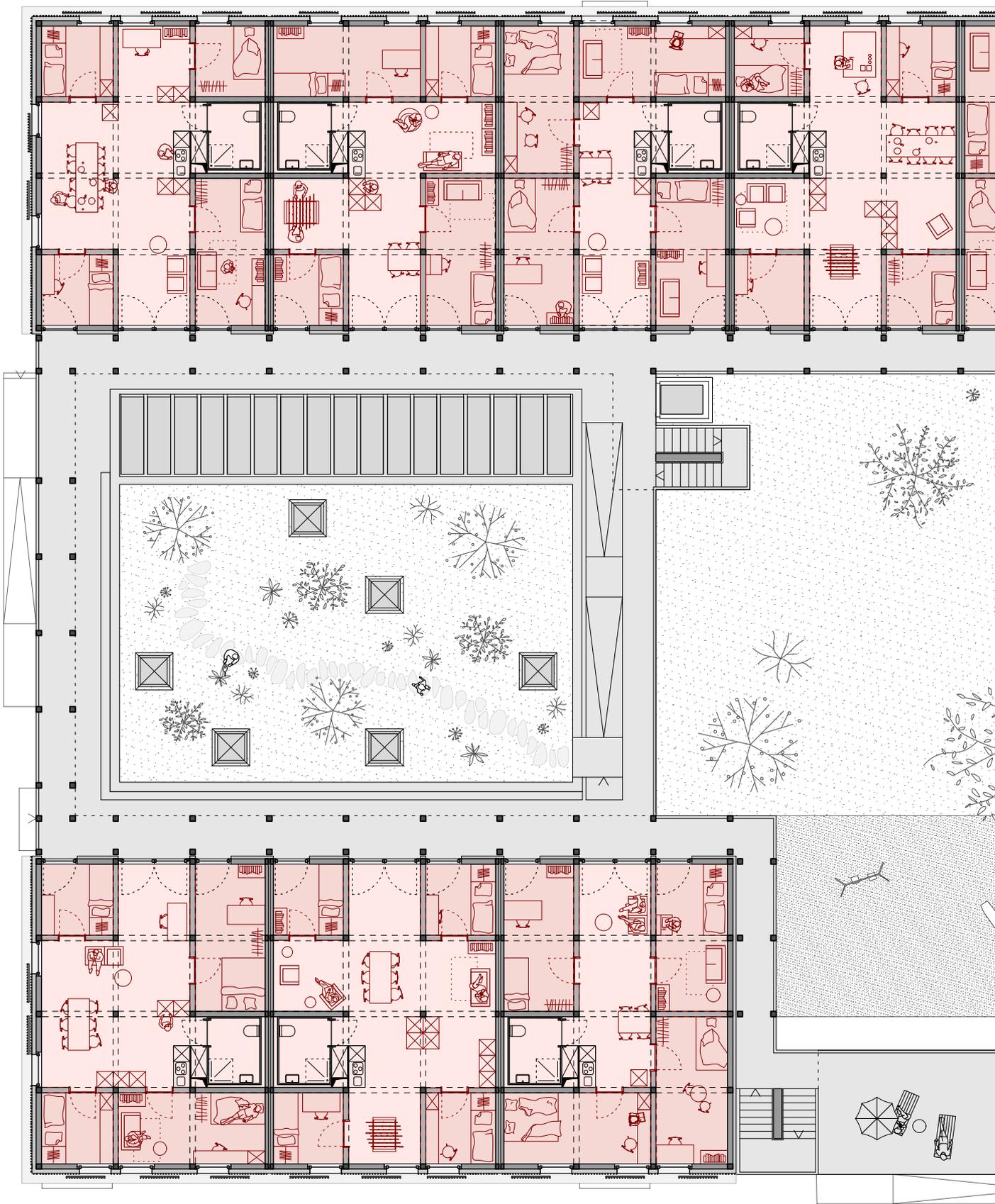
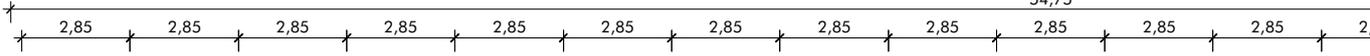
Grundriss EG
M 1:200

Baufeld
x-Achse: 54,75m
y-Achse: 43,35m

Raster: 2,85*2,85m
Geschosse: 4

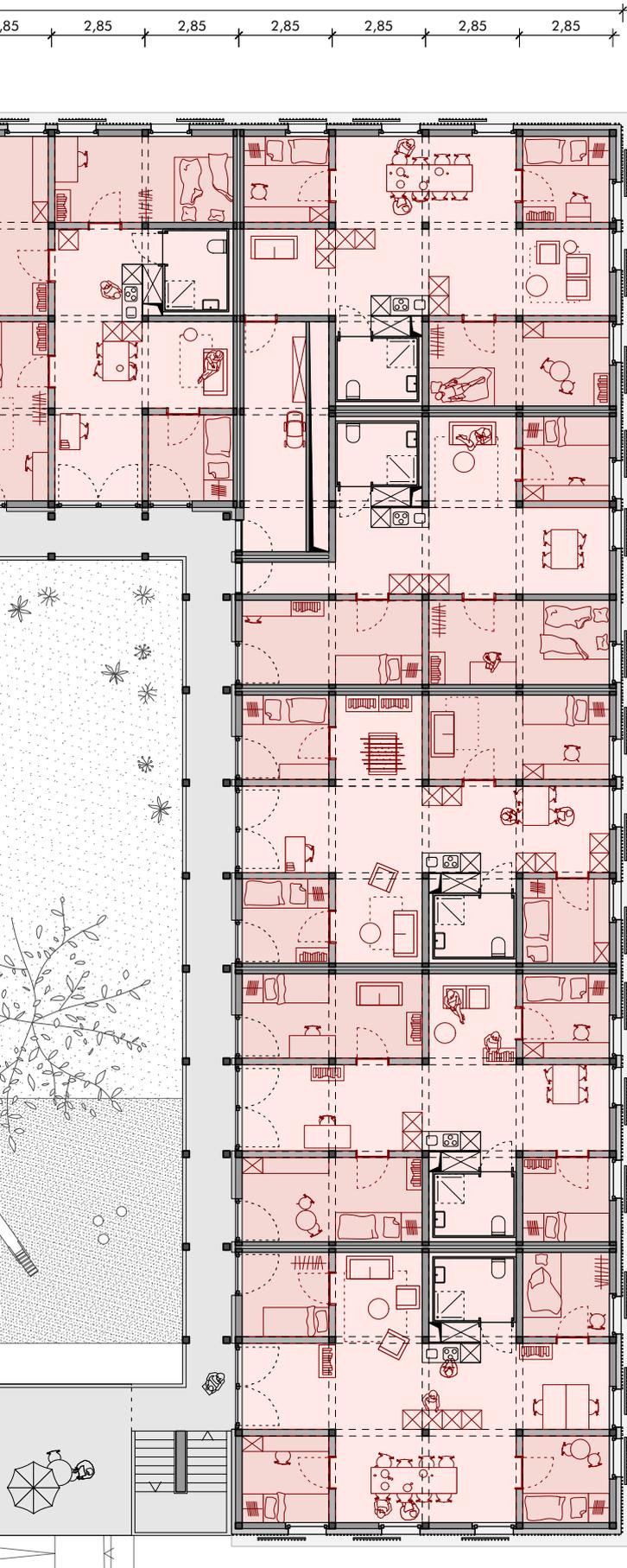
BFG: 5665,18m²
WFL: 3294,65m²
WFL/BGF: 0,58





FALLSTUDIE 3
DGJ 223 -
STUDIENDEN-
WOHNHEIM
HEIDELBERG

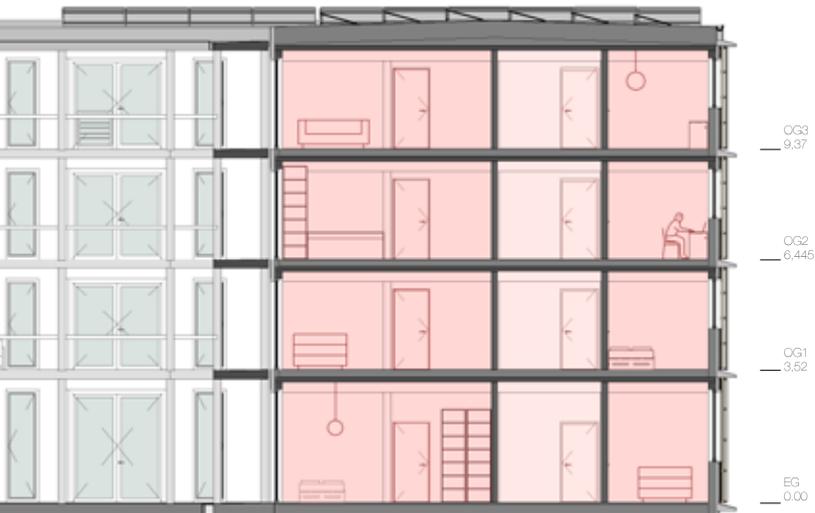
Grundriss 1.OG
M 1:200





FALLSTUDIE 3
DGJ 223 -
STUDIAREN-
WOHNHEIM
HEIDELBERG

Schnitt
M 1:200





West



Süd

FALLSTUDIE 3
DGJ 223 -
STUDIAREN-
WOHNHEIM
HEIDELBERG

Ansichten
M 1:200





Ost



Nord

**FALLSTUDIE 3
DGJ 223 -
STUDIAREN-
WOHNHEIM
HEIDELBERG**

Ansichten
M 1:200



ANHANG F:

