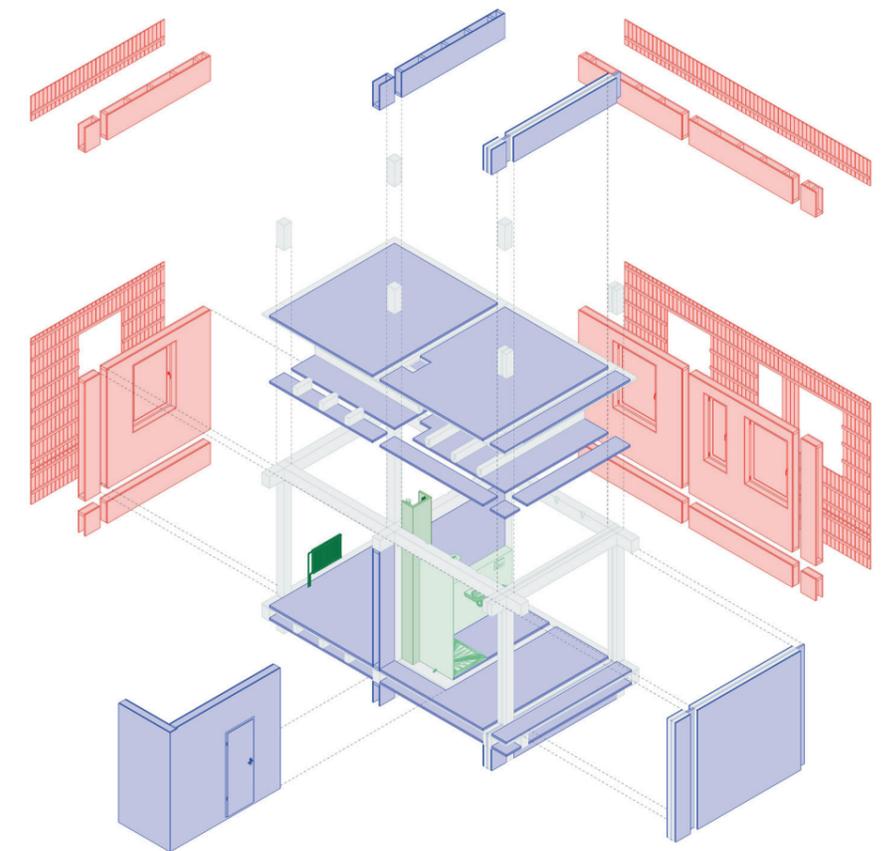


HOLZ: FORM- UND KRAFTSCHLÜSSIG

ZUSAMMENWIRKEN VON TRAGWERK, BRANDSCHUTZ,
SCHALLSCHUTZ UND BAUPHYSIK



GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN BUNDESSTIFTUNG UMWELT

GEFÖRDERT DURCH DIE:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Dipl.-Ing. Sabine Djahanschah
An der Bornau 2
49090 Osnabrück
Telefon: +49 541 9633 0
Telefax: +49 541 9633 190
E-Mail: info@dbu.de:



AUTOREN:

Bewilligungsempfänger:
DGJ Architektur GmbH
Walter-Kolb-Straße 22
60594 Frankfurt am Main
Hans Drexler Dr.-Ing. Dipl. Arch. ETH M. Arch.
Frederik Ehling, M.A. Arch.
Philip von Rüdiger



Kooperationspartner:
Pirmin Jung Deutschland GmbH
Entenweiherweg 12
53489 Sinzig
Dipl.-Ing. Tobias Götz
Dipl.-Ing. Tobias Riehle
Dipl.-Ing. David Volk

PIRMIN JUNG

Industriepartner:
Brüninghoff GmbH & Co. KG
Industriestraße 14
46359 Heiden
Frank Steffens
Dr. Jan Wenker



Ergänzende Forschungsbeiträge:
ina Planungsgesellschaft mbH
Schleiermacherstraße 12
64283 Darmstadt
Dipl.-Ing. Joost Hartwig



INHALTSVERZEICHNIS

01 Einleitung	5	07 EXPLORATIONEN // FALLSTUDIEN	251
1.1. Summary // Zusammenfassung	6	7.1. Case Study 1: dgj223 IBA Heidelberg	254
1.1 Einleitung // Nachhaltiges Bauen mit System?	8	7.2. Case Study 2: dgj228 Wohngruppe Gemeinsam Suffizient Leben	270
02 Ziele der Systementwicklung	15	7.3. Case Study 3: dgj253 Wohngruppe Mannheim	286
2.1. Ein mono-materieales Holz-Skelett-Bausystem	17	08 Zusammenwirken von Tragwerk, Brand-, Schall-, Wärme- und Feuchteschutz	295
2.2. Rationelle Bauweisen	22	8.1. Betrachtungsebene Tragwerk	298
03 Methodik und Parameter der Systementwicklung	23	8.2. Betrachtungsebene Brandschutz	304
3.1. Aufbau der Forschungsarbeit	24	8.3. Betrachtungsebene Schallschutz	306
3.2. Methodik	25	8.4. Betrachtungsebene Wärmeschutz	310
04 Referenzen	31	8.5. Betrachtungsebene Luftdichtheit	314
4.1. Architektonische und baugeschichtliche Referenzen	32	09 Bewertung des Entwicklungsstands, Ausblick und Forschungsbedarf	317
4.2. Status Quo: Aktuelle Bausysteme für Wohnungsbau	42	9.1. Bewertung des Entwicklungsstand	318
4.3. Grundlagen und Vorleistungen für die Systementwicklung	52	9.2. Ausblick und Weiterer Forschungsbedarf	319
05 Strukturelle Systementwicklung	59	10 Anhang	323
5.1. Annahmen // Definition des Untersuchungsraums	60	10.1. Abbildungsverzeichnis	324
5.2. Untersuchung von Systemvarianten	65	10.2. Verzeichnis der Graphiken	328
06 Technische und baukonstruktive Systementwicklung	87	10.3. Tabellenverzeichnis	331
6.1. Tragwerk	88	10.4. Literaturliste	332
6.2. Brandschutz	118	10.5 Liste der Abkürzungen	341
6.3. Schallschutz	155		
6.4. Thermische Bauphysik und klimabedingter Feuchteschutz	190		
6.5. Herstellung und Montage	214		

1.1. ZUSAMMENFASSUNG

Die Betrachtung der globalen Rahmenbedingungen bedingen eine dringenden Notwendigkeit für nachhaltiges Bauen im Anthropozän. Seit der ersten Konferenz der Vereinten Nationen über die Umwelt des Menschen (UNCHE, 1972) und dem Bericht „The Limits to Growth“ des Club of Rome ist bekannt, dass neue Ansätze gebraucht werden, um die Gesellschaft auf Gleichgewicht statt auf Wachstum auszurichten. Trotz dieser Erkenntnisse hat sich die Umweltsituation im Jahr 2024 weiter verschlechtert.

Das Hauptziel des vorliegenden Entwicklungsprojekts ist die Entwicklung eines mono-materialen Holz-Skelett-Bausystems, das effizient und nachhaltig ist. Ein Fokus liegt auf der Entwicklung rationeller Bauweisen und der Integration moderner Fertigungstechniken. Die Arbeit gliedert sich in drei Hauptteile: Theorie und Grundlagen, die eigentliche Systementwicklung und die Darstellung der Ergebnisse.

Die Methodik umfasst die Nutzung von bestehenden Technologien und Berechnungsmethoden, wie Eurocode 5 für Holzbau, CAD/CAM und BIM, sowie computergesteuerte Fertigungstechniken. Die Forschung zielt darauf ab, ein Holz-Holz-Bausystem mit geometrischen Verbindungen zu entwickeln, das den rechtlichen und technischen Anforderungen entspricht. Es wurden traditionelle Zimmereitechniken mit modernen Herstellungsmethoden kombiniert, um die Präzision und Effizienz zu erhöhen.

Die strukturelle Systementwicklung befasst sich mit den grundlegenden geometrischen und baukonstruktiven Fragen, während die technische Systementwicklung Aspekte wie Tragwerk, Brandschutz, Schallschutz, thermische Bauphysik und Herstellung sowie Montage betrachtet. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Flexibilität des Systems gewidmet, um unterschiedliche Anforderungen und Nutzungen zu ermöglichen.

In mehreren Fallstudien wurde das entwickelte Bausystem in der Praxis getestet. Besonders hervorzuheben ist das Projekt ‚Collegium Academicum‘ in Heidelberg, bei dem flexible Wohnungsgrundrisse durch die Bewohnenden selbst hergestellt und konfiguriert werden können. Dies zeigt das Potenzial des Systems für alternative und wandelbare Wohnformen.

Die abschließende Bewertung des Entwicklungsstands zeigt, dass das entwickelte Holzbausystem viele der gesetzten Ziele erreicht. Der vorliegende Ansatz identifiziert jedoch weiterhin Bedarf an Optimierungen und Untersuchungen, insbesondere im Hinblick auf die Integration in verschiedene Bauvorschriften und die praktische Anwendung in unterschiedlichen Kontexten.

Der Bericht stellt eine umfassende Untersuchung und Entwicklung eines innovativen, nachhaltigen Holzbausystems dar, das durch seine Flexibilität und Effizienz aktuelle und zukünftige Anforderungen an nachhaltiges Bauen erfüllt.

1.1. SUMMARY

Considering the global framework conditions, there is an urgent need for sustainable construction in the Anthropocene. Since the first United Nations Conference on the Human Environment (UNCHE) in 1972 and the Club of Rome's report 'The Limits to Growth', it has been recognised that new approaches are needed to orientate society towards balance rather than growth. Despite these findings, the environmental situation in 2024 has continued to deteriorate.

The main objective of the development project is to create a mono-material timber frame building system that is efficient and sustainable. One focus was on the development of rationalised construction methods and the integration of modern production techniques. The work is divided into three main parts: the theory and fundamentals, the actual system development and the presentation of the results.

The methodology includes the use of existing technologies and calculation methods, such as Eurocode 5 for timber construction, CAD/CAM and BIM, as well as computer-controlled manufacturing techniques. The research aims to develop a timber-to-timber construction system with geometric connections that meets legal and technical requirements. Traditional carpentry techniques have been combined with modern manufacturing methods to increase precision and efficiency.

The structural system development deals with the basic geometric and structural design issues of the building system, while the technical system development considers aspects such as load-bearing structure, fire protection, sound insulation, thermal building physics and production and assembly. Particular attention was paid to the flexibility of the system to allow for different requirements and uses.

The developed building system was tested in practice in several case studies. Particularly noteworthy is the 'Collegium Academicum' project in Heidelberg, in which flexible flat layouts can be produced and configured by the residents themselves. This demonstrates the system's potential for alternative and adaptable forms of housing.

The final assessment of the development status shows that the developed timber construction system achieves many of the goals set. However, the present approach still identifies a need for optimisation and further investigation, particularly with regard to integration into various building regulations and practical application in different contexts.

The report represents a comprehensive investigation and development of an innovative, sustainable timber construction system that can contribute to solving current and future building requirements through its flexibility and efficiency.

1.2. EINLEITUNG // NACHHALTIGES BAUEN MIT SYSTEM?

Globale Rahmenbedingungen // Bauen im Anthropozän

Unserer Generation obliegt es, das größte Problem zu lösen, mit dem sich die Menschheit bisher konfrontiert sah: Unsere Lebensweise und das Wirtschaftssystem führen nicht nur zur Zerstörung unserer eigenen Lebensgrundlage, sondern auch der Lebensgrundlage der anderen Lebewesen, mit denen wir den Planeten teilen. Im Juni 1972 fand in Stockholm die erste Konferenz der Vereinten Nationen über die Umwelt des Menschen (UNCHE United Nations Conference on the Human Environment) statt. Diese kann als Anfang einer globalen Umweltpolitik gesehen werden. Es wurden 21 Prinzipien verabschiedet, die alle bis heute nicht umgesetzt sind.¹ Im gleichen Jahr wurde ‚The Limits to growth: A Report for the Club of Rome’s Project on the Predicament of Mankind‘² veröffentlicht. Dessen AutorInnen kamen zu folgendem Ergebnis:

*„Our present situation is so complex and is so much a reflection of man’s multiple activities, however, that no combination of purely technical, economic, or legal measures and devices can bring substantial improvement. Entirely new approaches are required to redirect society toward goals of equilibrium rather than growth. Such a reorganization will involve a supreme effort of understanding, imagination, and political and moral resolve. We believe that the effort is feasible and we hope that this publication will help to mobilize forces to make it possible.“*³

Heute, im Jahr 2024, steigen die Ressourcenverbräuche weltweit, genauso wie Umweltverschmutzung und Emissionen und die Zerstörung von natürlichen und naturnahen Lebensräumen.⁴ Anstelle einer Verlangsamung oder gar Umkehr der Trends ist vielmehr zu beobachten, dass sich die katastrophalen Prozesse exponentiell beschleunigen, weswegen Will Steffen und seine MitautorInnen von der „großen Beschleunigung“ („Great Accel-

1 „Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm,“ United Nations Environment Programme, 1972.

2 Donella Meadows et al., The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome’s Project on the Predicament of Mankind (New York: Universe Books, 1972).

3 Meadows et al.

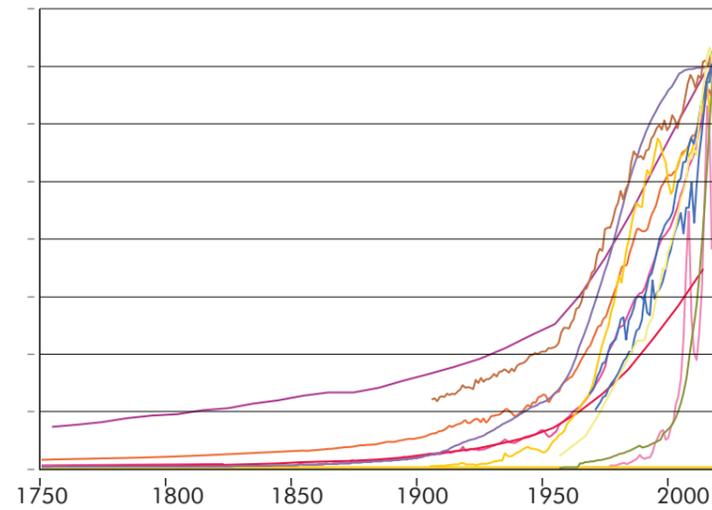
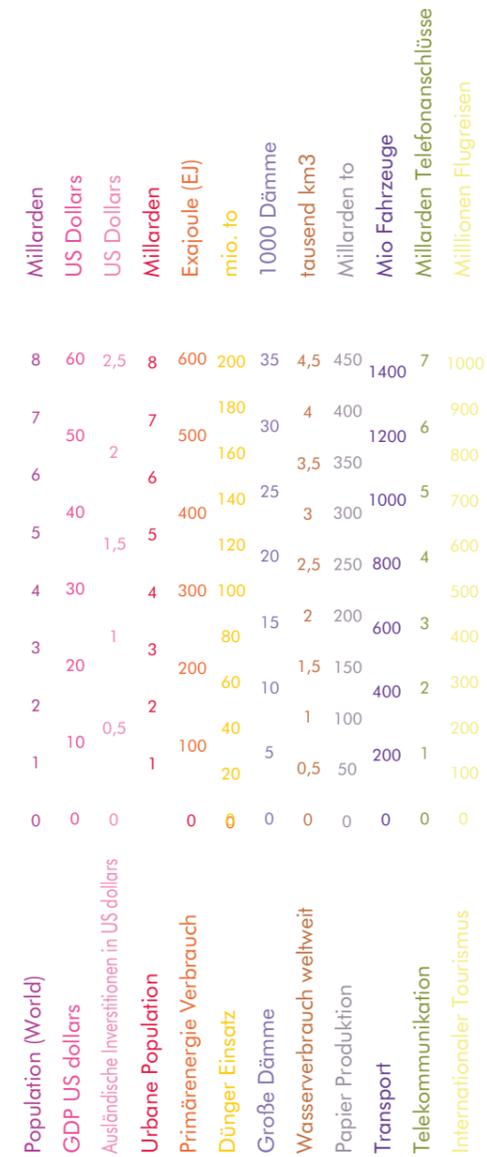
4 „Scenario 1 [of World3: The Dynamics of Growth in a Finite World]: A Reference Point: The world society proceeds in a traditional manner without any major deviation from the policies pursued during most of the twentieth century. Population and production increase until growth is halted by increasingly inaccessible non-renewable resources. Ever more investment is required to maintain resource flows. Finally, lack of investment funds in the other sectors of the economy leads to declining output of both industrial goods and services. As they fall, food and health services are reduced, decreasing life expectancy and raising average death rates.“, Donella Meadows, Jorgen Randers, and Dennis Meadows, Limits to Growth: The Thirty-Year Update (London: Earthscan, 2005), 168f.

eration‘) sprechen.⁵ Getrieben von einem bis 2050 ungebremsten Wachstum der Weltbevölkerung und Zunahme des Konsums, lässt sich eine deutliche Zunahme und in vielen Fällen ein geradezu völlig freies Wachstum aller wichtigen sozio-ökonomischen Faktoren ablesen.

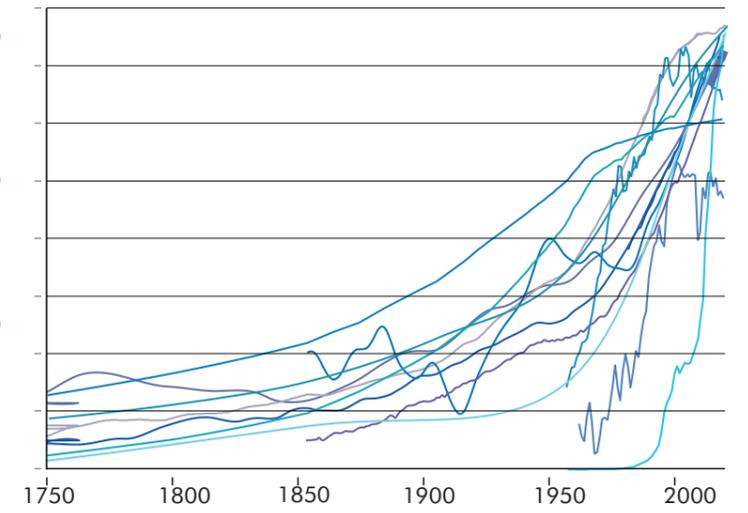
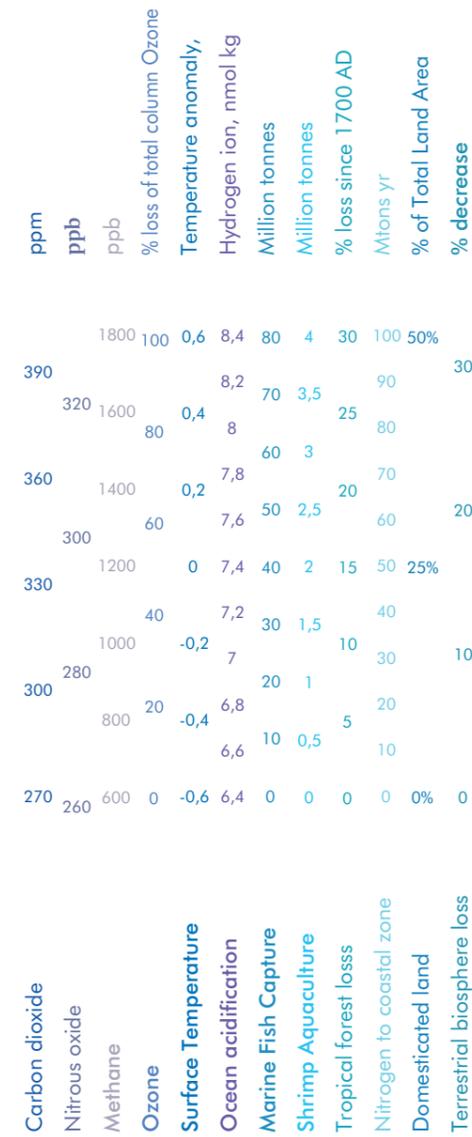
Diese Beschleunigung führt zu verheerenden Umweltzerstörungen, weil Konsum und Produktion nicht auf geschlossenen Stoff- und Energiekreisläufen basieren, in denen Material und Energie wiederverwendet werden, sondern auf offenen, verlustreichen und ressourcenintensiven Stoff- und Energieströmen. Die Folgen dieser Entwicklung werden zunehmend auch in Mitteleuropa und Nordamerika in Form von Hitzewellen, Dürreperioden, Waldsterben und -bränden, Unwettern und Überschwemmungen spürbar. Eine unvoreingenommene Betrachtung muss zu dem Ergebnis kommen, dass sich die globale Entwicklung immer weiter weg bewegt von einem nachhaltigen Zustand, den Donella Meadows und ihre KollegInnen⁶ mit dem Schlagwort „Equilibrium“ beschreiben.

5 Steffen, W., W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney, C. Ludwig. 2015. „The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration.“ *The Anthropocene Review* 2: 81–98.

6 Meadows et al., The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome’s Project on the Predicament of Mankind.



Graphik 1:
The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration (Die Entwicklung des Anthropozäns: Die große Beschleunigung), Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney und Cornelia Ludwig: Trends von 1750 bis 2010 bei global aggregierten Indikatoren für die sozioökonomische Entwicklung.



Graphik 2:
The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration (Die Entwicklung des Anthropozäns: Die große Beschleunigung), Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney und Cornelia Ludwig: Trends von 1750 bis 2010 bei Indikatoren für die Struktur und Funktionsweise des Erdsystems.

Die ‚gebauete Umwelt‘ (Gebäude und Infrastruktur) trägt zu dieser Katastrophe maßgeblich bei: Nach Einschätzung der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2014 sind dem Gebäudesektor rund die Hälfte des Werkstoff- und Energieverbrauchs zuzuordnen. Ferner entstehen ein Drittel der Abfälle durch die Herstellung von Bauprodukten, Sanierungen, Instandhaltung und Abriss.⁷ In Deutschland verursacht der Gebäudesektor den höchsten Ressourcenverbrauch.⁸ Die gängige Praxis des Planens und Bauens lässt sich nicht mit einer nachhaltigen Entwicklung und einem schonenden Umgang mit der Umwelt vereinen. Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen und dem geringen Fortschritt der letzten Dekaden ist es alarmierend, dass nicht mehr Forschung und Entwicklung in das nachhaltige Bauen fließen.

Obgleich der Begriff ‚Nachhaltigkeit‘ auch im Architektur-Diskurs der letzten Jahre bis nahezu zur Bedeutungslosigkeit abgenutzt wurde, bleibt die große Herausforderung an diese Generation von ArchitektInnen und IngenieurInnen weitgehend ungelöst, Bauweisen zu entwickeln, die nicht zu der Zerstörung der Lebenswelt beitragen. Die Diskrepanz zwischen der Dringlichkeit der Probleme und dem fehlenden Umsetzen möglicher Lösungen hat eine Vielzahl von Gründen, die sich auch in anderen Lebens- und Wirtschaftsbereichen wiederfinden, wie hohe Komplexität, Grad der Verflechtung und Maßstab der betroffenen Strukturen und Systeme (unter anderem Rohstoffgewinnung, Bauindustrie, Energieversorgung, Infrastruktur). Die Disziplin der

7 „Auf den Bau und die Nutzung von Gebäuden in der EU entfallen rund 50 % aller unserer geförderten Werkstoffe und unseres Energieverbrauchs sowie etwa ein Drittel unseres Wasserverbrauchs. Zudem ist der Gebäudesektor für rund ein Drittel aller Abfälle verantwortlich und mit Umweltbelastungen verbunden, die in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes auftreten, etwa bei der Herstellung von Bauprodukten, bei Bau, Nutzung und Renovierung von Gebäuden und bei der Entsorgung von Bauschutt.“, Europäische Kommission, „Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor“ (Brüssel, 2014).

8 „Das Bauwesen gehört zu den ressourcenintensiven Wirtschaftszweigen. Alleine in Deutschland werden jährlich 517 Millionen Tonnen mineralischer Rohstoffe verbaut. Das entspricht 90 Prozent der gesamten inländischen Entnahme.(a) Auch der jährliche Einsatz an Baustahl (5,5 Millionen Tonnen(b)) und Zement (26,6 Millionen Tonnen(c)) ist erheblich, was in der Summe dazu führt, dass der deutsche Gebäudebestand inzwischen schätzungsweise 15 Milliarden Tonnen Material umfasst (anthropogenes Materiallager für den Hochbau).(d) An Bau- und Abbruchabfällen fließen jährlich 209 Millionen Tonnen aus dem Baubereich ab, was 52 Prozent des deutschen Abfallaufkommens entspricht.(e) Gleichzeitig beinhaltet dieser Rohstoffeinsatz große Einsparpotenziale, weshalb dem Bauwesen eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung von Ressourceneffizienz zukommt.“; „Ressourceneffizienz Im Bauwesen“, VDI Ressourceneffizienz Zentrum GmbH, accessed August 14, 2019, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/>.

Einzelnachweise: (a) Statistisches Bundesamt, „Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen: Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Umweltschutzmaßnahmen,“ 2017, 24.

(b) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), „Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess): Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen“ (Berlin, 29. Februar 2012), 73.

(c) Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), „Zementindustrie im Überblick 2016 / 2017“ (Berlin, 2016), 4.

(d) Felix Müller et al., „Ressourcenschonung im Anthropozän“ (Dessau-Roßlau, 2017), 32.

(e) Statistisches Bundesamt, „Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen: Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Umweltschutzmaßnahmen.“

Architektur hat weitgehend versäumt, die Themen der Nachhaltigkeit so zu integrieren, dass daraus eigenständige, wirksame Methoden und Ansätze entstehen. Energie-Effizienz wird von ArchitektInnen oft als technische Anforderungen missverstanden, die von IngenieurInnen im Nachgang an Entwurf und Planung gelöst werden. Für den hier vorgestellten Forschungsansatz relevant ist ein methodisches Defizit, das im Hinblick auf die Strategien identifiziert werden kann, mit denen die Anforderungen der Nachhaltigkeit in die Baupraxis eingebracht werden. Die Forschung und Praxis zum nachhaltigen Bauen hat sich auf drei Ansätze und Forschungsfelder konzentriert:

Einzelprobleme

Bei diesem Forschungs- und Entwicklungsansatz werden Einzelprobleme identifiziert (beispielsweise Energieverbrauch, Rohstoffverbrauch) und durch spezifische Entwicklungen gelöst. Meist handelt es sich um technische Lösungen, die einen Teilaspekt des nachhaltigen Bauens adressieren. Folglich wird kein umfassendes Modell für das nachhaltige Bauen an sich entwickelt und/oder die Zusammenhänge zwischen den Teilaspekten werden nicht adressiert (zum Beispiel werden Energieversorgung und Materialverbrauch getrennt voneinander optimiert). Dieser Ansatz hat folglich auch kein Übertragungspotenzial auf andere Problembereiche.

Prototypen und Modellvorhaben

Ein breiterer Ansatz zum nachhaltigen Bauen findet sich häufig bei Prototypen oder Modellvorhaben, die eine Anzahl von Nachhaltigkeitsaspekten für den jeweiligen Anwendungsfall optimieren. Meist werden die Modellvorhaben so konzipiert, dass sie einen relevanten Aspekt der Baupraxis abbilden und deswegen die Ergebnisse in Teilen übertragen werden können. Diese Projekte haben vermutlich den größten Einfluss auf die architektonische Praxis. Die Weiterentwicklung der Disziplin wird in erster Linie über Modellvorhaben oder exzeptionelle Projekte vorangetrieben, die in den Fachmedien aufgearbeitet und verbreitet werden. Problematisch bei diesem Ansatz ist die breite Übertragbarkeit auf andere Kontexte und Aufgaben.

Nachhaltigkeitsbewertungssysteme und Planungshilfen

In den letzten beiden Jahrzehnten wurde in vielen Regionen versucht, alle Aspekte des nachhaltigen Bauens in einen systematischen Zusammenhang zu bringen und damit zu Instrumenten zu gelangen, mit denen sich die Nachhaltigkeit von Gebäude oder Stadtquartieren bewerten und vergleichen lässt. Obgleich auf diesem Wege viel Wissen über Einzelaspekte und die Zusammenhänge von Kriterien des nachhaltigen Bauens entstanden ist, haben die Systeme wenig Einfluss auf die breite Planungspraxis. Hierfür sind vor allem drei Gründe zu nennen: Erstens sind die Systeme nur geeignet den bereits vorhandenen Stand einer Planung zu bewerten. Es handelt sich nicht um

Entwurfs- oder Planungsmethoden im eigentlichen Sinne, die ihren Einfluss direkt bei der Entwicklung der Planung entfalten können. Dadurch führt die Implementierung notwendigerweise zu Iterationen und Mehraufwand, wird also von den PlanerInnen eher als hinderlich statt förderlich empfunden. Hier steht auch die Vorstellung vieler ArchitektInnen im Wege, dass Entwerfen ein schöpferischer Akt sei, der nicht durch technische Probleme eingeengt werden sollte. Zweitens ist das Wissen um die Inhalte der Systeme und die Anforderungen bei ArchitektInnen und PlanerInnen meist gering. Auch heute noch werden diese Inhalte in den wenigstens Studiengängen in der gleichen Tiefe und Breite vermittelt wie andere Inhalte (Statik, Tragwerk, Bauphysik). Drittens sind die Nachhaltigkeitsbewertungssysteme keine Abbildung einer tatsächlich nachhaltigen Baupraxis, sondern zeigen lediglich einen graduell verbesserten Stand der gängigen Praxis auf. Als Beispiel für diese These sei das Benchmarking für Emissionen und Ökobilanzierung genannt. Für die Beurteilung einer Ökobilanzierung eines Gebäudes werden die Daten mit jenen eines Referenzgebäudes gängiger Baupraxis verglichen. Die Bewertung ergibt sich daraus, wie weit die Werte des Referenzgebäudes unterschritten werden. Leider bedeutet dies jedoch nicht, dass es sich um eine Baupraxis handelt, die zu einer nachhaltigen Entwicklung im Sinne der starken Nachhaltigkeit⁹ führt. Eine Ausnahme bildet der schweizerische Ansatz der ‚2000 Watt Gesellschaft‘¹⁰, der mit dem Bereich Energieverbrauch allerdings auch nur einen Teilaspekt adressiert.

Alle drei Ansätze münden in der gleichen Planungspraxis: Die Projekte werden individuell entwickelt und in einem konventionellen Entwurfs- und Planungsprozess optimiert. Ob die Anforderungen an das nachhaltige Bauen erfüllt werden, kann erst nach dem Vorliegen von Ergebnissen innerhalb der Prozesse beurteilt werden. Wenn die Anforderungen nicht erfüllt sind, führt dies zu Iterationen und Mehraufwand. Derartige Wiederholungen von Planungen sind für die PlanerInnen und alle Projektbeteiligte aufwendig - und auf einer menschlichen Ebene schlicht frustrierend. Häufig sind die Anpassungen aufgrund der Vielzahl der betroffenen Planungsgewerke und der Kürze der Zeit nicht umsetzbar. Im konventionellen Planungsprozess hängt die erfolgreiche Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele daher von der Erfahrung der PlanerInnen ab, im günstigsten Fall beim ersten Versuch brauchbare Lösungen zu finden.

Insbesondere für den Baubereich, der zu einem großen Teil zur Umweltzerstörung beiträgt, scheint es dringend notwendig, neue Bauweisen zu entwickeln, die eine umfassende Perspektive gegen Umweltzerstörung, insbesondere gegen den Klimawandel, aufzeigen. Der hier vorliegende Ansatz erarbeitet einen Rahmen – das Bausystem – innerhalb dessen eine Planung von Beginn an zuverlässig die Ziele des nachhaltigen Bauens erreichen kann.

⁹ Konrad Ott and Ralf Döring, *Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit* (Marburg: Metropolis, 2008).

¹⁰ Daniel Spreng and Marco Semadeni, „Energie, Umwelt und die 2000 Watt Gesellschaft,“ CEPE Working Paper, no. 11 (2001), <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004300072>.