PLANUNG FALLSTUDIE 4

DGJ 236 STUDIERENDENWOHNHEIM WEIMAR

FALLSTUDIE 4
DGJ 236 -
STUDIERENDEN-
WOHNHEIM WEIMAR

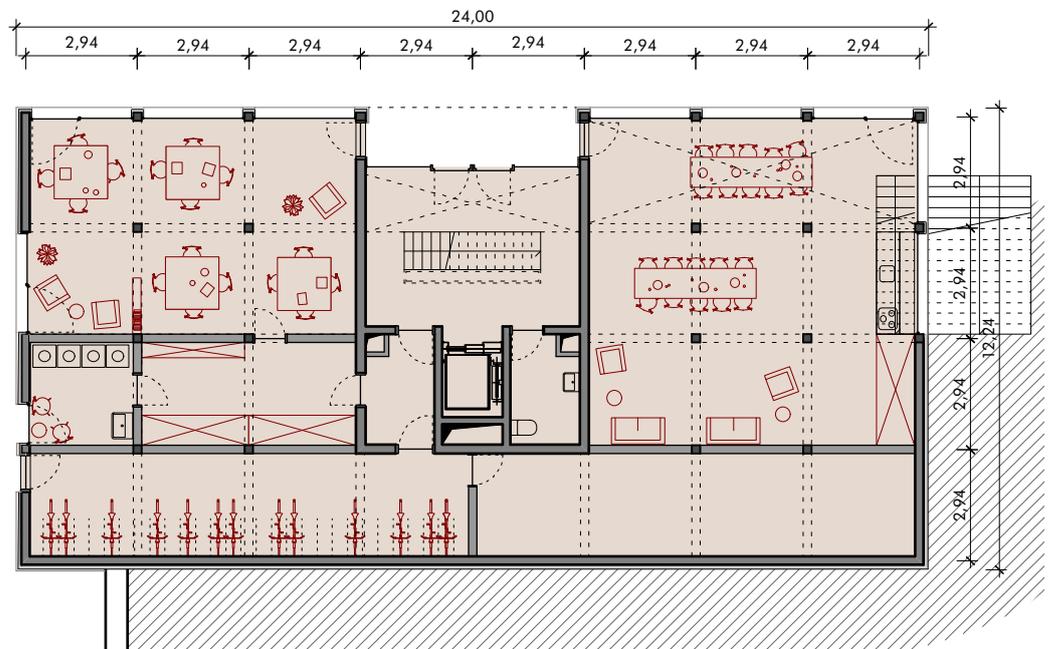
Grundrisse
 M 1:200

Baufeld
 x-Achse 24.00m
 y-Achse: 12.24m

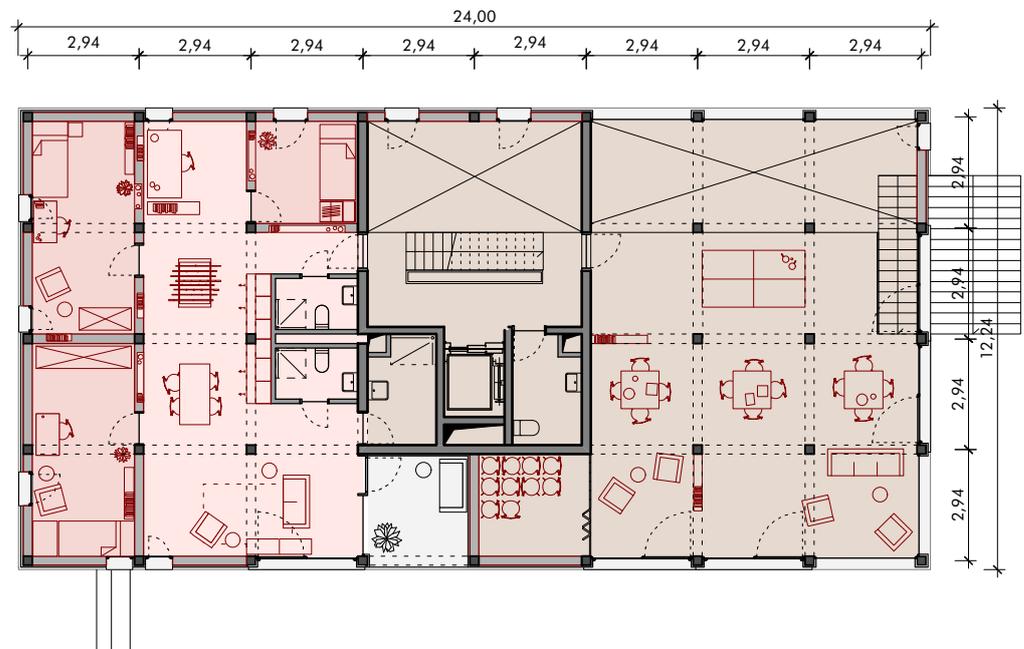
Raster: 2.94*2.94m
 Geschosse: 8

BFG: 2350.08m²
 WFL: 1361.61m²
 WFL/BGF: 0,58