In dieser Arbeit wird also ein vierter Weg beschrrieben: Das entwickelte System gliedert die Anforderungen an die Nachhaltigkeit so weit, dass sie zum integralen Bestandteil des Bausystems werden. Gleichzeitig bietet das Bausystem die Möglichkeit sowohl auf die spezifischen Anforderungen des Kontexts als auch auf die (veränderlichen) Bedürfnisse der BewohnerInnen zu reagieren. Die Architektur muss flexibel genug sein, um auf unterschiedliche Bedürfnisse und Gegebenheiten reagieren zu können und gleichzeitig hohe Ansprüche an Nachhaltigkeitsaspekte zu erfüllen.

Wachsender Bedarf

Die Treiber hinter der von Steffen et al. benannten „großen Beschleunigung“ („Great Acceleration“)¹¹ ist eine Zunahme des Konsums sowie das oben beschriebene, exponentielle Wachstum aller wichtigen sozio-ökonomischen Faktoren. Besonders im Bereich des Wohnens führen drei Trends zu deutlich steigender Nachfrage nach Wohnraum:

- Wachstum der Weltbevölkerung,
- Urbanisierung (Umzug der Landbevölkerung in die Städte),
- Zunahme der Wohnfläche pro Kopf.

Allein bis 2025 ist davon auszugehen, dass weltweit 440 Millionen bezahlbare Wohnungen nachgefragt werden, weil bis dahin 1,6 Millionen Menschen in Wohnungen wohnen, die unzureichend, unsicher oder unerschwinglich sind.¹² Die Bautätigkeit zu drosseln ist also keine Lösung, weil die bereits prekären Wohnverhältnisse sich dadurch zusätzlich verschlechtern und die Verknappung zu weiteren Preisanstiegen führen würde. Es ist also notwendig zu erforschen, wie sich diese steigende Nachfrage mit einer nachhaltigen Entwicklung vereinbaren lassen. Dazu werden in dieser Arbeit zum einen technische Lösungen vorgestellt (neue Bauweisen) und zum anderen werden anhand konkreter Beispielprojekte kursorisch neue Wohnformen in die Betrachtung miteinbezogen, die die Nachfrage nach Wohnraum verändern, indem sie alternative Formen und Praktiken des Wohnens ermöglichen und die Passung zwischen den Wohnbedürfnissen und den Wohnformen erhöhen. Im Folgenden Abschnitt werden die Ziele der Systementwicklung beschrieben und in Forschungsfragen übersetzt.

¹¹ Steffen et al., „The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration.“

¹² Jonathan Woetzel et al., „A Blueprint for Addressing the Global Affordable Housing Challenge,“ October 2014, 2.

2.1. EIN MONO-MATERIEALES HOLZ-SKELETT-BAUSYSTEM

Ziel des Forschungsprojekts ist die Entwicklung eines innovativen Holz-Skelett-Bausystems, bei dem Knotenpunkte als form- und kraftschlüssige, geometrische Verbindungen der Tragelemente aus Holz konstruiert sind. Es wird ein prototypisches Wohngebäude (Modellvorhaben) entwickelt, geplant und gebaut. Begleitet wird das Vorhaben durch die Erarbeitung allgemeiner Grundlagen und einer Planungsmethodik, sodass die Innovation zügig in die allgemeine Baupraxis und Baukultur überführt werden kann. Im Modellvorhaben wird eine Skelettbauweise aus Holz erprobt, die für den mehrgeschossigen, innerstädtischen Wohnungsbau geeignet ist.

Holz ist der einzige lokale und nachwachsende Baustoff, der in großen Mengen vorhanden ist und lokal und nachhaltig produziert wird. Im Hinblick auf die Schonung der Ressourcen und den Klimawandel ist Holzbau das mit Abstand geeignetste Baumaterial¹³. Holz belastet die Ressourcen und die Umwelt im Bezug auf Emissions- und Abfallaufkommen weniger als nicht-nachwachsende Baustoffe. Holzverbindungen, die ohne metallische Verbindungsmittel hergestellt wurden, waren bis zur vor-industriellen Zeit die verbreitete Holzbautechnik. Traditionelle Zimmermanns-Bauweisen 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 zeitgenössischen Holzbau geht diese Integrität teilweise verloren, weil Holz mit anderen Baustoffen hybridisiert wird. Ziel des Projekts ist es, eine neue Bauweise zu entwickeln, die unter der Nutzung der neuesten Planungs- und Fertigungsmethoden an die traditionelle Baukultur anknüpft, die für die Städte Mitteleuropas und Asiens lange die prägendste Bauform war. Durch computergesteuerte Fertigung lassen sich solche Zimmermanns-Verbindungen heutzutage kostengünstig herstellen.

Die Forschung hat folgende Schwerpunkte:

- Übersetzung traditioneller Zimmermanns-Knoten in zeitgenössische Bautechnologie: Anschlussdetails als Holz-Holz-Verbindungen mit CAD, CAM, CNC und Robotik.
- Parametrische Berechnungsmodelle für form- und kraftschlüssige Verbindungen.
- Entwicklung von Planungs-, Fertigungs- und Montagethoden für Holz-Holz-Konstruktionen.
- Ökonomische und ökologische Vor- und Nachteile des Bausystems: Qualifizierung und Quantifizierung im Vergleich zu konventionellen Lösungen.
- Image-Aufwertung des Holzbaus durch Förderung der Holz-Baukultur.

¹³ Vgl. beispielsweise „Kohlenstoffspeicher Holz“, <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/wald-im-klimastress/klimawandel/kohlenstoffspeicher-holz/>

Nachhaltiges Bauen mit System

Die vorliegende Forschung hat ein Bausystem entwickelt, das in der Anwendung wesentliche Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung erfüllt und diese Anforderungen bereits im Konstruktionsprozess berücksichtigt.

Die Möglichkeit einer solchen Systementwicklung war die zentrale Hypothese dieser Arbeit. Dazu wurden die Anforderungen der Nachhaltigkeit in Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien übersetzt, die sich in der inneren Logik des Bausystems wiederfinden. Sie sind im übertragenen Sinne in die DNA des Systems eingeschrieben. Daraus resultieren folgende Forschungsfragen:

- Welchen Anforderungen muss ein Gebäude im Sinne der Nachhaltigkeit genügen?
- Wie kann das Bausystem im Hinblick auf diese Anforderungen optimiert werden?

Grundsätzlich wird die Entwicklung des Bausystems nicht als Bruch mit der architektonischen Praxis verstanden, sondern als Versuch, diese Praxis im Sinne einer inkrementellen Methodik weiterzuentwickeln und auf das Bausystem hin auszuweiten. Der konventionelle Entwurfsprozess ist eine Optimierung eines komplexen Systems, bei dem Varianten über die Veränderung bestimmter Parameter erzeugt und andere Varianten ausgeschlossen werden. Dieser Prozess wird auf den unterschiedlichen Maßstabsebenen mit zunehmender Planungstiefe immer und immer wieder reproduziert, was Redundanzen und Ineffizienzen erzeugen kann.

Beim Bausystem wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, um die Redundanzen des konventionellen Vorgehens zu vermeiden und gleichzeitig mehrere Innovationsbereiche abzudecken, die sowohl technische und konstruktive Aspekte als auch ökonomische und ökologische Faktoren sowie die soziale Nachhaltigkeit einbeziehen. An diesen Vorgaben werden die Entwicklungsentscheidungen bezüglich aller Maßnahmen, die zur Erfüllung allgemeiner Anforderungen und der Funktionalität des Gesamtsystems getroffen werden, ausgerichtet.

Rückbau und Recycling

Das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprojekt adressiert wesentliche Probleme des Bauens: Die Erhöhung des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen (Holz) in modernen Bauweisen und die Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Baumaterialien. Dies soll durch eine neue prototypische Holz-Massiv-Bauweise für den mehrgeschossigen Wohnungsbau erzielt werden, die fast ausschließlich aus Holz besteht und zerstörungsfrei zurückgebaut werden kann. Dafür muss die Konstruktion 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.

Ein Großteil des Abfallaufkommens in Deutschland (ca. 53% in 2015) entstehen im Baubereich.¹⁴ 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 stetig¹⁵, zum anderen werden immer unterschiedlichere Materialien immer inniger konstruktiv gefügt. Diese sogenannten Komposit-Baustoffe bestehen aus einer Vielzahl von Ausgangsstoffen, die mit nicht lösbaren Verbindungen zu riesigen Mengen von zukünftigem Sondermüll verklebt werden. Durch diese Müllproduktion werden Gesellschaft und Umwelt ebenso belastet wie durch die gleichzeitig notwendige Produktion von neuem Baumaterial, was wiederum zu Energie- und Rohstoffverbrauch führt. Nachhaltige Gebäude müssen anders konstruiert werden: Die einzelnen Bauteile müssen mit lösbaren Verbindungen gefügt werden. Konstruktive Schichten müssen so aufgebaut sein, dass sie sich einzeln warten und austauschen lassen, da ihre Beanspruchung und Lebensdauer unterschiedlich ist. Insbesondere die Haustechnik muss austauschbar und nachrüstbar sein, weil sich die Technik schnell verbessert und an veränderte Rahmenbedingungen (Verfügbarkeiten von Ressourcen, Klimawandel) angepasst werden muss. Dadurch wird die Rezyklierbarkeit der Konstruktion erheblich gesteigert.¹⁶

Die Reduzierung anfallender Bauabfälle macht einen zentralen Aspekt des Bausystems aus. Daneben erlaubt der größtmögliche Einsatz von Holz, insbesondere im Hinblick auf die Tragstruktur, die Ausführung mit sortenreinen, mono-materialen Bauteilen, die wiederverwendbar und -verwertbar sind. Mit dem ausschließlich auf Holzverbindungen basierenden Fügungsprinzip

¹⁴ Statistisches Bundesamt (2016). Bau- und Abbruchabfälle 2016, <https://www.destatis.de/DE/Zahlen-Fakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Tabellen/Tabellen-AbfallbilanzKurzuebersicht.html> (accessed on 31.10.2016)

¹⁵ Kohler, N.: Energie- und Stoffflußbilanzen von Gebäuden während ihrer Lebensdauer. Schlußbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern (1994).

¹⁶ Knaack, U., Klein, T., Bilow, M. (2015). Imagine No. 08: Concretable. Rotterdam: nai010 publishers.

und durch einen vereinfachten Rückbau der Struktur soll dieser Vorteil weiter verstärkt werden. Im weiteren Ausbau wird ebenso eine Wiederverwendung ganzer Bauteile (besonders von Holzmassivbauteilen) oder eine sortenreine Trennung der Materialien verschiedener Bauteilschichten angestrebt.

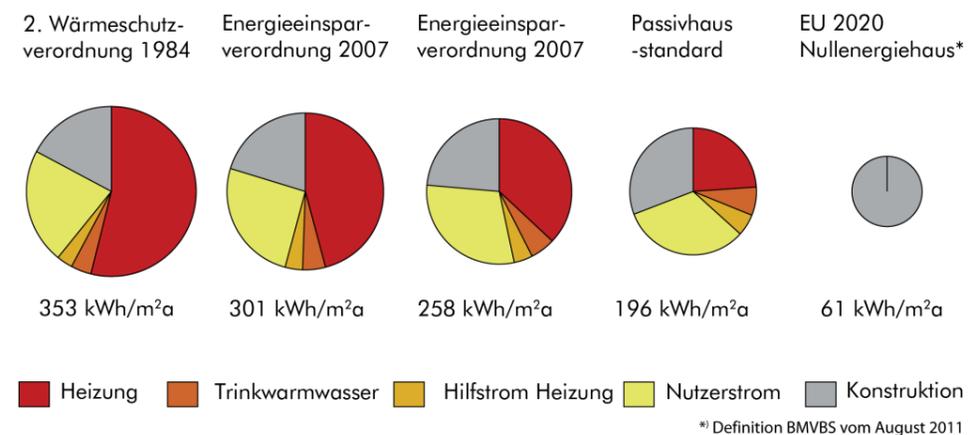
Basierend auf einer in einem vorangegangenen Forschungsprojekt durchgeführten Tragwerksentwicklung, stellt sich für dieses Vorhaben die zentrale Frage, wie sich ein umfassendes Bausystem auf Grundlage der gestellten Ziele konkret umsetzen lässt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Erfüllung der allgemeinen konstruktiven und funktionalen Anforderungen und dem daraus folgenden Zusammenwirken zwischen dem Tragwerk und den gewählten Maßnahmen zum Brandschutz, Schallschutz, Wärme- und Feuchteschutz.

Zuvor gilt es zu ermitteln, welche Grundanforderungen im Zielbereich des Bausystems zu erfüllen sind und welche Besonderheiten dabei für den Holzbau zu beachten sind. Außerdem soll für das Bausystem eine strukturelle Logik entwickelt werden, nach der Ausbau und das Tragwerk zusammengeführt werden.

Wie eingangs erwähnt, stellt das Prinzip einer reinen Holzkonstruktion mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen einen Rückbezug auf traditionelle Zimmermannstechniken dar, die sich in verschiedenen Bauweisen und baukulturellen Kontexten über lange Zeit bewährt haben. Mit dem Bausystem wird versucht, dieses bestehende Wissen in eine zeitgemäße Konstruktions- und Produktionslogik zu übersetzen. Historische Beispiele beweisen, dass mit dem Primärbaustoff Holz ohne zusätzliche Verbindungsmittel aus Stahl leistungsfähige und langlebige Konstruktionen umsetzbar sind.

Aufgrund der im Vergleich mit anderen Bauweisen komplexen Konstruktionen und des hohen Herstellungsaufwands wurden Holzbauweisen im Laufe der historischen Entwicklung stark in den Hintergrund gedrängt. Durch Fort-

Graphik 3: Entwicklung der energetischen Standards.



schritte bei neuen, hochleistungsfähigen Holzwerkstoffen und technischen Möglichkeiten der Holzbearbeitung in Form eines digital gesteuerten und automatisierten Abbunds eröffnen sich Potentiale, die mit dem Bausystem verstärkt ausgeschöpft werden sollen.

Auf modernen CNC-Abbund-Maschinen und mit robotischen Fertigungsmethoden lassen sich auch komplizierte, dreidimensionale Geometrien vergleichsweise einfach und trotzdem sehr präzise herstellen. Weil der Abbund bereits bei konventionellen Holzkonstruktionen digitalisiert und automatisiert erfolgt, bedeutet eine Ausbildung neu entwickelter Verbindungspunkte keine grundsätzlich neue Fertigungsmethode, sondern nur den intelligenteren Einsatz bestehender Produktionskapazitäten.

Handlungsfeld Baukonstruktion

Im Hinblick auf das nachhaltige Bauen wurden in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte bei der Reduzierung des Energiebedarfs von Gebäuden gemacht. Diese Entwicklungen beziehen sich allerdings in erster Linie auf den Energiebedarf im Gebäudebetrieb. Sie haben in der Baupraxis bereits Grenzen erreicht. Im damit erzielten Standard des Nullenergiehauses beschränkt sich der Primärenergiebedarf letztendlich ausschließlich auf die Baukonstruktion. An dieser Stelle besteht also das entscheidende Optimierungspotential im nachhaltigen Bauen.

Nach heutigen Standards können verschiedene Bauweisen, unabhängig von ihren primären Baustoffen, die Kriterien gängiger Nachhaltigkeitsbewertungen erfüllen, da ein Schwerpunkt der Betrachtungen auf der energetischen Bilanz im Gebäudebetrieb liegt. Das bereits in der frühen Planung integrierte Optimierungspotential liegt daher in der Baukonstruktion und der Materialwahl für die Primärkonstruktion des Tragwerks. An dieser Stelle verspricht der Einsatz von Holz als regionaler und nachwachsender Rohstoff entscheidende Vorteile hinsichtlich der ökologischen Wirkung eines Gebäudes. Der größtmögliche Einsatz von Holz bildet daher die zentrale Grundvoraussetzung der Systementwicklung.