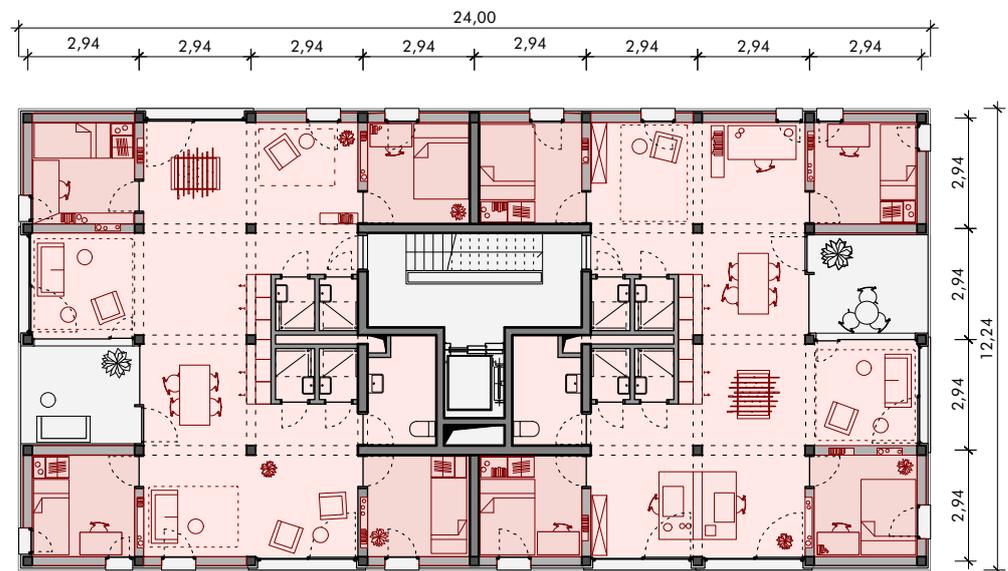
EG

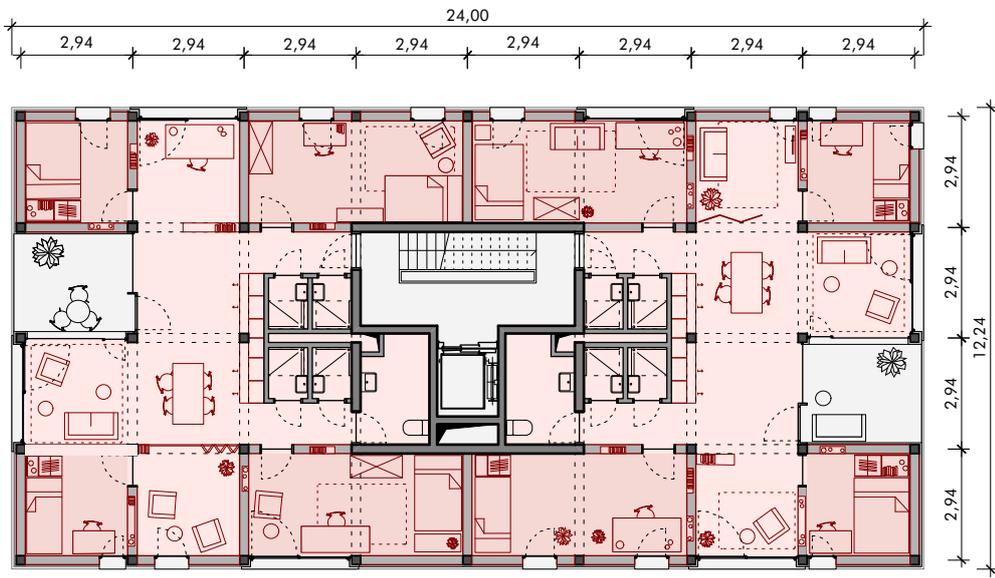


1. OG

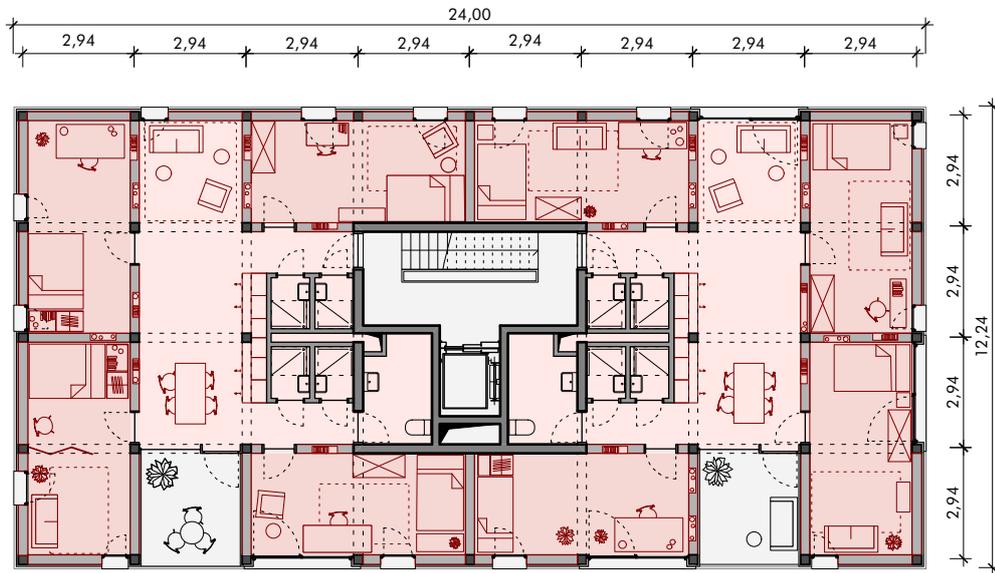


2. OG





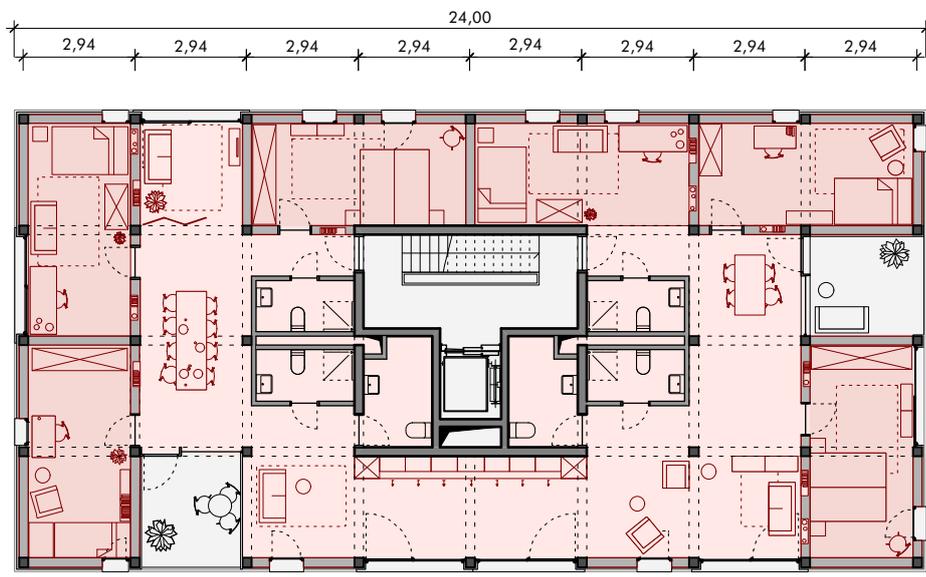
3. OG



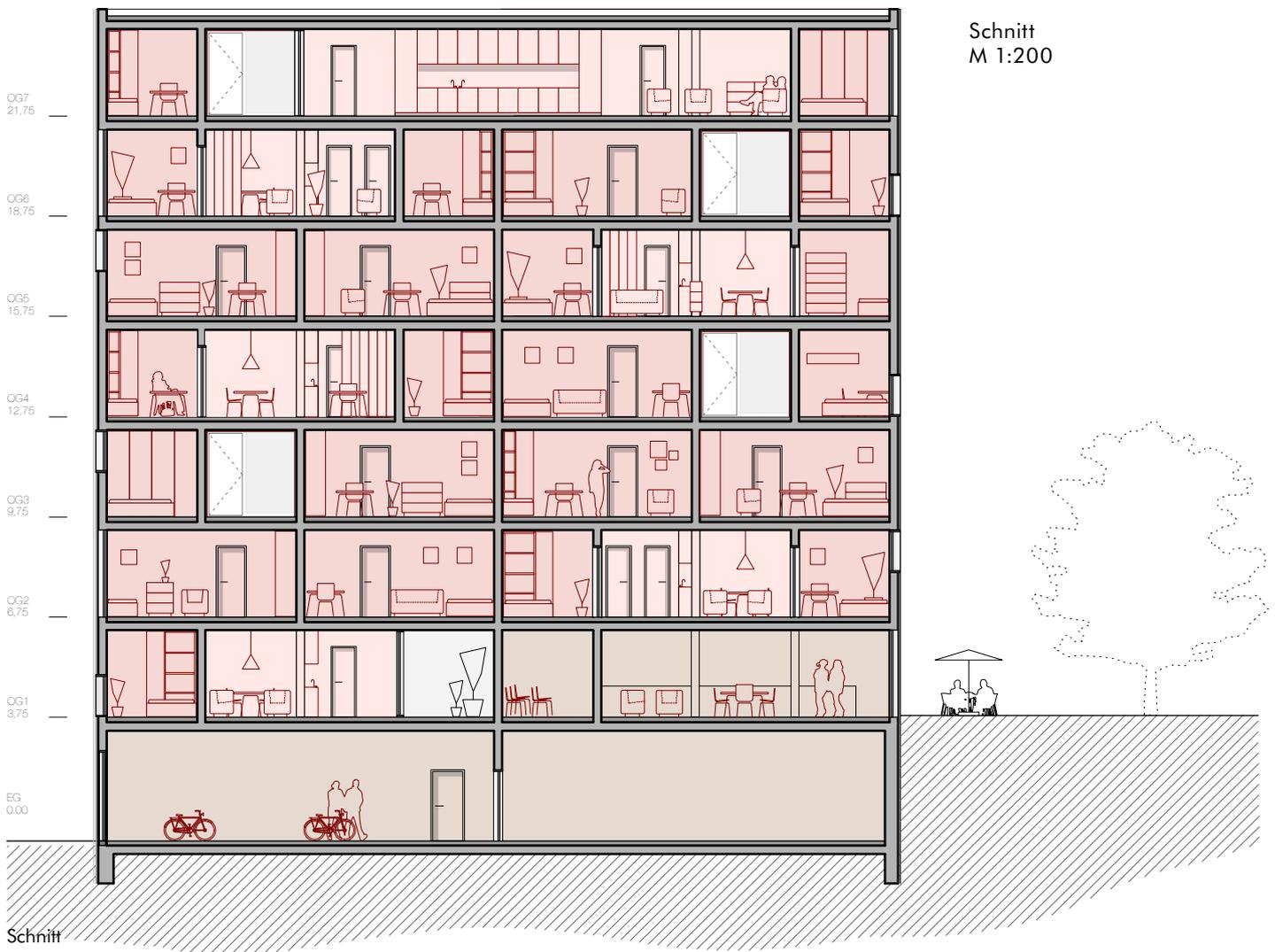
4. OG



5. OG



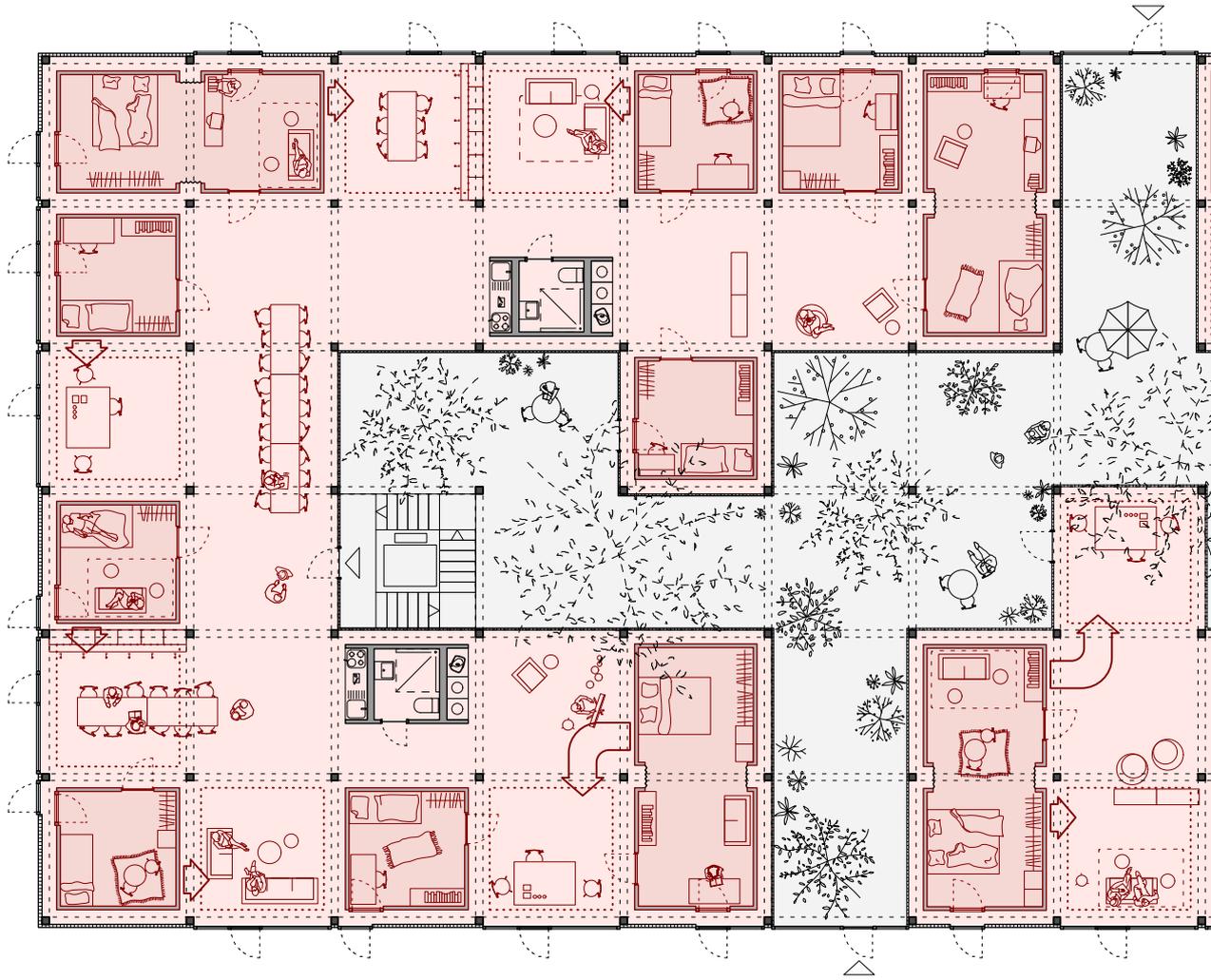
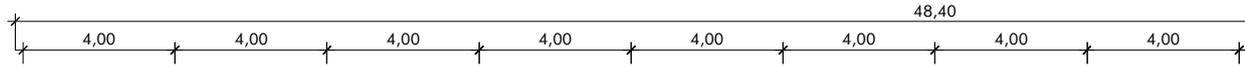
6. OG



ANHANG G:

PLANUNG FALLSTUDIE 5

DGJ 244 GREENHOUSE



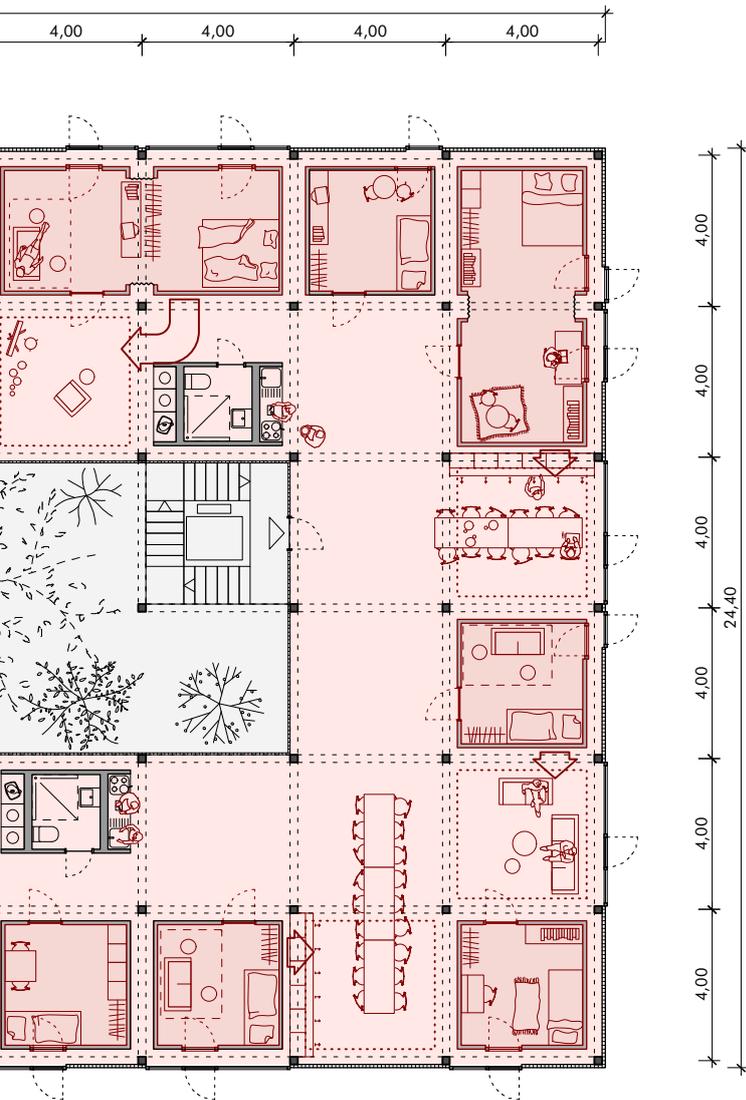
FALLSTUDIE 5 DGJ 244 - GREENHOUSE

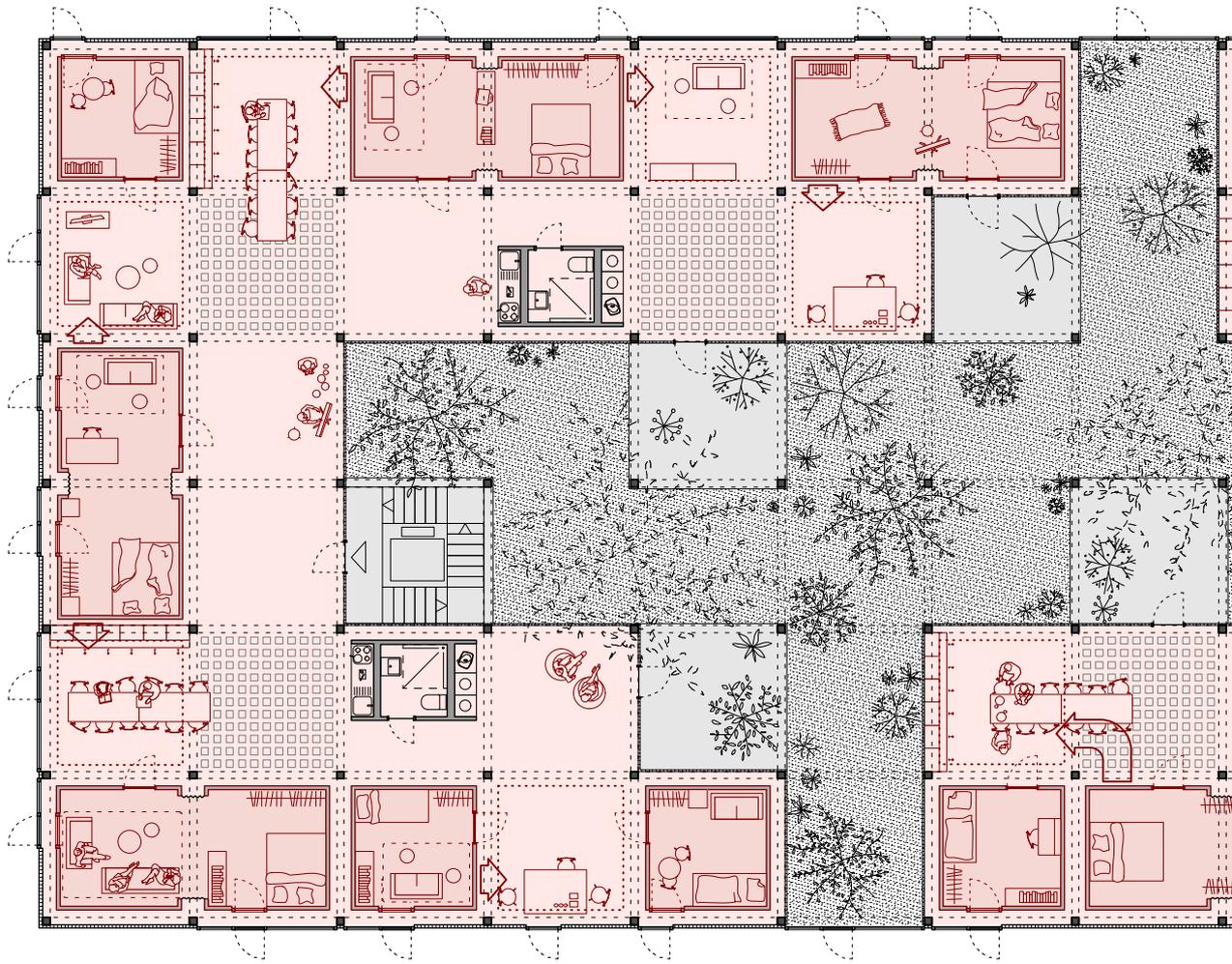
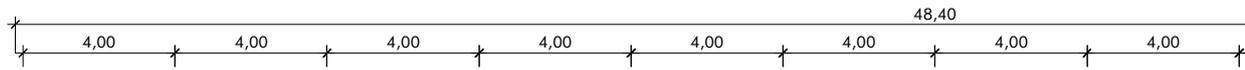
Grundriss EG
M 1:200

Baufeld
x-Achse 48,40m
y-Achse: 24,20m

Raster: 4,00*4,00m
Geschosse: 4

BFG: 3290,56m²
WFL: 2961,50m²
WFL/BGF: 0,90

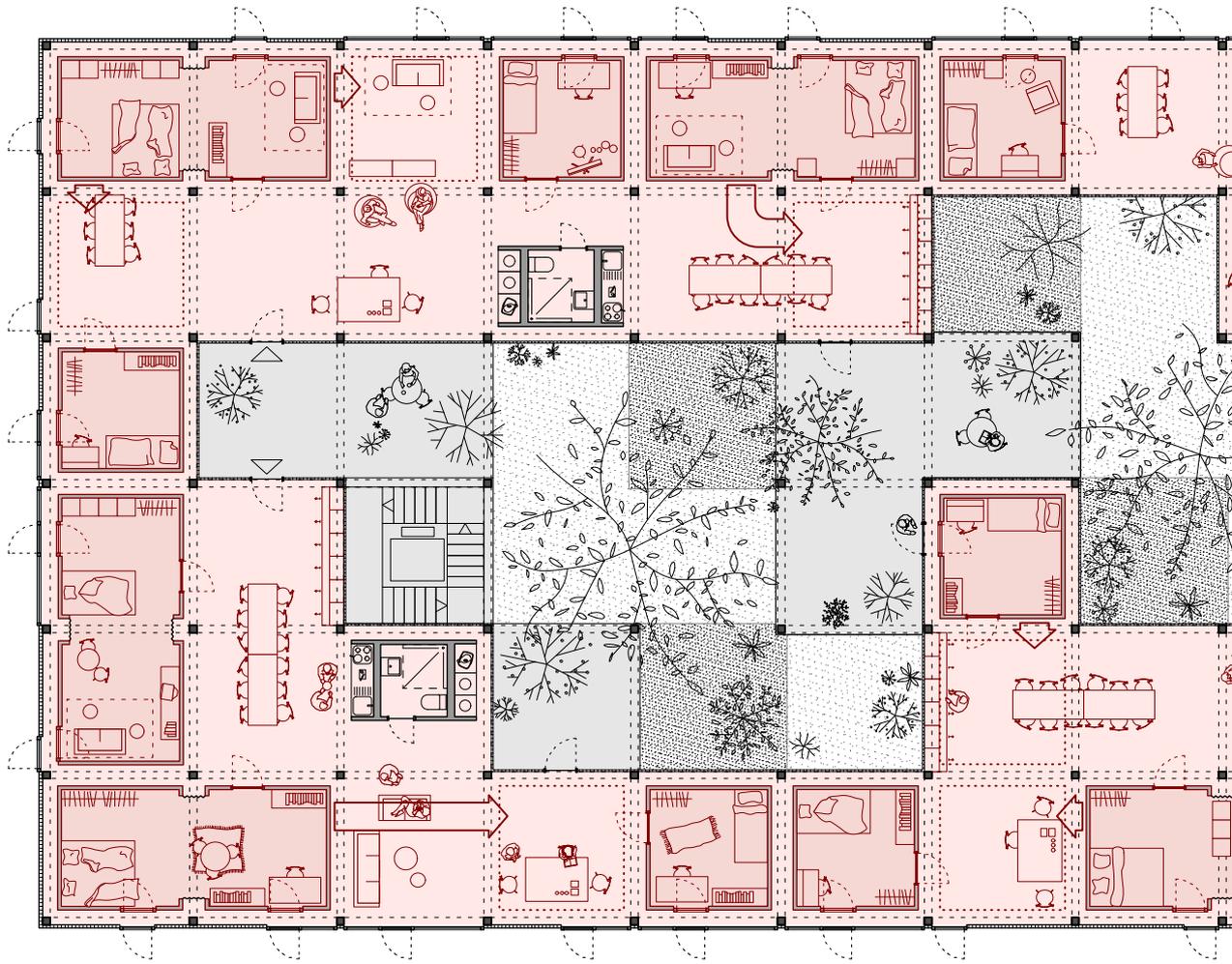
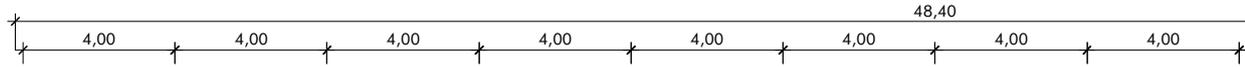