2.2. RATIONELLE BAUWEISEN

Die bereits verfügbaren Techniken werden konventioneller Weise nicht konsequent in einem durchgängigen Holz-Holz-Bausystem eingesetzt. Einzelne Anschlusspunkte werden in der bisherigen Praxis zwar als geometrische Verbindung umgesetzt, der Großteil wird jedoch im Normalfall mit metallischen Verbindern gefügt. Die Herstellung aller Verbindungen als form- und kraftschlüssige Holz-Holz-Verbindungen bedeutet eine dramatische Vereinfachung des Holzbaus. Die Planung wird vereinfacht, weil keine Pläne für die Verbindungsmittel erarbeitet und kommuniziert werden müssen. Die Montagezeiten werden verkürzt. Die Lastabtragung innerhalb und zwischen den Bauteilen wird optimiert. Das hat letztlich auch positive Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit.

Ökonomische Ebene

Für die Überführung des neuen Bausystems in die Baupraxis ist nicht zu vernachlässigen, dass es eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Alternative zu etablierten Bauweisen im Wohnungsbau darstellen muss. Die Effizienz der rationellen Bauweise des Systems stellt auf diverse Bauaufgaben übertragbare Planungsmethoden bereit. Automatisierung und Vorfertigung wirken sich positiv auf eine erhöhte Planungssicherheit und eine Verkürzung der Bauzeiten aus.

Die Planungsmethoden sind auf die Ermittlung der möglichst effizientesten Konstruktion auszurichten, um den Materialverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren. Ebenso gilt es, die Flächeneffizienz sowohl hinsichtlich der Konstruktion als auch der Nutzung zu optimieren, mit anderen Worten: den Ansatz der Suffizienz, der Reduktion auf das Wesentliche, zu verfolgen.

Herstellung und Montage

Mit dem erhöhten Automatisierungsgrad geht eine Verlagerung vieler wertschöpfender Arbeitsschritte von der Baustelle in eine Werksfertigung einher. Die damit verbundenen Vorteile, unter anderem wettergeschützte Herstellungsbedingungen und die Gewährleistung hoher Präzision und Ausführungsqualität durch einen möglichst hohen Grad der Vorfertigung, können durch das Bausystem voll ausgeschöpft werden. Als weitere Prozessoptimierung resultiert daraus auch eine möglichst weitreichende Vereinheitlichung der Bauteilaufbauten und Anschlusslösungen, die im Bausystem zum Einsatz kommen, und somit einer Reduzierung und Vereinfachung der Montageschritte auf der Baustelle. Ziel ist eine weitestgehend integrierte Vorfertigung von standardisierten Tragwerks- und Ausbaubauteilen.

3.1. AUFBAU DER FORSCHUNGSARBEIT

Dieses Kapitel fasst die oben beschriebenen Inhalte noch einmal kompakt zusammen und erläutert ihre Einbettung in den Gesamtkontext der Forschung, um den LeserInnen vor dem Einstieg in die eigentliche Darstellung der Forschungsarbeit einen guten Überblick zu ermöglichen. Die Arbeit gliedert sich in drei Abschnitte:

TEIL I. Theorie // Ziele, Methoden und Grundlagen

Im ersten Teil werden die Ziele der Arbeit definiert, die Forschungsfragen und Methoden beschrieben. Auch andere Bausysteme werden kurz vorgestellt und analysiert.

- Kapitel 1 Einleitung
- Kapitel 2 Ziele der Systementwicklung
- Kapitel 3 Methodik und Parameter der Systementwicklung
- Kapitel 4 Referenzen

TEIL II. Systementwicklung

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der eigentlichen Entwicklung des Bausystems. Dabei werden zuerst die strukturellen, also geometrischen und baukonstruktiven Grundlagen erarbeitet. Im Anschluss werden die einzelnen technischen Aspekte – Tragwerk, Brandschutz, Schallschutz, thermische Bauphysik und Feuchteschutz, sowie Herstellung und Montage – betrachtet und exemplarisch baukonstruktiv umgesetzt.

Die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des Systems werden in diesem Teil über eine Reihe von Fallstudien aufgezeigt, bei denen das Bausystem in der Praxis eingesetzt wurde. Dieser Teil umfasst folgende Kapitel:

- Kapitel 5 Strukturelle Systementwicklung
- Kapitel 6 Technische und baukonstruktive Systementwicklung
- Kapitel 7 Exploration / Fallstudien

TEIL III. Darstellung der Ergebnisse

Im letzten Abschnitt werden die unterschiedlichen technischen Aspekte im Zusammenhang betrachtet und im Hinblick auf ihre hemmende oder fördernde Wirkung zur Erreichung der hier gesetzten Forschungsziele beschrieben. Ein Schwerpunkt dieses Abschnitts bildet der bauphysikalische Hintergrund, vor dem die Einzelaspekte einer kritischen Prüfung unterzogen werden. Die Ergebnisse werden zum einen allgemein dargelegt.

Zum anderen werden sie in einem Bauteil-Katalog zusammengefasst, der sich an der Ausführung des Modellvorhabens dgj223 Collegium Academicum – IBA Heidelberg orientiert. Dieser Abschnitt umfasst folgende Kapitel:

- Kapitel 8 Zusammenwirken von Tragwerk, Brand-, Schall-, Wärme- und Feuchteschutz
- Kapitel 9 Bewertung des Entwicklungsstand // Weiterer Forschungsbedarf

3.2. METHODIK

Forschungsansatz

Es handelt sich bei der vorliegenden Forschung um eine angewandte Bauforschung mit hohem Entwicklungsanteil. Die Planung, Testaufbauten und der Bauprozess sind integraler Bestandteil der Forschungsarbeit. Anhand von theoretischen, baukonstruktiven und statischen Modellierungen, Untersuchungen und Berechnungen werden die Dimension, Fügung und die Montage der Bauteile entwickelt.

Stand der Forschung und Technik, Referenzen und Literatur

Die Arbeit bewertet andere Bausysteme und Bautechnologie sowie andere Quellen, um sich im breiteren Diskurs zu verorten, insbesondere werden markante Beispiele aus der Architektur- und Baugeschichte selektiert, die eine hohe Relevanz zum vorliegenden Ansatz aufweisen.

Entwicklung von Bausystem und Konstruktionen

Wie obenstehend erläutert, gliedert sich die eigentliche Systementwicklung in zwei Arbeitsbereiche:

- Strukturelle Systementwicklung
- Technische und baukonstruktive Systementwicklung

Hier soll noch einmal detaillierter dargelegt werden, warum diese Aufteilung als sinnvoll erachtet wird. Die strukturelle Systementwicklung beschäftigt sich mit den übergreifenden Fragen des Entwurfs und der Baukonstruktion. Hier werden die Annahmen und die Definition des Bausystems erklärt. Außerdem werden die Geometrie und Größenannahmen abgeleitet, die sich auf die Nutzung, die Leistungsfähigkeit des Materials und die Herstellung und Montage beziehen. Daraus ergeben sich baukonstruktive Systemvarianten, die im Einzelnen vorgestellt und diskutiert werden.

Die hier eingesetzten Methoden sind in erster Linie eingeführte Methoden der Gebäudeplanung: Zeichnungen, digitale und physische Modelle, Details, numerische Vergleiche. Für die Bewertung der Ergebnisse entscheidend ist der Abgleich mit den Anforderungen und den anerkannten Regeln der Technik und der geltenden Baugesetze, die den Handlungsrahmen weitgehend vorgeben.

Die technische und baukonstruktive Systementwicklung betrachtet zunächst die einzelnen technischen Fragen einzeln:

- Tragwerk,
- Brandschutz,
- Schallschutz,
- Thermische Bauphysik,
- Herstellung und Montage.

Für die einzelnen Planungsthemen werden jeweils konkrete Anforderungen und unterschiedliche Lösungsansätze vorgestellt.

Auch hier werden zuerst planerische Methoden, wie Zeichnungen und 3D-Modelle eingesetzt, um Lösungen zu entwickeln, die im nächsten Schritt mit numerischen oder anderen ingenieurtechnischen Verfahren geprüft werden. Teil der Forschungsarbeit waren hier auch die Anfertigung von Prototypen, Ausschnittmodellen im Maßstab 1:1 sowie Messstände und Laborversuche.

Demonstrator, Versuche und Messungen

Neben numerischen Verfahren und Nachweisen sind auch Testaufbauten zur Durchführung von Versuchen und Messungen erstellt worden. So wurde ein Ausschnitt des Bausystems gebaut und mehrfach modifiziert, um die Ergebnisse von Berechnungen und Simulationen mit den Messwerten am „Objekt“ zu vergleichen. Es wurden sowohl Teile des Tragwerks als auch Ausschnitte des Ausbaus (Boden, Wand, Decke) und der Fassade im Maßstab 1:1 gebaut und mit einer zusätzlichen Längswand im Inneren ausgestattet. An diesem Demonstrator wurden insbesondere folgende Aspekte untersucht:

Die bauphysikalischen Aspekte, insbesondere Schallschutz, Trittschall- und Luftschalldämmung, sollten zunächst mit numerischen, theoretischen Verfahren abgebildet werden. Nach Entwicklung eines Rechenmodells, das diese Aspekte in der Planung abbildet, war die selbstgesetzte Vorgabe, diese Berechnungen an dem umzusetzenden Gebäude (Modell-Vorhaben im Rahmen der IBA-Heidelberg) durch Messungen zu überprüfen. Für den Fall, dass keine geeigneten Rechenmodelle gefunden werden könnten, sollten Messungen entsprechend durch Tests an Musterstücken und Teilaufbauten des Systems durchgeführt werden, sozusagen als ‚fall-back-Lösung‘. Ein Teil der

Messungen wurden auf diese Weise im und am für das Modellprojekt dgj223 Collegium Academicum extra gebauten Demonstrator vorgenommen und mit nachträglichen Messungen am tatsächlich umgesetzten Gebäude ergänzt und gegengeprüft. Folgende Messungen von Trittschall und Luftschalldämmung wurden durchgeführt:

- Zwischen den Geschossen (vertikal und diagonal: Decke – Decke).
- Zwischen angrenzenden Wohneinheiten (horizontal).
- Schallnebenwege und Übertragung Längsschall.
- Luft- und Rauchdichtheit vertikal und horizontal.

Brandversuche

Nicht geplant als Teil des Forschungsvorhabens waren Brandversuche, weil diese den finanziellen Rahmen des Projekts gesprengt hätten. Die vorliegende Ansatz geht aber davon aus, dass das Brandverhalten von Vollholz ausreichend gut erforscht ist, um das Brandverhalten des Bausystems durch theoretische Überlegungen und Berechnungen simulieren zu können.

Als Teil des Planungs und Genehmigungsprozesses wurden allerdings doch Brandversuche zu einzelnen Bauteilen und Verbindungen durchgeführt, deren Ergebnisse in die Forschungsarbeit integriert werden konnten.

Untersuchungen am Modellvorhaben

Am Beispiel eines Modellvorhabens, dem Gebäude des dgj223 Collegium Academicums in Heidelberg, wurde die innovative Bauweise entwickelt, erprobt und optimiert, um die Anwendbarkeit für den mehrgeschossigen, innerstädtischen Wohnungsbau zu prüfen. Die Planung und Testaufbauten sind integraler Bestandteil der Forschungsarbeit. Aus den Erkenntnissen der Forschung und der Planung sind allgemeine Grundlagen und eine Planungsmethodik erarbeitet worden. Anhand von theoretischen, baukonstruktiven und statischen Modellierungen, Untersuchungen und Berechnungen wurden die Dimension, Fügung und die Montage der Bauteile entwickelt.

Exploration / Fallstudien zur Anwendung des Bausystems

Die Entwicklung des Bausystems erfolgte, neben dem bereits mehrfach genannten Modellvorhaben dgj223 Collegium Academicum in Heidelberg, in der Exploration einer Reihe von weiteren Case Studies (Fallstudien), die mit einer weitgehend einheitlichen Methode untersucht und verglichen wurden. Diese Prozesse führen zu einem inkrementellen, aber zielgerichteten Fortschritt. Idealerweise würden bei der Iteration nur die Teile in Frage gestellt, die den grundsätzlichen Anforderungen an das System oder den Anforderungen für den Anwendungsfall nicht genügen. Allerdings ergibt sich durch die spezifischen Anforderungen der einzelnen Cases Studies auch eine Veränderung von zahlreichen anderen Parametern.

Die anderen Anwendungsfälle können auch herangezogen werden, um die Ausformung der Bauweise unter veränderten Rahmenbedingungen, zum Beispiel in Hinblick auf die Geschossigkeit oder Anforderungen an den Schallschutz oder den Zuschnitt der Wohnungen, zu untersuchen.

Insgesamt wurde das Bausystem bisher dreimal umgesetzt:

- Modellvorhaben des „Collegium Academicums“ in Heidelberg.
- Wohngebäude „Gemeinsam suffizient Leben“ in Frankfurt am Main.
- Wohngebäude „Wohnwerk“ in Mannheim.

Alle drei Anwendungen werden vorgestellt und verglichen.

Interaktionen, Synergien und Dyssynergie

Teil der Forschung ist die Untersuchung des Zusammenwirkens der unterschiedlichen, im ersten Schritt zunächst getrennt betrachteten Planungsdisziplinen. Insbesondere beim Holzbau ist die integrale Planung und die Erforschung der dafür notwendigen Grundlagen von zentraler Bedeutung. So werden zum Beispiel beim zu entwickelnden System die tragenden Bauteile auf Abbrand bemessen (Heißbemessung). Die form- und kraftschlüssigen Verbindungen haben neben den oben genannten Vorteilen den Nachteil, dass sie potentiell als Schallbrücke wirken. Deswegen müssen spezielle Details entwickelt und nachgewiesen werden:

- globales und lokales Tragwerk (Knoten und Verbindungen).
- Brandschutz.
- Schallschutz.
- Bauphysik (thermische Bauphysik und Feuchteschutz).

In dem Forschungsvorhaben wurde eine Matrix aus Anforderungen, fördernden und hemmenden Wechselwirkungen, erarbeitet, die eine systemische Betrachtung und damit eine Identifikation der maßgeblichen Faktoren zulässt. Da sich die Anforderungen je nach gesetzlichen Rahmenbedingungen, Nutzung und technischen Anforderungen verändern, lassen sich mit der Matrix für die einzelnen Vorhaben individuelle Planungsparameter und Lösungsansätze ableiten.

Untersuchung zur Übertragbarkeit und Verallgemeinerung

Die Entwicklungsarbeit wird auch Aussagen zu der Übertragbarkeit und den Einsatz-Grenzen des Bausystems treffen. Die maßgeblichen Faktoren werden identifiziert und damit das Potential für einen breiten Einsatz aufgezeigt. Durch die systematische Erforschung der Anwendungsparameter, Last-

fälle und Eigenschaften möglicher Hölzer und Holzwerkstoffe für die Verbindungselemente wird das Einsatzgebiet des Bausystems mit einer Abschätzung der Dimensionen für den jeweiligen Anwendungsfall erarbeitet. Es werden folgende Parameter betrachtet:

- Gebäudehöhe und Geschossigkeit (inkl. der Anforderungen an den Brandschutz).
- Gebäudegeometrie und Außenmaße (Länge, Breite, Höhe).
- Spannweiten, Stützweiten und Rastermaße.
- Gerichtete und ungerichtete Tragsysteme (ungleiche und gleiche Spannweiten in X- und Y-Richtung).
- Eigengewichte und Nutzlasten in Abhängigkeit von Konstruktion und Nutzung.
- Auswirkung von Standort und äußeren Lasten (Erdbeben, Schnee-, Windlasten).

Bewertung des Entwicklungsstandes // weiterer Forschungsbedarf

Im Schlussteil wird der Arbeitsstand qualitativ bewertet und in die Entwicklung des Holzbaus eingeordnet. Daraus werden dann auch weitere Forschungsthemen und Herausforderungen für die Bauweise abgeleitet.

Neben konkreten architektonischen und künstlerischen Referenzen basiert diese Arbeit auf einer Reihe von Theorien, Konzepten, Ideen und Begriffen. In diesem Abschnitt werden die zentralen Begriffe der Arbeit vorgestellt und jeweils in einen theoretischen Kontext eingebettet. Außerdem werden in diesem Kapitel ausgesuchte Literatur sowie Quellen und Beispiele als theoretische und praktische Grundlagen der Arbeit gesammelt und ausgewertet. Dabei werden drei Arten von Referenzen herangezogen:

- Architektonische und baugeschichtliche Referenzen
- Technische Referenzen // Andere Bausysteme

4.1. ARCHITEKTONISCHE UND BAUGESCHICHTLICHE REFERENZEN

Es gibt einen reichen Fundus an historischen Bausystemen für den Wohnungsbau. Je nach Definition lassen sich auch die traditionellen Bauweisen, wie der Fachwerksbau, die amerikanischen Bauweisen ‚Balloon frame‘ oder ‚Plattform‘, aber auch japanische, chinesische oder koreanische Bauweisen als Systembauweisen mit festen Regeln zu Material, Fügung und Anschlüssen betrachten.¹⁷ Im Allgemeinen wird von Bausystemen heutzutage vor allem dann gesprochen, wenn die systematische Planung mit normierten Details und Konstruktionen und einem hohen Vorfertigungsgrad gepaart ist. In diesem Abschnitt werden historische Bausysteme vorgestellt, die im Hinblick auf die technischen oder architektonischen Prinzipien in Teilen vergleichbar sind. Die Beispiele sollen einzelne Aspekte illustrieren, die für das neue Bausystem besonders relevant sind.

¹⁷ Gerald Staib, Andreas Dörrhöfer, and Markus Rosenthal. *Elemente + Systeme: Modulares Bauen: Entwurf, Konstruktion, Neue Technologien* (München: DETAIL, 2008), 14ff.

Vernakuläre und autochtone¹⁸ Bauweisen (am Beispiel traditioneller japanischer Architektur)



Abbildung 1:
Residenz in Shosei-en Garden
aka. Kikoku-tie, Kyoto, 1657,
Ishikawa Jozan (1583-1672),
Foto: Hans Drexler, 2016.

Ein Beispiel für die vernakuläre Entstehung von Bauweisen und Alltagsgegenständen, also historisch vor Ort herausgebildeten und gewachsenen Artefakten, bietet das Handwerk. Im Handwerk werden Formen, Techniken und Gestaltungen über Generationen tradiert und inkrementell weiterentwickelt. Die Gebrauchstauglichkeit und gestalterische Qualität werden eher als Übereinstimmung mit den überlieferten und bewährten Formen erzielt und (re)produziert, als nach Innovationsgrad. Interessant für diese Studie ist die Selbstverständlichkeit, mit der die Formen und Techniken wahrgenommen werden. Gleichzeitig besteht durch die Omnipräsenz solcher Formen im Alltag ein großes Potential der Identitätsstiftung, wie sie beispielsweise in der japanischen Kultur typisch ist. Über diese Identifikation werden archetypische Vorstellungen dessen geprägt, was ein Haus ist oder wie ein Alltagsgegenstand beschaffen sein muss und welche Funktionalitäten sie wie erfüllen müssen. Der Bezug zu autochthonen, häufig regional unterschiedli-

¹⁸ Den Begriff ‚autochthones Bauen‘ hat Günter Pfeifer geprägt: *Sustainable By Design*, „Symposium: Klima und Raum. Autochthone und kybernetische Strukturen“ (Münster School of Architecture, 2011).
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.“ „Autochthone Art,“ Wikipedia, accessed March 31, 2020, https://de.wikipedia.org/wiki/Autochthone_Art.

chen Bauformen und deren Identitätsstiftung ist dabei auch wirksam, wenn diese durch den Lauf der Geschichte in der Lebenswirklichkeit der Menschen nicht mehr präsent sind. Viele dieser Bauweisen sind das Ergebnis eines langen Optimierungsprozesses unter Berücksichtigung des lokalen Klimas und der verfügbaren Baumaterialien. Einen guten Überblick bietet der Katalog zur Ausstellung ‚Learning from Vernacular‘¹⁹, der die Ergebnisse eines Projekts von Prof. Frey Pierre an der EPFL Lausanne mit anschaulichen Modellen und Analysen weiterführend darstellt.

Wichtiger Bezug für die vorliegende Arbeit ist die traditionelle Wohnarchitektur der Edo- oder Tokugawa-Zeit Japans (1603-1868). Sie ist ein Beispiel für eine handwerkliche Bautradition, die eine starke Wirkung auf die kulturelle Identität des Landes hatte. Die Wohnarchitektur entstand nach strikten handwerklichen Maßgaben, die sowohl die Konstruktion als auch die Größe und Nutzung der Räume in einem engen System definierten. Die Bauweise stellte gleichermaßen die Nutzbarkeit der Räume sowie die Gebrauchstauglichkeit und technische Eignung sicher. Durch diese homogenisierende Bautradition und das staatliche Verbot von Auslandskontakten wurden Technik (vor allem den Holzbau) und Raumwirkung (Architektur) des traditionellen Bausystems in einem inkrementellen, iterativen Prozess weiterentwickelt. Epochale Neuerungen blieben aus. Noch heute ist das prototypische Bild von japanischer Architektur durch diese Bauten geprägt. Eine umfassende Darstellung und Analyse der architektonischen, technischen und kulturellen Implikationen finden sich bei Heino Engel.²⁰ Im Gegensatz zu Repräsentationsbauten (Tempel, Schlösser) zielte diese Tradition nicht auf das Entstehen individueller Architekturen ab, sondern auf eine Art „Alltagsverstand“ des handwerklichen Bauens, der auf lokale Gegebenheiten mit existierenden Lösungen flexibel reagieren und sich adaptieren konnte. Jared Diamond²¹ erklärt, wie verschiedene traditionelle Gesellschaften an der Herausforderung einer nachhaltigen Wirtschaft entweder scheiterten oder sich an dieser weiterentwickelt haben. Als ein positives Beispiel beschreibt er die Holzbau-Tradition der Tokugawa-Zeit. Eine drohende Entwaldung Japans aufgrund der hohen Bautätigkeit und Herstellung von Feuerholz wurde durch eine strikte Limitierung des Verbrauchs und der Bewirtschaftung der Wälder vermieden. Gleichzeitig wurde der Holzverbrauch durch die inkrementelle Weiterentwicklung der Konstruktionen gesenkt.

Neben der Kohärenz zwischen der Konstruktion und dem Entwurf der traditionellen Bauformen sind die Wohnform und die flexible Nutzung des Raums für den vorliegenden Ansatz von Interesse. In traditionellen

19 Pierre Alain Frey and Patrick Bouchain, *Learning from Vernacular: Pour Une Nouvelle Architecture Vernaculaire* (Arles: Actes Sud, 2013).

20 Heino Engel, *The Japanese House: A Tradition for Contemporary Architecture*, 1st ed. (North Clarendon: Charles E. Tuttle, 1964).

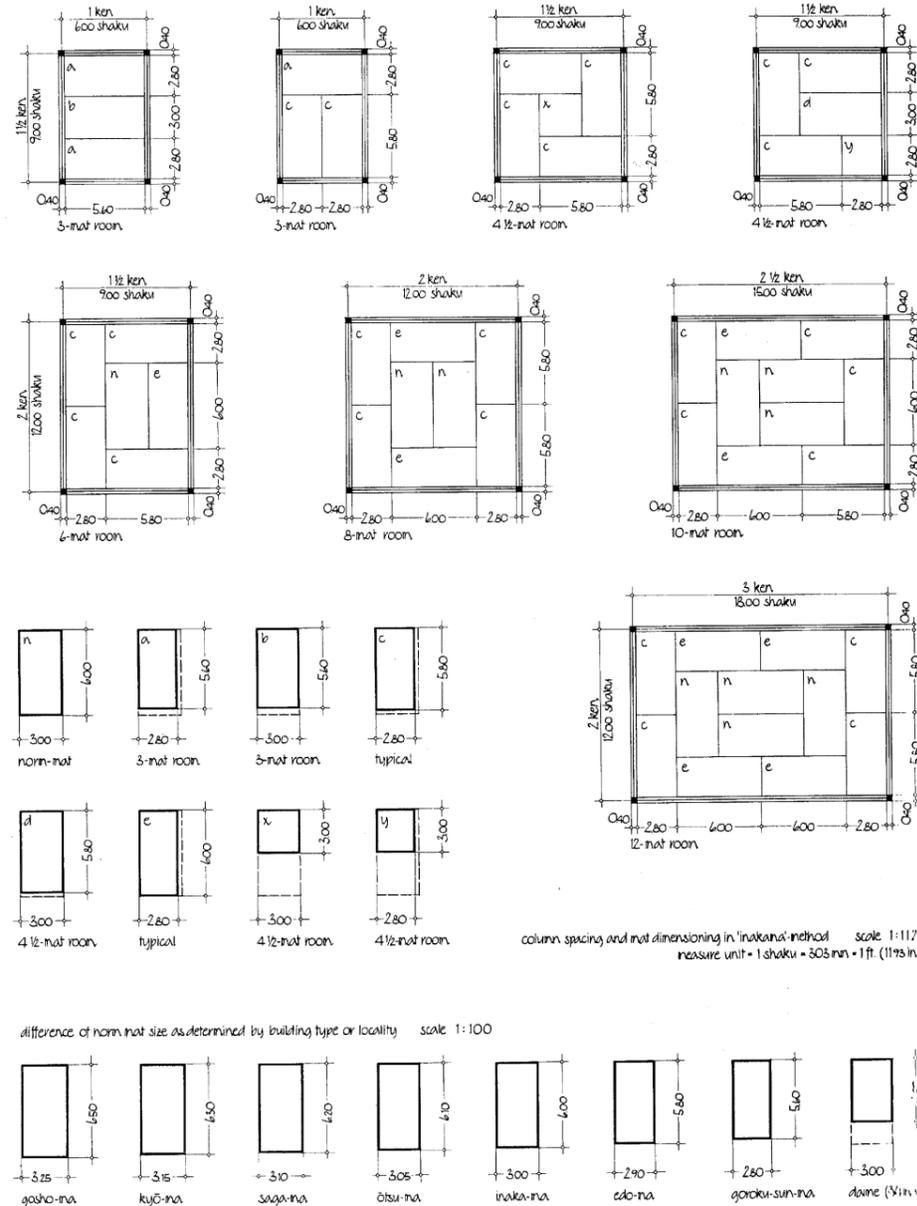
21 Jared Diamond, *How Societies Choose to Fail or Succeed* (New York: Viking Penguin, 2005), 298ff.

japanischen Wohnhäusern werden die Räume flexibel für unterschiedliche Wohnfunktionen (Schlafen, Essen, Besuch empfangen) genutzt. Diese Flexibilität wird erreicht, indem die Räume keine schwere oder fest verbaute Möblierung aufweisen. Vielmehr werden die für die jeweilige Funktion notwendigen Möbel und Accessoires wie Futons, kleine Tische oder Geschirr, bei Bedarf aus einem zugeordneten Schrank hervorgeholt und nach der Nutzung wieder in den Schränken verstaut. Die Räume bleiben nutzungsneutral, multifunktional und überwiegend frei von Möbeln und Einbauten. Dennoch ergibt sich aus der Anordnung und dem Zuschnitt der Räume innerhalb der Wohnungen und der Orientierung nach außen (Straße, Garten, Himmelsrichtungen) eine Hierarchie und Präferenz der Nutzung. Diese wird umso differenzierter, je größer die Häuser und Haushalte sind. Der weitgehende Verzicht auf feste Wände und der Einsatz von Schiebewänden begünstigt die flexible Nutzung der Räume, die sich nach außen, aber auch zu anderen Räumen hin, abtrennen lassen. Im asiatischen Raum (China, Japan, Korea) gibt es eine lange Tradition für Skelettbauten aus Holz. Es lässt sich annehmen, dass ein Großteil der Skelettbauten bis zur industriellen Zeit und der Einführung von Gusseisen, Stahl und Stahlbeton aus Holz konstruiert waren. In der Tokugawa- oder auch Edo-Zeit wurden die Wohngebäude als reine Skelettbauten konstruiert, die durch vergleichsweise leichte Trennwände und vor allem Schiebewände („shoji“) separiert und verbunden werden konnten.

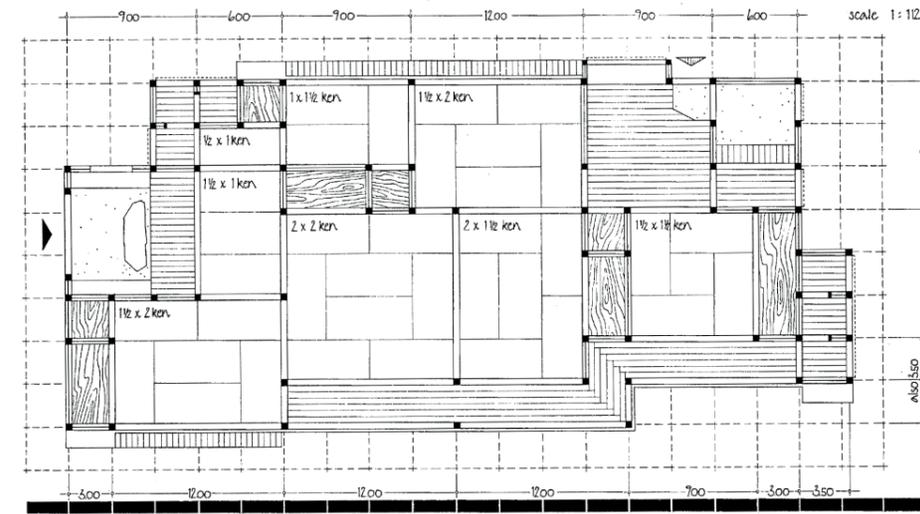
Interessant für den vorliegenden Ansatz ist die Tatsache, dass die gesamte Primärkonstruktion innerhalb einer einzigen, konstruktiven Logik mit entsprechenden Varianten abgebildet werden konnte, wie die Abbildungen auf den folgenden Seiten illustrieren. Auf der Grundlage eines einzigen Grundrasters ist die Zusammenstellung einer breiten Palette an unterschiedlichen Grundriss-Varianten möglich, die trotzdem die Integrität und Ästhetik des Gesamtsystems respektieren.

Darüberhinaus sind die ausgefeilten, traditionellen Techniken der Holzknotenerstellung Meisterwerke der Funktionalität und Ästhetik, die für die vorliegende Forschungsarbeit maßgeblich sind. Im Gegensatz zu Metallverbindungen, die auf Schrauben und Nägel basieren, ermöglichen Holzknoten kraftschlüssige Verbindungen ohne zusätzliche Beschläge. Da sie ohne Leim oder Nägel auskommen, reduzieren sie den Einsatz von umweltschädlichen Materialien. Traditionelle japanische Holzknoten basieren auf präzise gearbeiteten Zapfen und Nuten, die sich perfekt ineinanderfügen. Diese millimetergenaue Passform gewährleistet eine hohe Stabilität und Tragfähigkeit, ohne dass Leim oder Nägel erforderlich sind. Die Bandbreite der Formen reicht von einfachen Kreuzverbindungen bis hin zu komplexen, mehrteiligen Knoten. Jede Form erfüllt dabei eine spezifische Funktion und trägt zur strukturellen Integrität des Bauwerks bei. Die schlichten, eleganten Formen der Holzknoten fügen sich in die Architektur ein.

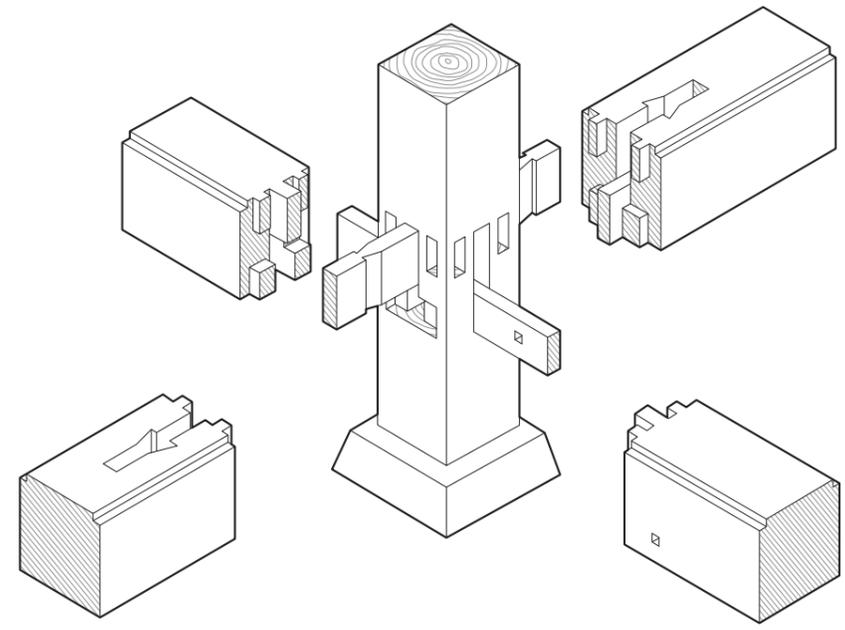
Graphik 4:
Measure and Construction
of the Japanese House,
Bildquelle: Heino Engel,
Tokio, North Clarendon,
1985.