FALLSTUDIE 5
DGJ 244 -
GREENHOUSE

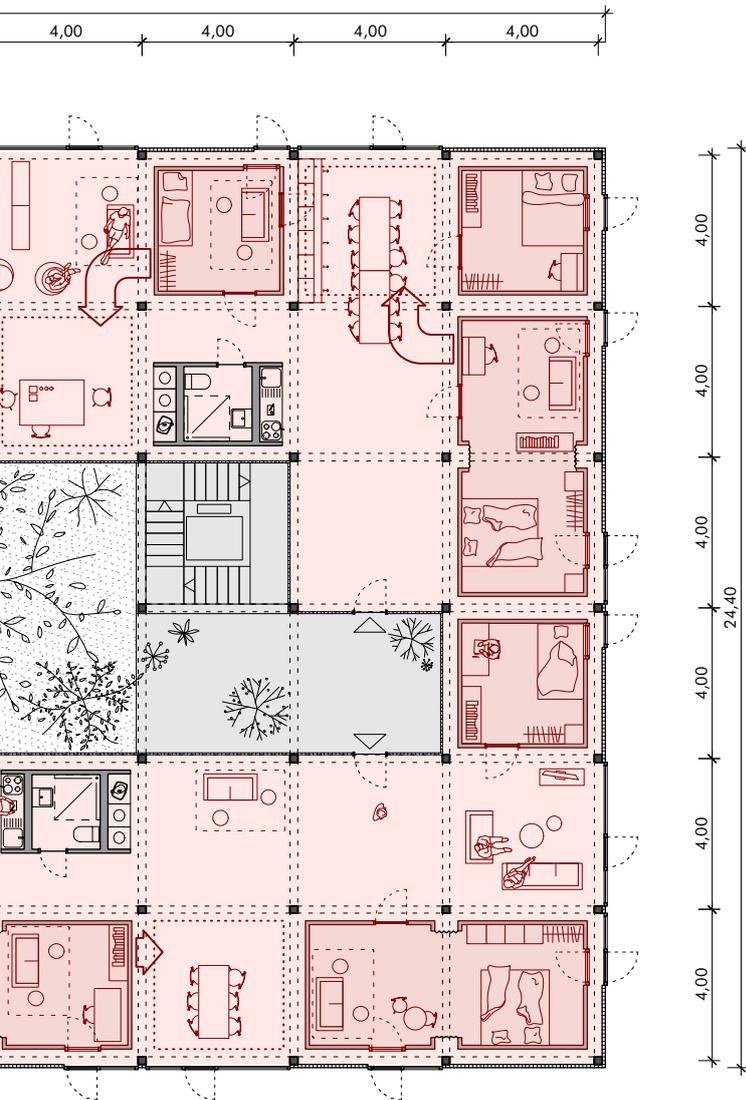
Grundriss 1.OG
M 1:200

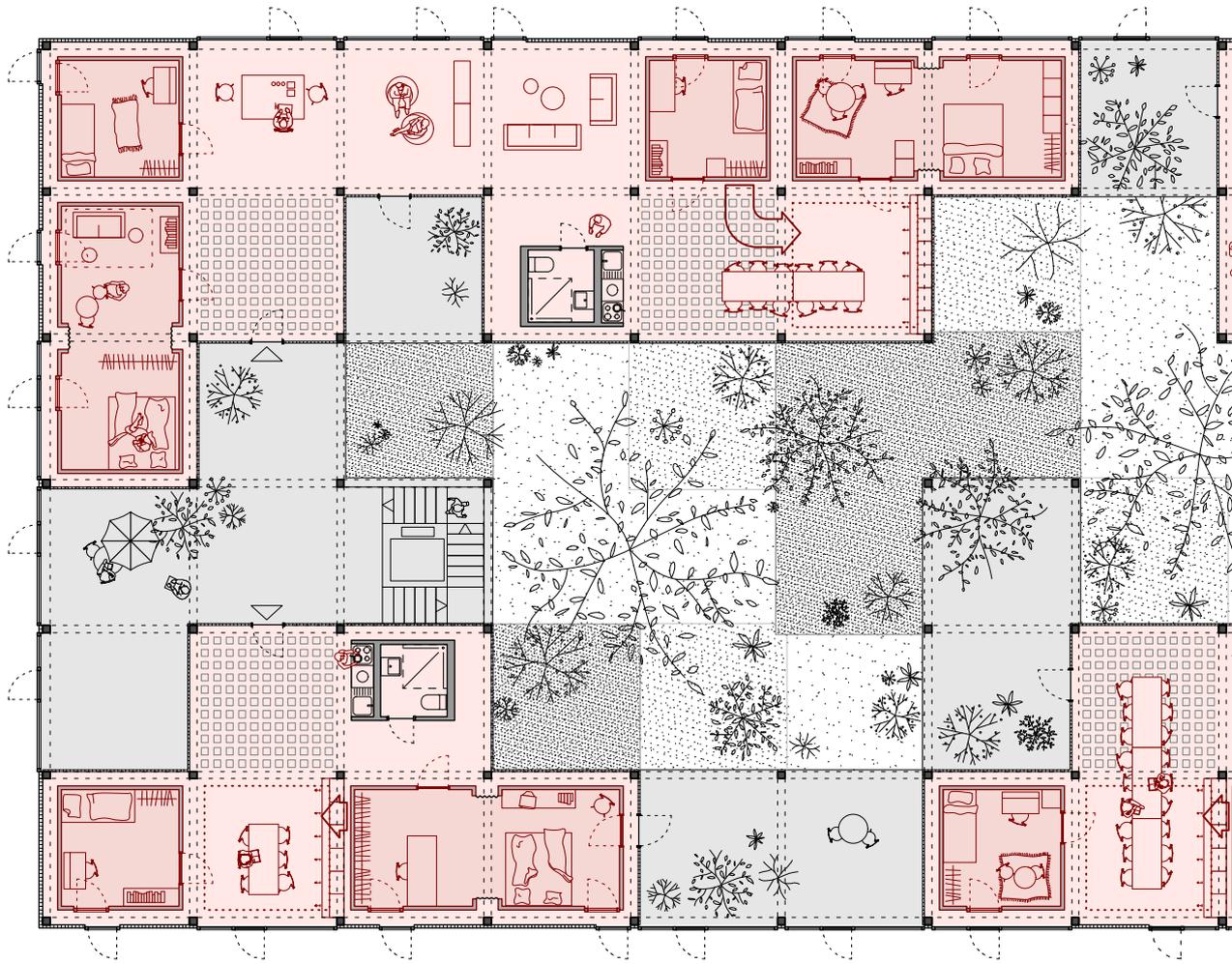
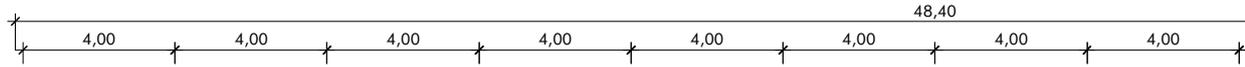




FALLSTUDIE 5
DGJ 244 -
GREENHOUSE

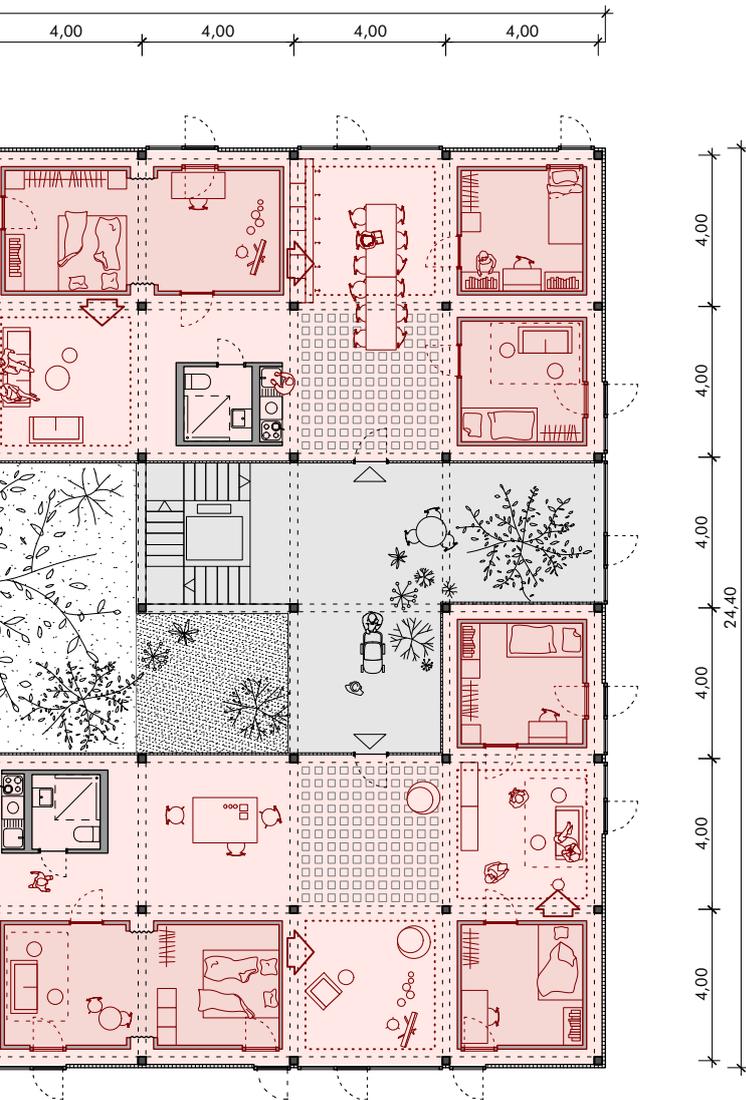
Grundriss 2.OG
M 1:200

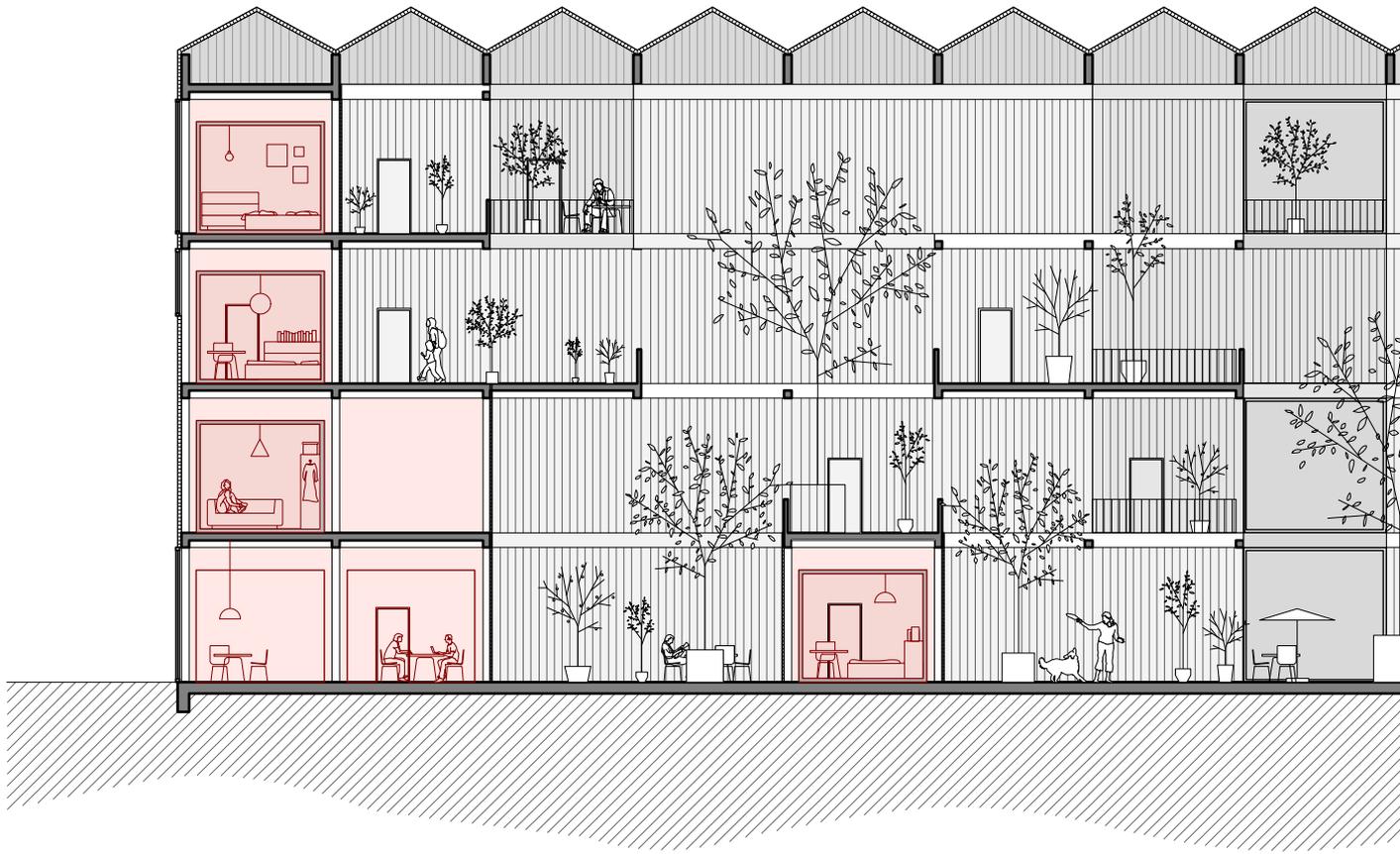




FALLSTUDIE 5
DGJ 244 -
GREENHOUSE

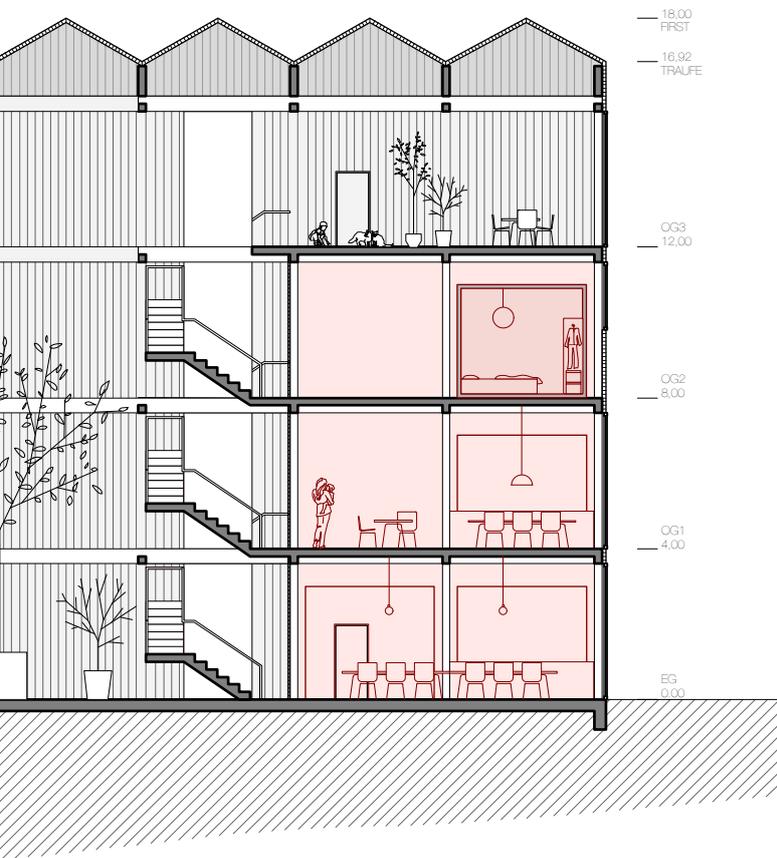
Grundriss 3.OG
M 1:200

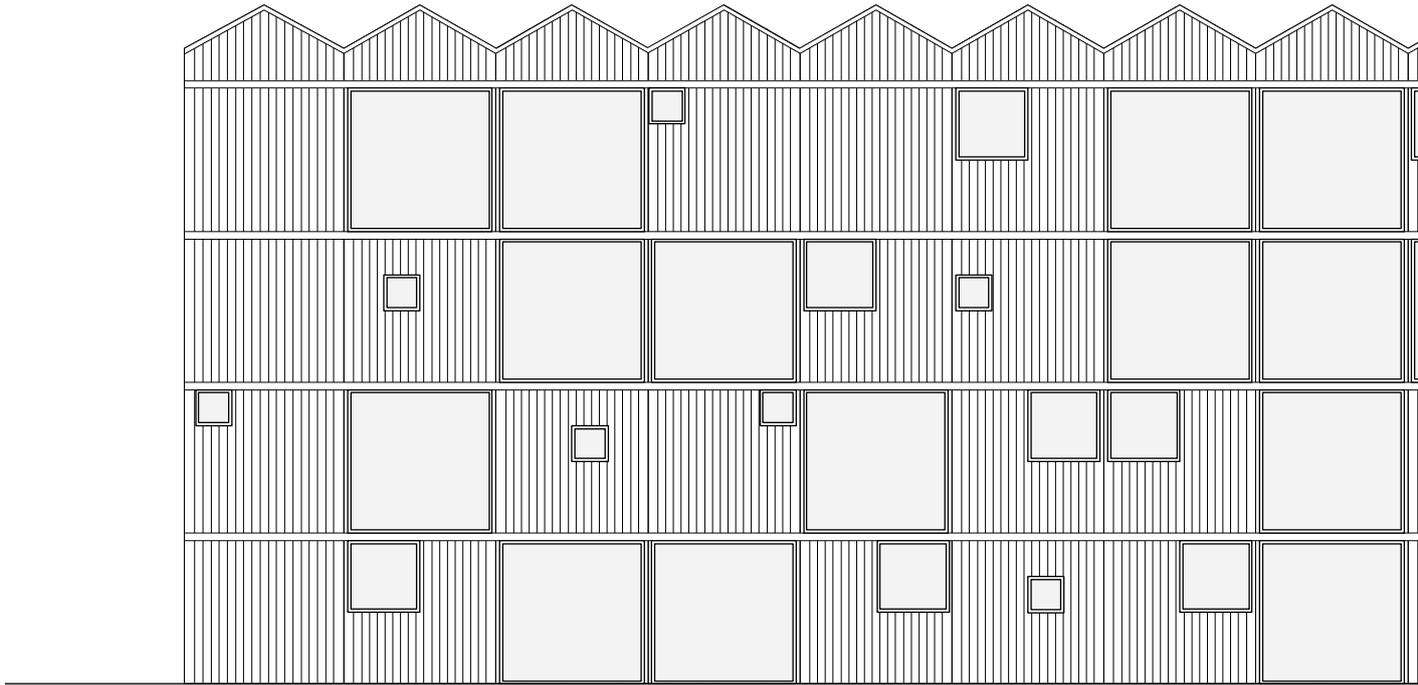




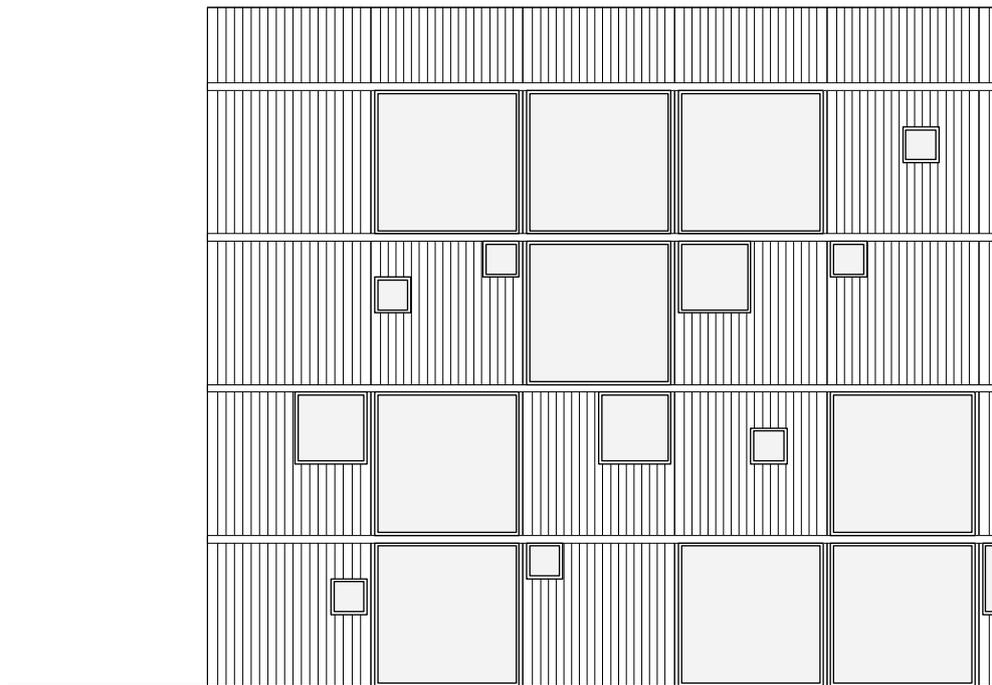
FALLSTUDIE 5
DGJ 244 -
GREENHOUSE

Schnitt
M 1:200



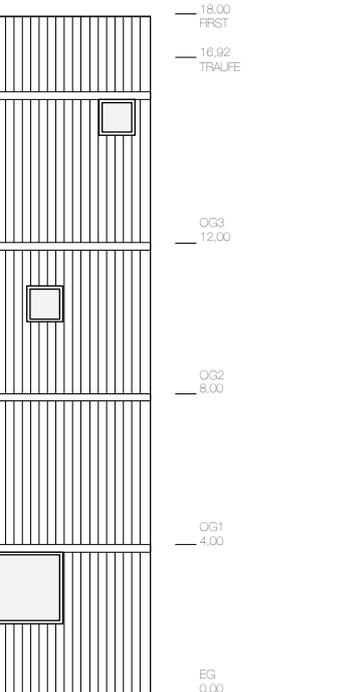
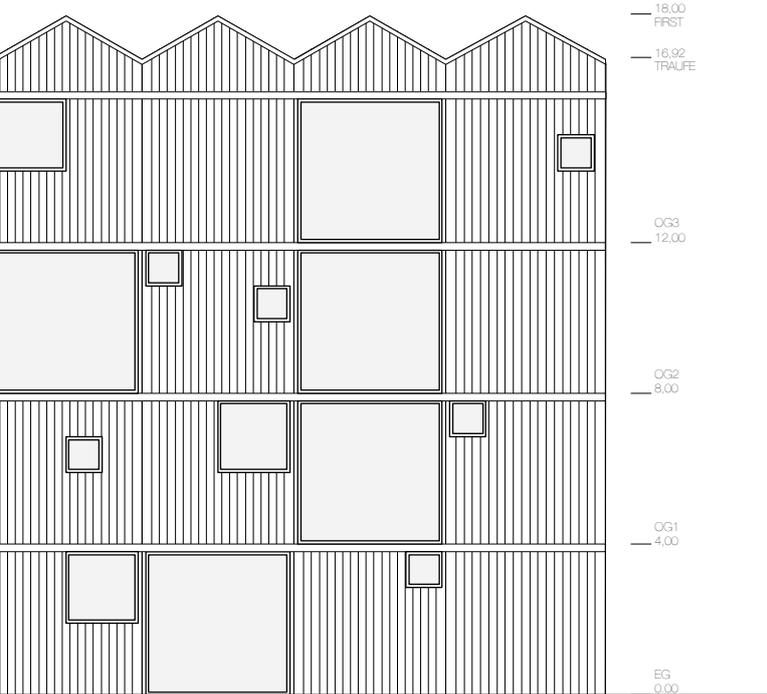