Graphik 5:
Rastermaße und typische
Grundrisse in traditioneller
japanischer Wohnarchitektur
in:
Measure and Construction
of the Japanese House,
Bildquelle: Heino Engel,
Tokio, North Clarendon,
1985.



Graphik 6:
Yatoi hoza sashi,
dreidimensionaler
Knotenpunkt des Ashikatame
Träger (Hauptträger), Sato,
Hideo; Nakahara, Yasua; Nii,
Koichi Paul (Übersetzer); The
Complete Japanese Joinery;
Vancouver, 2000.



Konrad Wachsmann und Walter Gropius: ‚General Panel System‘

„[Eine] neue Interpretation der Architektur, die nicht aus unseren Wünschen, sondern aus unseren Möglichkeiten [entsteht]“²²

Konrad Wachsmann, 1956

Das ‚General Panel System‘ repräsentiert ein historisches Beispiel für ein Holzbausystem aus dem europäischen Raum. Für seine Entwicklung sind verschiedene Konzepte zentral, die von anderen Bausystemen aufgegriffen wurden. Daher gilt das ‚General Panel System‘ noch heute als eine wichtige Referenz, auch wenn es sich nicht hat durchsetzen können.

Konrad Wachsmann (1901 - 1980) arbeitete ab 1926 als Chef-Architekt für die Christoph & Unmack AG, einem 1822 gegründeten Unternehmen, das sich neben Waggon-, Stahl- und Motorenbau vor allem auf die Produktion von vorgefertigten Holzhäusern spezialisiert hatte.²³ Wachsmann war jüdischer Abstammung, emigrierte 1938 nach Paris und meldete sich als Freiwilliger in der französischen Armee. 1941 wanderte er in die USA aus und arbeitete mit Walter Gropius (1883 - 1969) an einem Bausystem für ein- und zweigeschossige Wohnbauten. Das erste System, ‚Packaged House System‘, wird bis 1942/43 zum ‚General Panel System‘ weiterentwickelt.²⁴ Es besteht aus vergleichsweise kleinen Tafeln von einer Größe von ca. 2,44m (96 Zoll = 2,4384m) x 1m (40 Zoll = 1,016m). Das Planungsmodul von 40 Zoll bezieht sich auf das im amerikanischen Holzbau übliche Grundmaß von 4 Zoll.²⁵ Das System wird als Holzbau entwickelt, weil in den Vereinigten Staaten zu jener Zeit der Holzbau („2x4“, ‚Ballon frame‘ und ‚Plattform‘) boomt. In Kriegszeit ist außerdem die Verfügbarkeit von Metallen stark eingeschränkt.

Wachsmann sammelte in seiner Zeit bei Christoph & Unmack AG Erfahrung mit vorgefertigten Holzhäusern. Der Zielmarkt für das System waren kleine ein- und zweigeschossige Häuser im unteren Preissegment, die bis heute einen Großteil des amerikanischen Wohnungsbaus ausmachen. Solche Gebäude sollen weitestgehend vorgefertigt und innerhalb weniger Stunden von ungelernten ArbeiterInnen aufzubauen sein.

Das System basiert auf einer strengen Grundgeometrie, die sowohl die Größe als auch die Lage der Elemente im Raum festlegt. Die Konstruktion

²² Konrad Wachsmann, Zur Industrialisierung des Bauens, Vortragsmanuskript, Technische Hochschule Stuttgart 28.6.1956, Konrad-Wachsmann-Archiv, Akademie der Künste Berlin, zitiert nach: Georg Vrachliotis, Geregelte Verhältnisse (Wien: Ambra Verlag, 2011), 87.

²³ Dietmar Strauch and Bärbel Högner, Konrad Wachsmann: Stationen eines Architekten (Berlin: Progris, 2013).

²⁴ Staib, Dörrhöfer, and Rosenthal, Elemente + Systeme: Modulares Bauen: Entwurf, Konstruktion, Neue Technologien. 27f.

²⁵ Konrad Wachsmann, Wendepunkt im Bauen (Wiesbaden: Krausskopf, 1959), 140f.

besteht aus Holztafel-Elementen als konstruktiver Einheit für Wand, Decke und Boden. Die Systemintegration ist geschlossen. Wachsmann definiert ein dreidimensionales Bandraaster, aus dem sich die Maße und Geometrie der Knoten und Anschlüsse ergeben, die sich bei allen Paneelen wiederholen. So basieren alle Elemente auf dem gleichen Grundprofil, auch wenn sich die Maße der einzelnen Elemente unterscheiden sollen, um größere Flexibilität in der Planung zu erhalten. Die Bauelemente bestehen aus Holzrahmen mit Fenstern, Türen und elektrischen Installationen, die ebenfalls in die Paneele eingebaut werden. Die einzelnen Rahmen haben tragende Funktion, sodass keine weiteren Tragelemente (Stützen, Unterzüge) erforderlich sind. Gleichzeitig erhöhen sich die Anforderungen an die Paneele, weil diese unterschiedliche Lasten tragen und die Kräfte auf die angrenzenden Bauteile übertragen müssen. Wachsmann und Gropius führten auch hier eine Reihe von unterschiedlichen Profilen und Ausführungen der Paneele ein, sodass schließlich nur die Lage und Geometrie der Anschlusspunkte fixiert wurden. Die Grundgeometrie muss in bestimmten Abständen gebrochen werden, um die notwendigen Toleranzen aufnehmen zu können, die mit Toleranzfugen kompensiert werden.²⁶

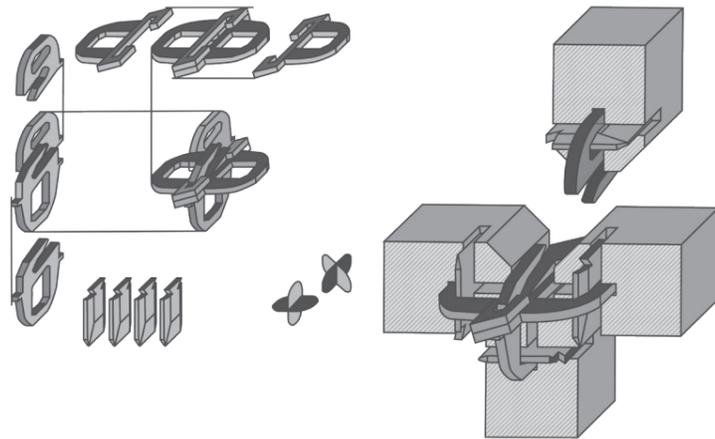
Das Herzstück des Bausystems ist der Verbindungsknoten, den Wachsmann „hakenartigen Metallverschluss“ nennt.²⁷ Dieser wird in der Axonometrie isoliert und in Verbindung mit den Holzprofilen dargestellt. Diese punktförmigen Verbinder werden dreimal entlang der langen Achsen und je einmal an den kurzen Achsen in die Holzprofile eingelassen. Bei der Montage kann das angrenzende Paneel von oben eingehakt und durch die Verschränkung gesichert werden. Das Verbindungsstück besteht aus vier Stahlteilen und ermöglicht die Montage der Holzpaneele in vertikaler und horizontaler Richtung. Die Komplexität der Knoten wird dadurch erhöht, dass die Bauteile nicht nur zweidimensional gefügt werden müssen, sondern meist auch in der orthogonal dazu stehenden Ebene. Dies führt auch dazu, dass die Randprofile im 45-Grad Winkel angeschrägt werden müssen und gemäß der Lage in der Ebene mit einer zusätzlichen Nut ausgestattet sind, die darüber hinaus die Luftdichtheit der Fuge erhöht. Auf der Baustelle werden sie mittels eines eigens für das System konstruierten Verbindungselementes miteinander verbunden. Für den Innenausbau entwickelt Wachsmann ein Trennwandsystem, das ohne mechanische Verbindungen funktioniert.²⁸ Auch vorgefertigte Installationswände werden erstellt, die die Leitungen und Unterputz-Installationen enthalten. Das System integriert alle Anschlüsse, Oberflächen und Installationen, sodass die Häuser nach der Errichtung der Fundamente aus Mauerwerk innerhalb von ein bis zwei Tagen von fünf ungelernten Kräften

²⁶ Konrad Wachsmann, Wendepunkt im Bauen (Wiesbaden: Krausskopf, 1959), 142f.

²⁷ Konrad Wachsmann, Wendepunkt im Bauen (Wiesbaden: Krausskopf, 1959), 142f.

²⁸ „General Panel System,“ accessed August 19, 2019, http://www.axxio.net/waxman/content/General_Panel/General-Panel.htm.

Graphik 7:
Zeichnung nach ‚General Panel System‘, Konrad Wachsmann: Axonometrie des Verbindungsstücks (endgültige Fassung), 1946-1947. Bildquelle: Konrad Wachsmann, ‚Wendepunkt im Bauen‘, Krausskopf, Wiesbaden, 1959, mit freundlicher Genehmigung von Ray Wachsmann. Zeichnung DGJ Architektur 2020.



montiert werden können. Aufgrund der kleinen Dimensionen und Gewichte der Elemente kann weitgehend auf Hebeegeräte verzichtet werden.

Das System wird in seinen Maßen, den Anschlüssen und der Geometrie integral aus der Überlagerung der Möglichkeiten der Fertigung am Fließband, den Gewichten und Dimensionen für Transport und Montage, den Eigenschaften und der Tragfähigkeit des Materials sowie anhand der üblichen Anforderungen an die Größe und Möblierung der Zimmer entwickelt. Wachsmann hat nicht nur die Baukonstruktion sorgfältig analysiert und optimiert, sondern eine komplette Fertigung der Paneele und anderer Bauteile in großer Stückzahl geplant. So werden neben dem System selbst auch die Maschinen und die Logistik für die Fertigung und den Transport der komplexen Teile und Profile entwickelt.²⁹ Insgesamt werden drei Jahre in den Aufbau der Produktion investiert, sodass die Anlage 1947 zu produzieren beginnt. Die Literatur geht von 150 bis 200 Umsetzungen des Systems aus³⁰ bis die Firma ‚General Panel Corporation‘ 1950 aufgelöst wird.

Bahnbrechend ist der integrale Ansatz Wachsmanns und Gropius, der den Herstellungs- und Bauprozess als ein einziges System betrachtet und konsequent durchentwickelt. Für den ausbleibenden Erfolg des Systems auf dem Markt lassen sich verschiedene Gründe benennen: Der hohe Anspruch an die vielfältige Einsetzbarkeit der Profile führte zu einer hohen Komplexität der Bauteile, vor allem der Profile und Knotenpunkte. Die Herstellung in der weitgehend automatisierten Fertigung erforderte manuelle Arbeit. Sowohl die Herstellung der Profile und Knoten, der Zuschnitt der Platten, die Befestigung der Werkstoffplatten auf den Profilen als auch das Wenden der Profile wurden maschinell ausgeführt. Jedoch war die Entwicklungszeit des Systems

²⁹ Wachsmann, ‚Wendepunkt im Bauen‘. 148ff.

³⁰ Staib, Dörrhöfer, and Rosenthal, ‚Elemente + Systeme: Modulares Bauen: Entwurf, Konstruktion, Neue Technologien‘. 28.

mit mehreren Jahren so lang, dass dies in Verbindung mit der Größe der Fabrik und der Entwicklung und dem Bau der Maschinen auf hohe Investitionskosten schließen lässt. Im Vergleich zu den verbreiteten Bauweisen ‚Balloon frame‘ und ‚Plattform‘ war das ‚General Panel System‘ daher vergleichsweise teurer und konnte sich daher trotz der geringen Montagezeit der Gebäude nicht durchsetzen.³¹ Die ökonomischen Vorteile der automatisierten Großserie ließen sich bei kleinen Stückzahlen nicht realisieren, auch weil die Lohnkosten für den konventionellen Holzbau in Amerika gering waren. So wurden auf den Baustellen überwiegend ungelernete Kräfte eingesetzt. Das Handwerk war zudem weder durch Zünfte noch Handwerksinnungen reguliert.

Konrad Wachsmann arbeitete nach der Auflösung der ‚General Panel Corporation‘ nicht weiter an Wohnungsbau-Systemen. Vielmehr konzentrierte er seine Arbeit auf die Entwicklung von weitgespannten Tragwerken und Hallen. 1944-45 arbeitete er an kleineren Hallen (‚Mobilair Structure‘) für die ‚Atlas Aircraft Corporation‘. 1951 erhielt er von der ‚U.S. Air Force‘ den Auftrag zur Entwicklung eines Bausystems für große Flugzeughangars.

Ab 1949 unterrichtete und forschte Wachsmann am ‚Institute of Design‘ in Chicago und leitete ab 1956 die Architekturklasse der Internationalen Sommerakademie für Bildende Kunst in Salzburg. In diesem Rahmen entstehen in Zusammenarbeit mit Studierenden und international bekannten ArchitektInnen eine Reihe von Studien zu elementierten Bausystemen, die in Teilen dem ‚General Panel System‘ ähneln. Die Randprofile werden hier jedoch aus gekanteten Blechen und die Füllung aus Papp-Waben-Platten konstruiert. 1958 erarbeitete Wachsmann in Salzburg eine Art Gerüstkonstruktion, die sich mit leichten Wandpaneelen füllen lässt. Sie vereint damit die beiden konstruktiven Ansätze Wachsmanns: leichte, modulare Stab-Tragwerke und elementierte Bauplatten.

³¹ Staib, Dörrhöfer, and Rosenthal.

4.2. STATUS QUO: AKTUELLE BAUSYSTEME FÜR WOHNUNGSBAU

Im Folgenden werden einige repräsentative, aktuell am Markt verfügbare Bausysteme vorgestellt, die sich in ihrer Materialität und/oder der Flexibilität mit dem hier entwickelten System vergleichen lassen und die gesamtheitlich oder in Teilaspekten hinsichtlich der zentralen Fragestellungen der hier vorliegenden Forschung besondere Relevanz aufweisen. Die einzelnen Systeme haben je unterschiedliche Vor- und Nachteile, aus denen sich Rückschlüsse auf das eigene System ziehen lassen.

Bei den Systemen, die einen niedrigen Integrationsgrad aufweisen, also solche, die nur einen kleinen Teil der Baukonstruktion und Gebäudetechnik abdecken, ergibt sich eine höhere Varianz zwischen den einzelnen Projekten beziehungsweise Anwendungsfällen, da ein größerer Teil der Gebäude eine individuelle Anpassung erfährt. In der Betrachtung und Analyse werden jeweils einzelne Anwendungsfälle beschrieben, die einen repräsentativen Charakter haben und/oder einen hinsichtlich der Forschungsfragen eine besonders günstige Umsetzung darstellen.

Holzrahmenbau

Systembeschreibung

Der Holzrahmen- bzw. Holztafelbau ist die im Holzbau am weitesten verbreitete Konstruktionsweise und ist sowohl für kleine Unternehmen als auch große Produzenten mit standardisierten Lösungen umsetzbar. Da sich die konstruktiven Prinzipien dabei kaum unterscheiden, wird an dieser Stelle kein einzelner Systemanbieter herausgegriffen. Vielmehr lässt sich der Holztafelbau als universelles und offenes System betrachten, das auf diverse Bauaufgaben und projektspezifische Gegebenheiten zugeschnitten werden kann.

Das Prinzip des Tafelbaus basiert auf der Ständerbauweise, bei der zunächst ein Gerüst aus tragenden Ständern errichtet und im weiteren Ausbau verkleidet und gedämmt wird, wie im Beispiel in Abbildung 2 zu sehen. Im Tafelbau mit einzelnen, selbsttragenden Elementen gearbeitet, die bereits als vorgefertigte Einheiten verbaut werden können. Die innere Tragstruktur der Elemente aus Rähm, Ständern und Schwelle wird mit einer Holzbeplankung verkleidet, wodurch eine schub- und biegesteife Wandscheibe ausgebildet werden kann. In der Ständerlage wird in der Regel eine formschlüssige, hohlraumfreie Dämmung eingebracht. In der Konstruktion lassen sich flexibel weitere Schichtaufbauten oder Öffnungen vorsehen.

Die Systemlösungen des Holztafelbaus sind auf ein hohes Maß der Vorfertigung ausgelegt. Alle Elemente lassen sich weitestgehend werkseitig herstellen. Dabei ist auch der Einsatz computergesteuerter Abbundtechnologien und robotischer Fertigung mittlerweile weit verbreitet. Zuschnitt und Fügung der einzelnen Komponenten können so mit hoher Maßgenauigkeit ausge-

führt werden.

Einsatzbereich

Tafelkonstruktionen kommen als Primärkonstruktion in der Regel bei bis zu dreigeschossigen Gebäuden zum Einsatz, da für höhere statische Anforderungen (vertikaler Lastabtrag und Scheibenwirkung zur Aussteifung) zusätzliche Maßnahmen zur Verstärkung der Tragstruktur erforderlich sind. In Verbindung mit anderen Tragsystemen werden Tafelkonstruktionen häufig für Außenwandkonstruktionen eingesetzt, da sich Tragkonstruktion und Wärmedämmung in einer Ebene unterbringen lassen.³²

Relevanz für die Systementwicklung

Im vorliegenden Bausystem werden die Prinzipien des Tafelbaus im Ausbau der Skelettstruktur für Fassaden und Innenwände übernommen. Zudem soll auf die vorhandenen und im Tafelbau bewährten Methoden zur Vorfertigung und zum Abbund der Konstruktionselemente zurückgegriffen werden, um eine möglichst hohe Vorfertigung zu erreichen.



Abbildung 2:
Holzrahmenbau; Quelle:
PK-Media Consulting GmbH.

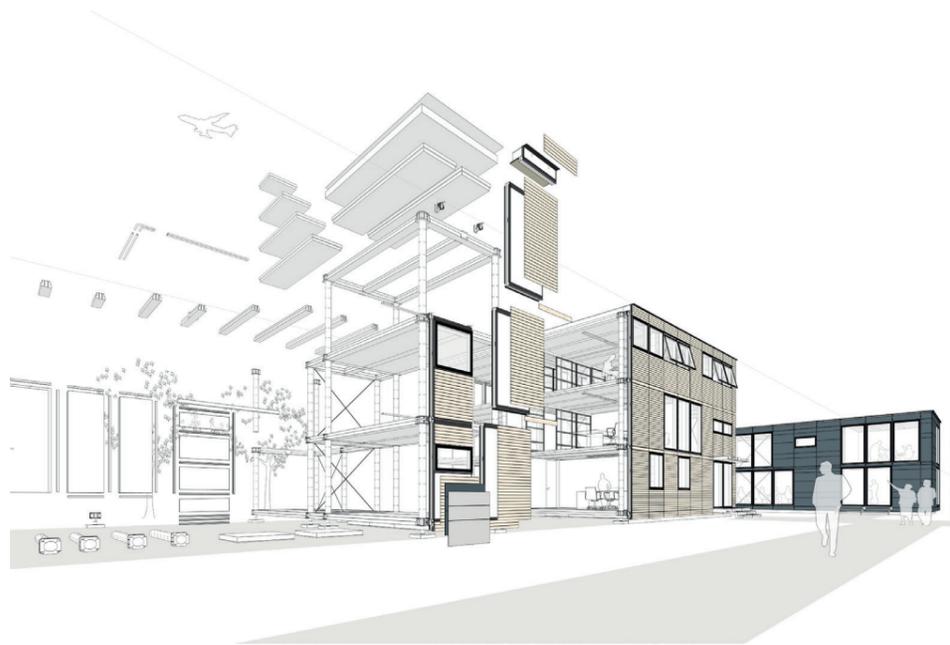
32 Kaufmann, H. et al.: Atlas mehrgeschossiger Holzbau, München 2017: Detail Business Information GmbH

Lukas Lang Building Technologies

Systembeschreibung

Das österreichische Unternehmen LUKAS LANG BUILDING TECHNOLOGIES GmbH produziert ein Holzbausystem, das der Architekt Lukas Lang 1995 entwickelt hat. Es handelt sich dabei um ein Baukastensystem in Holzskelettkonstruktion mit kraftschlüssigen Stahlknoten und -verbindungen. Das System basiert auf einem standardisierten Rastermaßes von 1,40 m. Die Deckenplatten werden auf deckengleiche Unterzüge gelegt, die durch spezielle Metallverbindungen an den Stützen befestigt werden. Die Fassade besteht aus raumhohen Elementen, die vor das Skeletttragwerk gehängt werden.³³

Graphik 8:
Visualisierung des Bausystems,
Lukas Lang Building
Technologies GmbH.



Das geschlossene System wird schlüsselfertig ausgeführt und ist komplett mit allen Subsystemen des Ausbaus und der Gebäudetechnik durchgeplant. Es basiert auf einem standardisierten Katalog kombinierbarer Elemente und Komponenten, die weitestgehend einzeln vorgefertigt werden und im Baukastenprinzip vor Ort montiert werden. Für die praktische Umsetzung des Systems wurde auch eine hausinterne Planungssoftware entwickelt.

Die Konstruktion mit geschraubten Verbindungen an den metallischen Knotenpunkten, wie in Abbildung 3 gezeigt, ist nahezu vollständig rückbaubar. Zudem ermöglicht die Trennung von tragenden und raumbildenden

³³ Quelle: Lukas Lang Building Technologies GmbH: Individuell auf allen Ebenen, [online] <https://www.lukaslang.com/de/technologie/individuelle-architektur/> [10.12.2018]

Bauteilen, dass die Module von Ausbau und Fassade in der Skelettkonstruktion leicht austauschbar sind. Abbildung 4 zeigt die Montage von solchen Fassadenmodulen. Diese Modularisierung des Bausystems ermöglicht wiederum eine Wiederverwendung von Bauteilen in neuen Gebäuden.

Einsatzbereich

Das Bausystem Lukas Lang zielt auf unterschiedliche Einsatzgebiete ab. Es kann sowohl im Wohnungsbau für Einfamilienhäuser als auch im großen Maßstab für mehrgeschossige Wohnhäuser angewandt werden. Gleichzeitig sind auch gewerbliche Nutzungen, Bürogebäude und insbesondere temporäre Bauten umsetzbar.

Relevanz für die Systementwicklung

Besonders hinsichtlich der konstruktiven Flexibilität und der Rückbaubarkeit besitzt das Bausystem Lukas Lang Qualitäten, die auch im entwickelten Bausystem im Fokus stehen. Beispielhaft ist auch die Katalogisierung der Bauteile und Verbindungen – und damit einhergehend einen möglichst hohen Vorfertigungsgrad.

Auf eine vergleichbar strikte Standardisierung der Dimensionen und Bauteilaufbauten für Ausbau und Fassade wird im vorliegenden Ansatz allerdings verzichtet, um auf projektspezifische Parameter und Anforderungen gezielter reagieren zu können.



Abbildung 3:
Links: Ausbildung der
Tragwerksknoten, Lukas Lang
Building Technologies GmbH

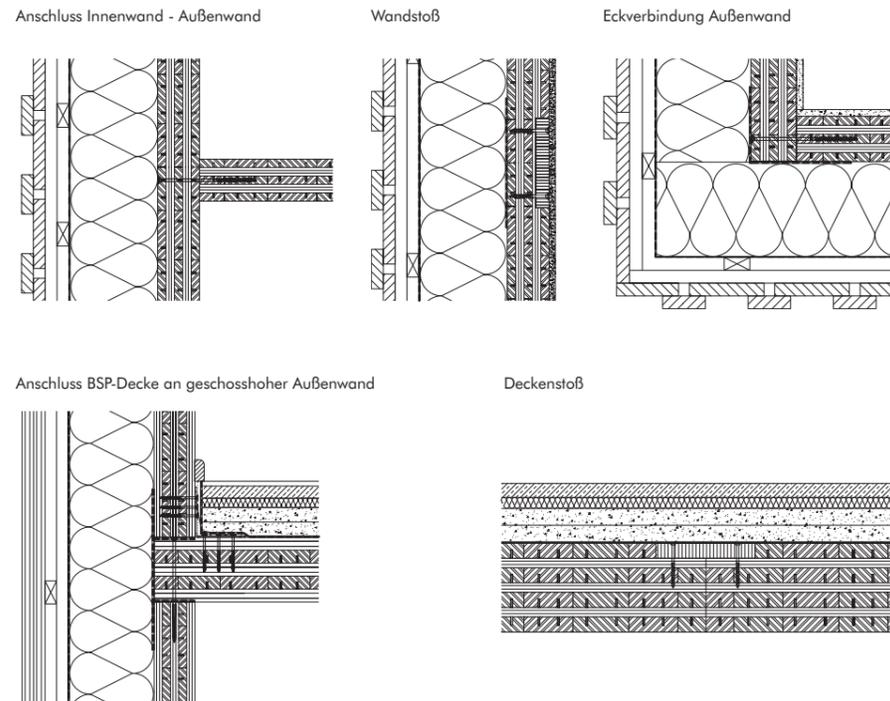
Abbildung 4:
Rechts: Lukas Lang Building
Technologies GmbH;
Montage Fassade.

Züblin Leno

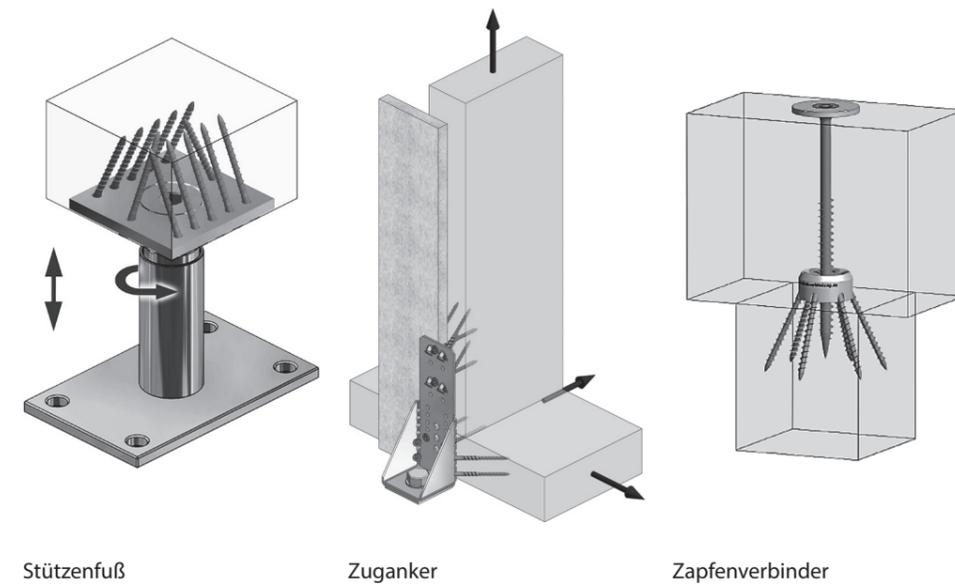
Systembeschreibung

Die Firma Züblin Timber bietet, basierend auf ihrem Produkt Leno-Brettsperrholz, ein Konstruktionssystem an, das PlanerInnen vielseitig und projektspezifisch anwenden können. Es handelt sich um ein offenes System, das zum einen bei jedem Projekt unterschiedlich eingesetzt und detailliert werden kann. Zum anderen lassen sich auch andere Komponenten und Bauweisen (Stahlteile, Holzstützen, Brettschichtholz/Leimbinder, Holz-Beton-Decken) integrieren, die regelmäßig in den Konstruktionen zum Einsatz kommen. Vor allem aber wird jedes Projekt individuell geplant und gefertigt, weswegen sowohl der Wiederholungseffekt als auch die Automatisierung der Fertigung gering sind. Auf Grundlage geprüfter Materialien und Fügungsdetails sind typische Bauteilaufbauten und Anschlüsse in einem Katalog aufgeführt, wie die Graphik 9 in Ausschnitten beispielhaft zeigt, und können in die Planungen übernommen werden. Züblin unterstützt als Hersteller dabei auch die Ausführungs- und Werkstattplanung hinsichtlich einer Optimierung der Produktionsprozesse.

Graphik 9:
Auszug von
Beispielkonstruktionen aus
dem Detailkatalog, Züblin
Timber GmbH
LENO@Brettsperrholz, Ed.
Züblin AG, ZÜBLIN Timber
GmbH, https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/ZUEBLIN_Timber_LENO_Brettsperrholz_2018_DE.pdf.



Das Leno-Brettsperrholz wird in großformatigen, meist geschosshohen Scheiben mit Abmessungen von bis zu 4,80m x 14,80m (gegebenenfalls auch 19,80m) und Stärken von 70 - 310mm produziert. Aus diesen werden bereits im Abbund alle geplanten Öffnungen ausgeschnitten. Diese Rohbauteile werden zu montagefertigen Elementen, anwendungsweise auch als Raummodule, zusammengefügt und können sowohl für Wände als auch Decken eingesetzt werden. Die Verbindungen werden durch in die Elemente eingelassene Vollgewindeschrauben hergestellt, wie die Graphiken 10/11 zeigen.



Graphik 10:
MERK-Verbindungstechnik:
Befestigungssystem mit
Vollgewindeschrauben
MERK Verbindungstechnik
und Werkzeug, Ed. Züblin
AG, ZÜBLIN Timber GmbH,
https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/Z%C3%BCblin%20Timber_MERK_Verbindungstechnik_2016.pdf.

Graphik 11:
MERK-Verbindungstechnik:
Befestigungssystem mit
Vollgewindeschrauben
MERK Verbindungstechnik
und Werkzeug, Ed. Züblin
AG, ZÜBLIN Timber GmbH,
https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/Z%C3%BCblin%20Timber_MERK_Verbindungstechnik_2016.pdf.

Der Grad der Vorfertigung variiert von Projekt zu Projekt. Es besteht die Möglichkeit, Wandelemente komplett mit Fenstern, Außenfassade und Innenverkleidung vorzufertigen und auf der Baustelle zu montieren. 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 für Transport und Einbau zu halten. Abbildung 5 und die detaillierte Graphik 12 zeigen den Aufbau und die Konstruktion eines typischen „Wandelements 4.0“ aus der Fertigungsreihe von Züblin Timber.

Rückbaubarkeit und Flexibilität sind aufgrund der massiven Bauweise mit innenliegenden und somit nicht lösbaren Verbindungsmitteln stärker einge-

schränkt. Ein zerstörungsfreier Um- oder Rückbau ist kaum möglich. In der Planung bestehen allerdings größere Freiheiten, da keine Einschränkungen durch Konstruktionsraster vorgegeben werden. Die Bauteildimensionen sind lediglich durch die Produktions- und Transportmaße vorgegeben.

Einsatzbereich

Der Einsatz der BSP-Elemente ist grundsätzlich in allen Bauaufgaben denkbar. Mit den Systemlösungen sind vor allem Einfamilienhäuser und auch mehrgeschossige Wohngebäude zu großen Teilen aus den BSP-Scheiben umsetzbar. Sie eignen sich auch zur Kombination mit anderen Bauweisen, beispielsweise bei Erweiterungen und Aufstockungen. Abgesehen von Wohnnutzungen sind Hotel- und Bürobauten weitere Anwendungsfelder.

Relevanz für die Systementwicklung

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 im in diesem Vorhaben definierten Sinne zu verstehen. Es handelt sich eher um eine Optimierung von Prozessen im Bezug auf sich wiederholende 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. Wenn überhaupt, dann konnten sich wiederkehrende Standards bisher eher in Nischenmärkten (zum Beispiel Modulbauten für temporäre Nutzungen oder Einfamilien-Fertighäuser) etablieren.