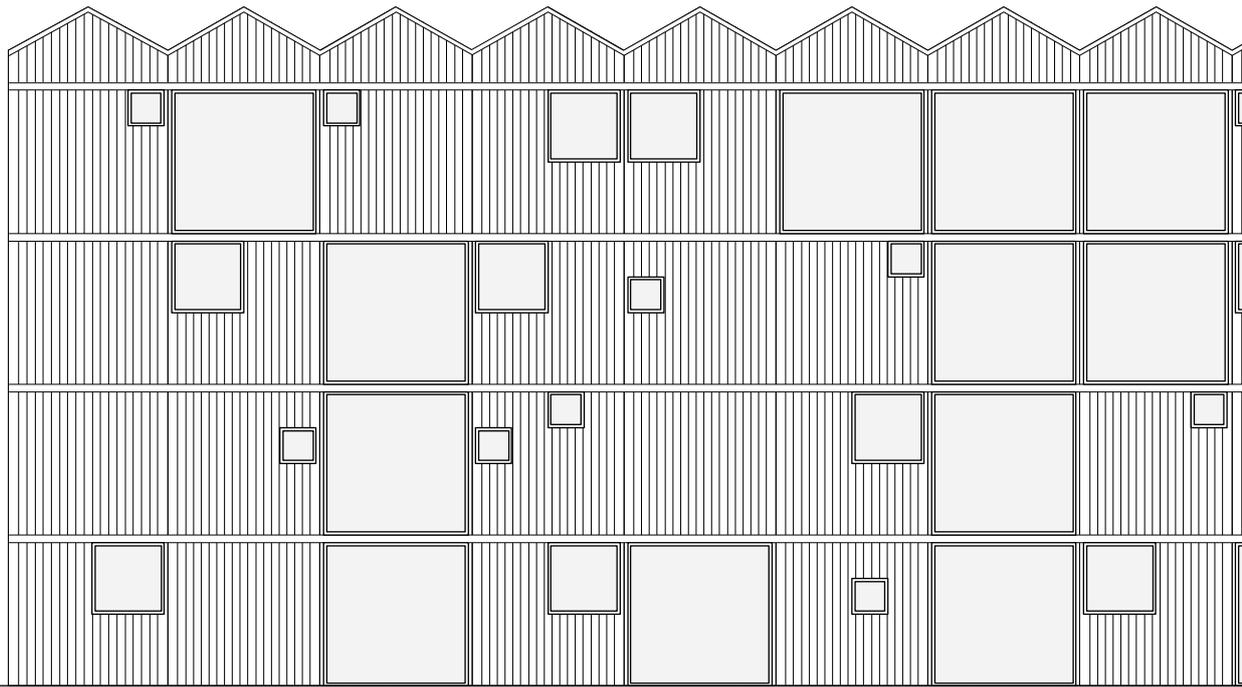
West



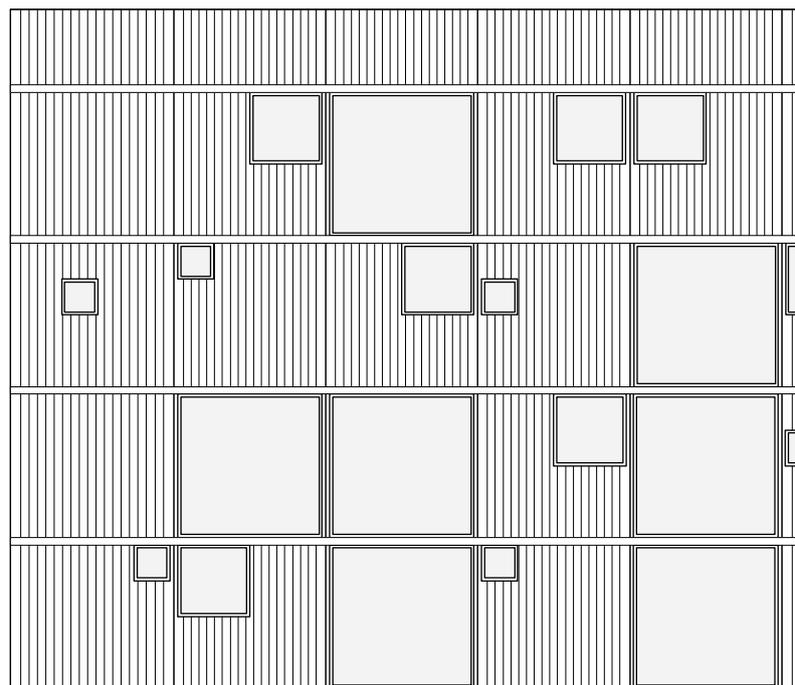
FALLSTUDIE 5
DGJ 244 -
GREENHOUSE

Ansichten
M 1:200





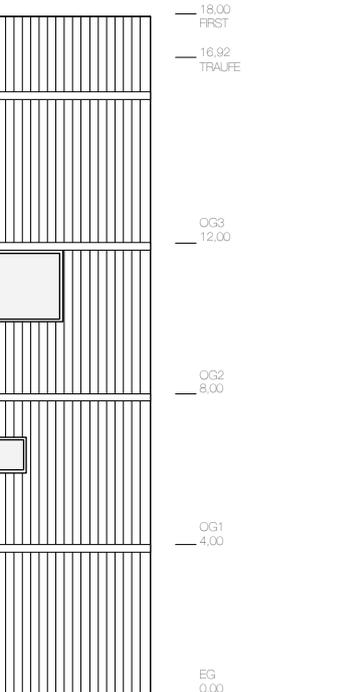
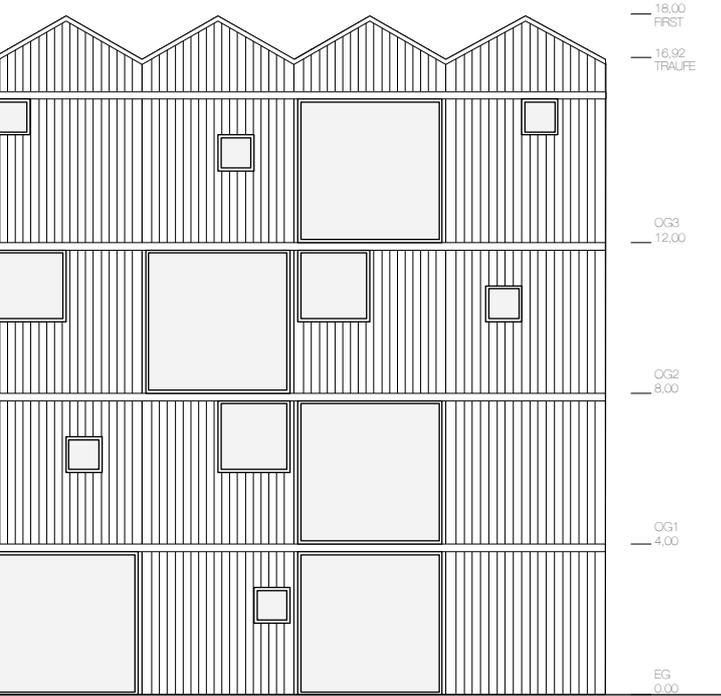
Ost



Nord

FALLSTUDIE 5
DGJ 244 -
GREENHOUSE

Ansichten
M 1:200



ANHANG H:

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Bausystem dgj219 Arrival City 4.0 Foto: Hans Drexler 2016.	10
Abbildung 2: Systematik Bausysteme 1D, 2D, 3D	18
Abbildung 3: The Japanese House: A Tradition for Contemporary Architecture, Engel, Heino; North Clarendon, Vermont, 1964.	28
Abbildung 4: Residenz in Shosei-en Garden aka. Kikoku-tie, Kyoto, 1657, Ishikawa Jozan (1583-1672), Foto Hans Drexler 2016.	29
Abbildung 5: Jiku Gumi - Framing, Shinkabe Framing Method, Sato, Hideo; Nakahara, Yasua; Nii, Koichi Paul (Übersetzer); The Complete Japanese Joinery; Vancouver, 2000.	29
Abbildung 6: Yatoi hoza sashi, dreidimensionaler Knotenpunkt des Ashikatame Träger (Hauptträger), Sato, Hideo; Nakahara, Yasua; Nii, Koichi Paul (Übersetzer); The Complete Japanese Joinery; Vancouver, 2000.	29
Abbildung 7: Lukas Lang Building Technologies GmbH	31
Abbildung 8: Lukas Lang Building Technologies GmbH	31
Abbildung 9: Lukas Lang Building Technologies GmbH; Montage Fassade.	32
Abbildung 10: Lukas Lang Building Technologies GmbH; Temporäres Parlament, Wien, Bauherr Parlamentgebäudesanierungsgesellschaft m.b.H., Auftraggeber STRABAG AG, Baufertigstellung 21.04.2017.	32
Abbildung 11: LENO-Brettsperrholz. Massive großflächige Elemente ohne Rasterbindung.	34
Abbildung 12: Beispielkonstruktionsdetails Wandverbindungen. Anschluss Innenwand-Außenwand; Wandstoß: Eckverbindung Außenwand	34
Abbildung 13: Wohnpark, Speyer West	35
Abbildung 14: Montage der Raummodule, Kaufmann Bausysteme	37
Abbildung 15: Fertigung Module Das Bader Hotel, Parsdorf, Kaufmann Bausysteme	37
Abbildung 16: BMW Hotel Alpenhof, Ammerwald Kaufmann Bausysteme	38
Abbildung 17: Holz100, BauteilkatalogW, Ing. Erwin Thoma Holz GmbH, Hasling 35, 5622 Goldegg, Österreich, Version April 2017, Quelle: https://www.thoma.at/cms/wp-content/uploads/2017/02/holz100_bauteilkatalog_april2017-1.pdf , Zugriff 6.12.2018.	39
Abbildung 18: Funktionsprinzip Vollholzwand; Systemhandbuch S. , holzius GmbH, Kiefernrainweg 96 I-39026 (BZ) – Prad am Stilfserjoch, www.holzius.com , Quelle: https://www.holzius.com/de/menschen/downloads/ , Zugriff 6.12.2018.	39
Abbildung 19: Das Mondhaus in Alpnach. Regina und Stephan Küng, Alpnach, Seiler Linhart Architekten, Luzern / Sarnen, Küng Holzbau AG, Stephan Küng, Alpnach	39
Abbildung 20: Woodcube IBA Hamburg 2013	40
Abbildung 21: Woodcube Deckenverlegung	40
Abbildung 22: Treibhauspotenzial der Varianten, Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus 6 Ein- und Mehrfamiliengebäude Neubau und Sanierung 400 Variantenkombinationen. Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik, EGS Plan, STZ-EGS.	46
Abbildung 23: Bild NA.1 - Schneelastzonenkarte aus DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12	48
Abbildung 24: Windzonen in Deutschland	49
Abbildung 25: Windzonen in Deutschland und Windgeschwindigkeiten.	50
Abbildung 26: Geschwindigkeitsdruck für Bauwerkshöhen bis 25 Meter Tabelle 2 der DIN 1055-4	50
Abbildung 27: Unterzughöhen [mm] in Abhängigkeit von Decken- und Unterzugspannweiten (Auflast $g_k = 3,60 \text{ kN/m}^2$; Nutzlast $q_k = 2,30 \text{ kN/m}^2$; Brandforderungen R30; Vorgabe Enddurchbiegung $w < l/300$; Grenzfrequenz $f_{gr} = 8,00 \text{ Hz}$), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH.	52
Abbildung 28: erf. Deckenquerschnittshöhen [mm] in BSP – maßgebende Nachweise, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	53
Abbildung 29: Holzvolumenvergleich, gerichtete/ ungerichtete Systeme (oben mit Brandanforderung R0; unten mit Brandanforderung R90), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH.	55
Abbildung 30: Stützlasten [kN] ungerichtete Systeme (beispielhaft), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	59
Abbildung 31: Stützlasten [kN] gerichtete Systeme (beispielhaft), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	59
Abbildung 32: beispielhafte Anforderungen für GK4 aus (Baunetzwissen, https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/grundlagen/gebäudeklassen-3134967/gallery-1/5 , , 07.03.2019)	61

Abbildung 33: beispielhafte Anforderungen für GK 5 (Baunetzwissen, https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/grundlagen/gebäudeklassen-3134967/gallery-1/5 , , 07.03.2019)	62
Abbildung 34: erf. horizontaler Lastfluss, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	65
Abbildung 35: vertikaler Lastfluss, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	66
Abbildung 36: DGJ Architektur, Modell des Bausystems Maßstab 1/25, Foto Hans Drexler, 2018.	67
Abbildung 37: Diagramm globales Tragwerk Variante „Skelettbau“. Entwurf Tragwerk: DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure; Graphik. DGJ Architektur.	68
Abbildung 38: Diagramm globales Tragwerk Variante „Hybrid“. Entwurf Tragwerk: DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure; Graphik. DGJ Architektur.	69
Abbildung 39: Diagramm globales Tragwerk Variante „Massiv-Holzbau“. Entwurf Tragwerk: DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure; Graphik. DGJ Architektur.	70
Abbildung 40: Yatoi hozo sashi, dreidimensionaler Knotenpunkt des Ashikatame Träger (Hauptträger), ; Graphik DGJ Architektur nach Sato, Hideo; Nakahara, Yasua; Nii, Koichi Paul (Übersetzer) The Complete Japanese Joinery; Vancouver, 2000.	71
Abbildung 41: 3D-Modell des Bausystems Anschluß Träger an Stützen - integrierte Anschlüsse, DGJ, 2016.	71
Abbildung 42: 3D-Modell des Bausystems Anschluß Träger an Stützen - differenzierte Anschlüsse, DGJ, 2016.	72
Abbildung 43: Zulässige Abweichungen für tragende Holzbauteile Tabelle 2 aus DIN EN 336:12-2013	73
Abbildung 44: Nocken als formschlüssige Schubverbindung, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	76
Abbildung 45: konventionelle Verbindung zweier BSP-Deckenelemente, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	77
Abbildung 46: möglicher Montageablauf bei der Verbindung zweier BSP-Deckenelemente; von oben nach unten: alle X-Fix-Negativformen sind bereits in den Deckenelementen eingefräst; die Elemente werden zueinander ausgerichtet; auf der Baustelle können die X-Fix-Verbinder passgenau eingebracht werden, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	77
Abbildung 47: möglicher Montageablauf bei der Verbindung BSP-Deckenelemente an Unterzug; von oben nach unten: Dübellöcher in BSP-Elementen bereits vorgebohrt; auf der Baustelle werden die Bohrungen bis in den Unterzug vertieft; anschließend Buchendübel einschlagen, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	78
Abbildung 48: möglicher Montageablauf bei der Verbindung zwischen übereinander stehenden Stützen; von oben nach unten: Lasche bereits ab Werk mit unterer Stütze verbunden; auf der Baustelle wird obere Stütze über der Lasche ausgerichtet; vorbereitete Bohrungen im Fuß der oberen Stütze werden vor Ort in die Lasche übertragen; anschließend werden die Dübel eingebracht, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	79
Abbildung 49: mögliche Verbindung zwischen BSP-Wand und darunterliegender BSP-Decke, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	80
Abbildung 50: erf. Deckenquerschnittshöhe [mm] in Abhängigkeit von Spannweiten – maßgebene Nachweise (oben mit Brandanforderung R30; unten mit Brandanforderung R90), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	83
Abbildung 51: Demonstrations-Bau (Demonstrator) (DGJ Architektur, 2018).	87
Abbildung 52: Montageablauf Detailpunkt Wand-Unterzug-Decke (einzelne Schritte von links oben nach rechts unten; links oben die Einzelteile für den Anschlusspunkt), Fotos DGJ	89
Abbildung 53: Detailpunkt Wand-Unterzug-Decke - Isometrie, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	90
Abbildung 54: Detailpunkt Wand-UNterzug-Decke - Schnitt A-A zur Isometrie, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	90
Abbildung 55: Montageablauf Detailpunkt Stütze auf Stütze (einzelne Schritte von links oben nach rechts unten; links oben die Einzelteile für den Knotenpunkt), Fotos DGJ	91
Abbildung 56: Detailpunkt Stütze auf Stütze - Isometrie, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	92
Abbildung 57: Detailpunkt Stütze auf Stütze - Schnitte A-A und C-C zur Isometrie, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	92
Abbildung 58: Detailpunkt Decke an Unterzug Ausführung mit Stahlverbindungsmitteln, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	95
Abbildung 59: Detailpunkt Wand an Unterzug Ausführung mit Stahlverbindungsmitteln, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	96
Abbildung 60: Detailpunkt Stütze auf Stütze Ausführung mit Holzverbindungsmitteln, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	97
Abbildung 61: Detailpunkt Stütze auf Stütze Ausführung mit Stahlverbindungsmitteln, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	98
Abbildung 62: Nagelpistole zum Einschließen der Holznägel und magazinierte Holznägel (Beck-Fastener Group, https://www.beck-lignoloc.com/ , 04.03.2019)	99

Abbildung 63: Verbindung zweier BSP-Deckenelemente mit Einleger und Verschraubung, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	101
Abbildung 64: Verbindung zweier BSP-Deckenelemente über Verblattung und Verschraubung (rechts), 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	101
Abbildung 65: Verbindung zweier BSP-Deckenelemente mit Dreischichtplatte und Holznagel, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	101
Abbildung 66: Versuchskörper Holznagelversuche, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	102
Abbildung 67: realer Versuchskörper in der Prüfmaschine, Foto Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	103
Abbildung 68: zersplitterter Holznagel im Versuchskörper	104
Abbildung 69: Längenvergleich ganzer Holznagel und Splitterrest	104
Abbildung 70: Einfluss des Faserverlaufs des Konstruktionsholzes auf den Verlauf des Nagels, Fotos Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	104
Abbildung 71: Darstellung des zyklischen Belastungsverlaufs der Reihe Z04-47, Diagramm Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	105
Abbildung 72: Ablösen der OBS-Platte von den Holzquerschnitten, Foto Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	106
Abbildung 73: Versagen der Holznägel auf Biegung (links), genauere Betrachtung (rechts) , Foto Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	106
Abbildung 74: Kraft-Verschiebungsverlauf der statischen Versuche S04-37 (oben) und S04-47 (unten) , Diagramme Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	107
Abbildung 75: Kraft-Verschiebungsverlauf des zyklischen Versuchs Z02-47 (Kraft-Weg Zylinder) , Diagramm Elena Hetagurova, 2019, Pirmin Jung Deutschland GmbH	108
Abbildung 76: Möblierungsschablone Wohnfunktionen des WohnwertBarometers	112
Abbildung 77: Möblierungsschablone zur Untersuchung der Nutzung der Rasterfelder je Funktion und Haushaltsgröße (DGJ Architektur, 2019)	114
Abbildung 78: Auszug Detail des Grundrisskataloges für die Rastergröße 2,65m, DGJ Architektur, 2018	115
Abbildung 79: Auszug Detail Möblierungsbeispiel für Wohnzimmer und Badezimmer des Grundrisskataloges für die Rastergröße 2,65m zur Untersuchung der Nutzung der Rasterfelder je Funktion und Haushaltsgröße (DGJ Architektur, 2018).	115
Abbildung 80: Auszug Detail Möblierungsbeispiel Schlafzimmer des Grundrisskataloges für die Rastergröße 2,65m zur Untersuchung der Nutzung der Rasterfelder je Funktion und Haushaltsgröße (DGJ Architektur, 2018).	116
Abbildung 81: Tabelle von akkumulierten Wohnungsgrößen je Person mit Durchschnittswerten (DGJ Architektur, 2019).	118
Abbildung 82: Tabelle Passung Geometrie und Wohnnutzung mit Durchschnittswerten (DGJ Architektur, 2019).	121
Abbildung 83: Auszug des Grundrisskataloges für die Rastergröße 3,5m zur Bestimmung der Mindestzahl der Rasterfeldern je Haushaltsgröße (DGJ Architektur, 2019).	127
Abbildung 84: Auszug der Kurzanleitung des Analysentools (DGJ Architektur, 2019)	129
Abbildung 85: Auszug der Eingabemaske des Analysentools mit ausgewähltem Erschließungskern (DGJ Architektur, 2019).	131
Abbildung 86: Auszug der Erweiterten Eingabemaske des Analysentools (DGJ Architektur, 2019).	133
Abbildung 87: Auszug der Ergebnismaske des Analysentools (DGJ Architektur, 2019).	134
Abbildung 88: Auszug der Auswertungsmaske des Analysentools (DGJ Architektur, 2019)	135
Abbildung 89: Möblierungsschablone des Analysentools (DGJ Architektur, 2019)	138
Abbildung 90: Fallstudie 3 // DGJ219: Arrival City 4.0, Modellfoto, DGJ Architektur	145
Abbildung 91: Fallstudie 2 // DGJ228: Mehrfamilienhaus, Frankfurt am Main, Modellfoto, DGJ Architektur	153
Abbildung 92: Fallstudie 3 // DGJ223: IBA Heidelberg, Collegium Academicum, Modellfoto, DGJ Architektur	159
Abbildung 93: Fallstudie 4 // DGJ236: WBS2017 - IBA Thüringen, Modellfoto, DGJ Architektur	165
Abbildung 94: Case Study 2: WBS2017 - IBA Thüringen, DGJ Architektur, Grundriss Varianten mit verschiedenen Nutzerbauten (von links nach rechts): Grundriss mit minimalen Individualbereichen und maximalen Gemeinschaftsbereich; Grundriss mit halboffenen flexiblen Zonen; Grundriss mit minimalen Gemeinschaftsbereichen und maximalen Individual-Zimmern; Grundriss mit rollstuhlgerechtem Ausbau (unten rechts).	165

Abbildung 95: Fallstudie 4 // DGJ244: Greenhouse, Modellfoto, DGJ Architektur	171
Abbildung 96: Raumstudien zu eingestellten Boxen, Maßstab 1/20, DGJ Architektur, Foto Hans Drexler, 2016.	171
Abbildung 97: Querauswertung Holzmenge pro BGF, Vergleich der 5 Fallstudien, DGJ Architektur, 2019.	175
Abbildung 98: Querauswertung Genauigkeit des Rechentools, Vergleich der 5 Fallstudien, DGJ Architektur, 2019.	176
Abbildung 99: Querauswertung Rechentool, Vergleich der 5 Fallstudien, DGJ Architektur, 2019.	177
Abbildung 100: Schematische Darstellung Systemvariante 1, DGJ Architektur, 2019	185
Abbildung 101: Exemplarischer Deckenaufbau für Ausführung einer HBV-Decke mit Kervenverschraubung, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019	186
Abbildung 102: Anschlusspunkte HBV-Decken an Unterzüge und Stahlbeton-Treppenhaus, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019	186
Abbildung 103: Schematische Darstellung Systemvariante 2, DGJ Architektur, 2019	187
Abbildung 104: Exemplarischer Deckenaufbau für Ausführung einer BSP-Decke mit Splittschüttung (Spannweite 3m), Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019	188
Abbildung 105: Anschlusspunkte BSP-Decken an Unterzüge und Stahlbeton-Treppenhaus mit metallischen Verbindungsmitteln, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019	188
Abbildung 106: Schematische Darstellung Systemvariante 3, DGJ Architektur, 2019	189
Abbildung 107: Verbindung von BSP-Deckenelementen und Anschluss an Unterzüge mit Holzverbindungsmitteln, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019	190
Abbildung 108: Anschluss von BSP-Decken an Stahlbeton-Treppenhaus ohne metallische Verbindungsmitteln, Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019	190
Abbildung 109: Schematische Darstellung Systemvariante 4.1, DGJ Architektur, 2019	191
Abbildung 111: Schematische Darstellung Systemvariante 4.2, DGJ Architektur, 2019	193
Abbildung 110: Exemplarischer Deckenaufbau für Ausführung einer BSP-Decke mit Splittschüttung (Spannweite 6m), Pirmin Jung Deutschland GmbH, 2019	193
Abbildung 112: Aufstellung von Kosten und Massen der Systemvarianten	195
Abbildung 113: Lebenswegmodule gemäß DIN EN 15804, Quelle: DIN EN 15804.	199
Abbildung 114: Sachbilanz Systemvarianten, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	201
Abbildung 115: Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	203
Abbildung 116: Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	205
Abbildung 117: Verbrauch an erneuerbarer Endenergie. Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	207
Abbildung 118: Anteil an erneuerbarer Endenergie am gesamten Verbrauch von Endenergie. Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	207
Abbildung 119: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	209
Abbildung 120: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	210
Abbildung 121: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	211

Abbildung 122: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	212
Abbildung 123: Systemvarianten Vergleich, Ergebnis der Ökobilanzierung für die Module: A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, transport, Produktion, C3 Abfallverwertung, C4 Entsorgung, D Recyclingpotential. Datenquelle Eingabe eLCA v0.9.6, Eingabe und graphische Auswertung: DGJ Architektur GmbH, 2019.	213
Abbildung 124: Gegenüberstellung metallische Verbindung und Holzverbindung Otto-Hahn-Straße (DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure, 2019).	257
Abbildung 125: Gegenüberstellung metallische Verbindung und Holzverbindung Ganghoferstraße (DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure, 2019).	258
Abbildung 126: Gegenüberstellung metallische Verbindung und Holzverbindung Pistoriusplatz-Haus 1 (DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure, 2019).	259
Abbildung 127: Gegenüberstellung metallische Verbindung und Holzverbindung IBA Heidelberg (DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure, 2019).	260
Abbildung 128: Gegenüberstellung metallische Verbindung und Holzverbindung Friedberger Landstraße (DGJ Architektur und Pirmin Jung Ingenieure, 2019).	261