Für die vorliegende Entwicklung ist das Züblin Timber-Modell insofern relevant, als dass das hier vorliegende Bausystem ebenfalls als Vorgabe für die Planung verstanden wird. Für die Umsetzung eines Gebäudes mit dem Bausystem sind keine spezifische Produktion oder die Herstellung bestimmter Bauteile in großer Zahl erforderlich. Die Ausführung kann von jedem größeren Zimmereibetrieb problemlos umgesetzt werden. Eine solche niedrigschwellige Implementierung ohne Anfangsinvestitionen ist der schnellen Implementierung des Systems zuträglich.

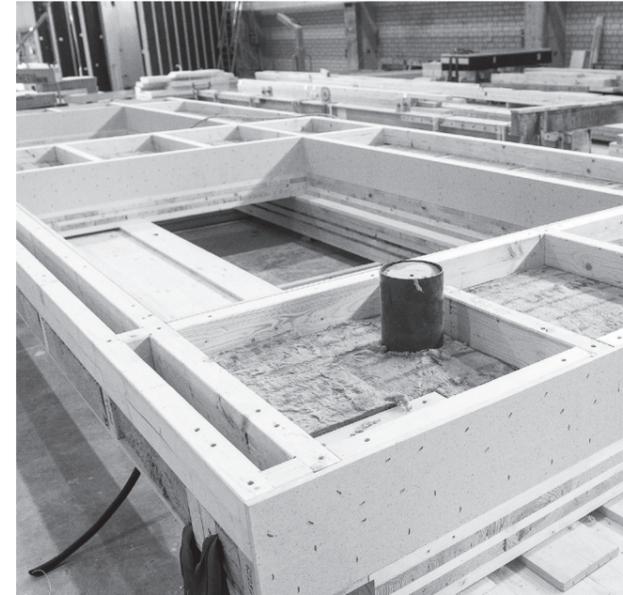
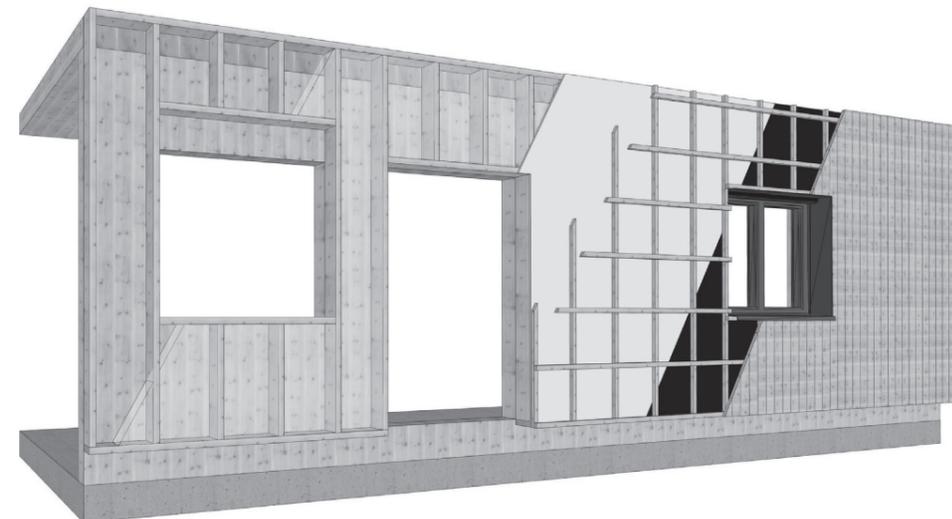


Abbildung 5:
Das Wandelement 4.0 –
LENO®, Ed. Züblin AG,
ZÜBLIN Timber GmbH,
https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/ZUEBLIN_Timber_LENO_ADD_DE.pdf.



Graphik 12:
Das Wandelement 4.0 –
LENO®, Ed. Züblin AG,
ZÜBLIN Timber GmbH,
https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/ZUEBLIN_Timber_LENO_ADD_DE.pdf.

Kaufmann Bausysteme

Systembeschreibung

Kaufmann Bausysteme steht stellvertretend für verschiedene Hersteller und Systeme, die Raummodule in Holzbauweise anbieten. Kaufmann verfolgt dabei verstärkt den Ansatz einer seriellen und standardisierten Produktion eines weitestgehend geschlossenen Modulbausystems. Die Raummodule aus Brettsperrholz werden in einer Produktionsstraße hergestellt, an der alle Gewerke beteiligt sind. So entstehen (abhängig von KundInnenwunsch) in sich komplett vorgefertigte Einheiten, in denen Installationen und Möblierung bereits integriert sind. Die Montage vor Ort, wie in den Abbildungen 7 exemplarisch dargestellt, beschränkt sich damit auf das versetzen und Verbinden der Module, die Herstellung der Leitungsanschlüsse und abschließende Arbeiten an Ausbau und Gebäudehülle.

Ein weiterer zentraler Ansatz ist die bedarfsorientierte Integration von Planung und Produktion. Kaufmann Bausysteme übernimmt für alle Projekte die Werkstattplanung und optimiert die Fertigungsprozesse schon zu einem frühen Zeitpunkt in der Planung.

Bei Modulbauten wird meist auf einen Rückbau und die Wiederverwendung der Raumzellen als Einheit abgezielt. Die Raummodule lassen sich vergleichsweise leicht trennen und demontieren. Häufig werden bei temporären Gebäuden auch speziell lösbare Verbindungen (Spannschlösser o.ä.) eingesetzt, um einen Rückbau zu vereinfachen. Innerhalb der Raummodule werden keine sichtbaren und rückbaubaren Verbindungen eingesetzt. Weil die Module in sich besonders verwindungssteif sein müssen, wird aber auch eine Vielzahl von Verbindungen eingesetzt, die die Demontage erschweren.

Die Flexibilität der Modulbauten ist einerseits durch die Größe bestimmt, die in erster Linie von möglichen Transportmaßen definiert wird. Andererseits ist ihre Unterteilung ein definierender Faktor. 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 zur Anpassung von Grundrissen zwischen den Räumen meist gering.

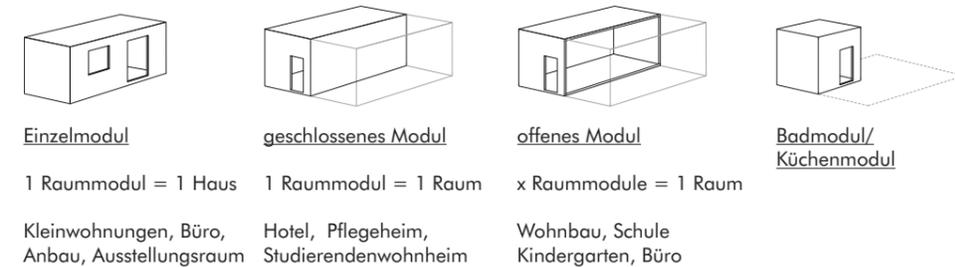
Einsatzbereich

Kaufmann Bausysteme setzt die Raummodule (s. Graphik 13) bisher in erster Linie in Projekten mit hohen Stückzahlen gleicher Module ein. Zu realisierten Projekten gehören unter anderem mehrere Hotels und Studierendenwohnheime.

Allerdings zeigen sich anhand einiger Projekte für Schulgebäude und Kindertagesstätte, die Kaufmann umgesetzt hat, weitere, vielfältige Einsatzmöglichkeiten für vorgefertigte Raummodule. Insbesondere eignet sich die Modulbauweise auch für den mehrgeschossigen Wohnungsbau.

Relevanz für die Systementwicklung

In Hinblick auf den Integrationsgrad ist die Modulbauweise bei Kaufmann Bausysteme vergleichbar mit dem Anspruch von Lukas Lang Building Technologies: Auch hier sollen alle Teile und Subsysteme aus einer Hand gefertigt und geliefert werden. Die serielle Produktion mit anpassbaren Fertigungsprozessen (s. Abbildung 6) stellt einen Ansatz dar, der sich auch auf das hier entwickelte Bausystem übertragen lässt. Im Aufbau gleiche Konstruktionen und Bauteile lassen sich in unterschiedlichen Dimensionen bedarfsorientiert vorfertigen. Vor allem der hohe Integrationsgrad der Planung und der Produktion ist diesbezüglich erstrebenswert. Mit einem vergleichbaren Grad der systematischen Integration lassen sich die Marktchancen des Systems deutlich verbessern.



Graphik 13:
Modultypen und
Anwendungen
Renate Breuß; Zuschnitt
67: Raumstapel;
Herausgeber: proHolz
Austria; Arbeitsgemeinschaft
der österreichischen
Holzwirtschaft zur Förderung
der Anwendung von Holz;
Obmann Christoph Kulterer;
Bauen mit Raummodulen - Ein
Überblick; September 2017,
Seite 5f.

Abbildung 6:
Links: Fertigung der Module,
Quelle: Kaufmann
Bausysteme.

Abbildung 7:
Rechts: Montage der
Raummodule auf der
Baustelle, Quelle:
Kaufmann Bausysteme.

4.3. GRUNDLAGEN UND VORLEISTUNGEN FÜR DIE SYSTEMENTWICKLUNG

Das vorliegende Forschungs- und Entwicklungsprojekt greift auf bestehende Technologien, Regeln der Technik und Berechnungsmethoden zurück. Dies ist vor allem für eine angewandte Bauforschung wichtig, um mit dem Prototypen zeitnah ein alltagstaugliches Gebäude errichten zu können, das denselben rechtlichen und technischen Anforderungen genügt, denen auch andere Gebäude genügen müssen („anerkannte Regeln der Technik“). Ausgangspunkt des Bausystems sind unter anderem existierende Planungs- und Bemessungsmethoden (Eurocode 5 – Holzbau), dreidimensionale Bauplanung (CAD, CAM und BIM) sowie computergesteuerte und robotische Fertigungsmethoden (CNC- und CAM). Im Bundesland Baden-Württemberg sind seit 2015 Decken sowie tragende, aussteifende Wände und Stützen als hoch feuerhemmende Bauteile (F 60) oder als feuerbeständige Bauteile (F 90) aus brennbaren Baustoffen (z.B. Holz) ohne Brandschutzverkleidung zulässig (Abbrand). So sind in Baden-Württemberg auch über 7m hohe reine Holzbauten ohne zusätzlichen Brandschutzverkleidungen möglich. Bestandteil der hier verfolgten Forschung ist unter anderem die Prüfung, ob diese Ansätze auch auf andere Bundesländer zu übertragen wären. So sollen andere Bundesländer durch die positiven Beispiele ermutigt werden, den technischen Fortschritt im Holzbau zu ermöglichen.

Holz-Holz-Verbindungen

Auch für die einzusetzenden Holz-Holzverbindungen gibt es zahlreiche Anknüpfungspunkte. Geschichtlich gibt es in Europa und Asien eine große Fülle an traditionellen Zimmermannsverbindungen, die teilweise sehr leistungsfähig sind, wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt. Ein Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist ein Studium dieser traditionellen Technologien im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit und Übertragbarkeit in zeitgenössische Systeme.

Auch heutzutage gibt es Beispiele für geometrische Holzverbindungen und entsprechende Hilfsmittel in der Produktion. So bieten verschiedene Hersteller Spezialwerkzeuge an, um einzelne Holz-Holz-Verbindungen rationell, aber handwerklich, herzustellen. Für diese Anschlüsse gibt es auch Berechnungsmodelle und statische Nachweise. Somit stellen sie einen wichtigen Ausgangspunkt für die vorliegende Forschungs- und Entwicklungsarbeit dar (s. exemplarisch Abbildung 8 und 9 der „Lignatools“).

Ziel muss es jedoch sein, die Herstellung der Anschlüsse nicht mehr handwerklich vorzunehmen, sondern eingebunden in eine durchgängig computer-gesteuerte Planung und Herstellung. So sind die Anschluss-Details schon bei einer handwerklichen Fertigung wettbewerbsfähig. Im zeitgenössischen

Holzbau durchlaufen fast alle Bau-Elemente ohnehin eine maschinelle Abbundanlage, um die Elemente zuzuschneiden.

In diesem Verarbeitungsschritt könnten auf einer entsprechenden Anlage (5-Achs-CNC Abbundanlage) auch die geometrischen Anschlüsse hergestellt werden, wie beispielhaft Abbildung 10 einer digital gesteuerten Abbundanlage zeigt. Damit würde der Aufwand für den Abbund nur geringfügig steigen. Gleichzeitig wird die Montage auf der Baustelle durch die erhöhte Präzision der Bauteile aber erheblich vereinfacht und beschleunigt. So müssten keine metallischen Verbinder mehr eingebracht werden. Die Materialkosten werden erheblich gesenkt und die Montage vor Ort beschleunigt.



Abbildung 8:
Quelle: Lignatools
Lignatool e.U., AU-Kufstein,
schwalbenschwanz.html.

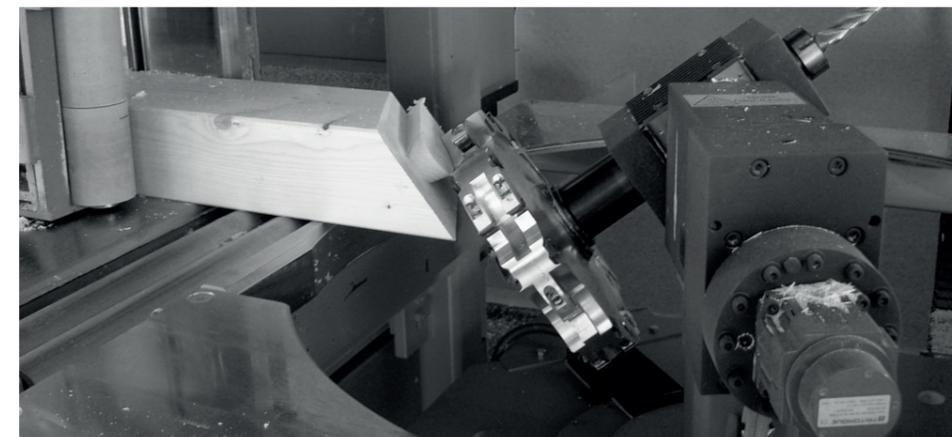


Abbildung 10:
Abbundanlage, Bildquelle:
Hans Hundegger AG,
Kemptener Straße 1,
D-87749 Hawangen;
Abbundmaschinen K2i
und ROBOT-Drive, [https://
www.hundegger.de/de/
maschinenbau/produkte.html](https://www.hundegger.de/de/maschinenbau/produkte.html).

„Timber Prototype I“, Münster, 2012 - 2014

- Münster School of Architecture der Fachhochschule Münster, V.-Prof. Hans Drexler
- Industriepartner: Terhalle Holzbau

Der Ansatz für rückbaubare Holz-Konstruktion wurde in Münster in einem studentischen Selbst-Bau-Projekt entwickelt, das eine Weiter-Entwicklung des traditionellen Blockbaus darstellt. Ziel dieses Prototypen-Gebäudes war es, eine hoch-wärmedämmende Massivholz-Konstruktion zu entwickeln, die zerstörungsfrei rückgebaut werden kann und sortenrein zu trennen ist. Der Entwurf für den Prototypen war das Ergebnis eines Wettbewerbs unter Studierenden, die das Gebäude später auch geplant und gebaut haben. Das Projekt hatte außerdem zum Ziel, die atmosphärischen Qualitäten der sichtbaren Massivholz-Konstruktion zu erschließen.

Auch in diesem Projekt wurde eine innovative Holz-Konstruktion entwickelt, um die Anforderungen des zeitgenössischen Bauens mit modifizierten Massivholz zu erfüllen. Im Falle des „Timber Prototype I“ stand die Bauphysik und Wärmedämmung im Vordergrund.

Abbildung 11:
Timber Prototype I, Münster School of Architecture 2012-2013 und Terhalle Holzbau, V.-Prof. Hans Drexler und Studierende der MSA.
Foto: Hans Drexler.



„Timber Prototype House“, Apolda, IBA Thüringen, 2014 – 2018

- Jadehochschule Oldenburg, V.-Prof. Hans Drexler
- Universität Stuttgart, Prof. Achim Menges, Oliver Bucklin
- Partner: IBA Thüringen, Tobias Haag



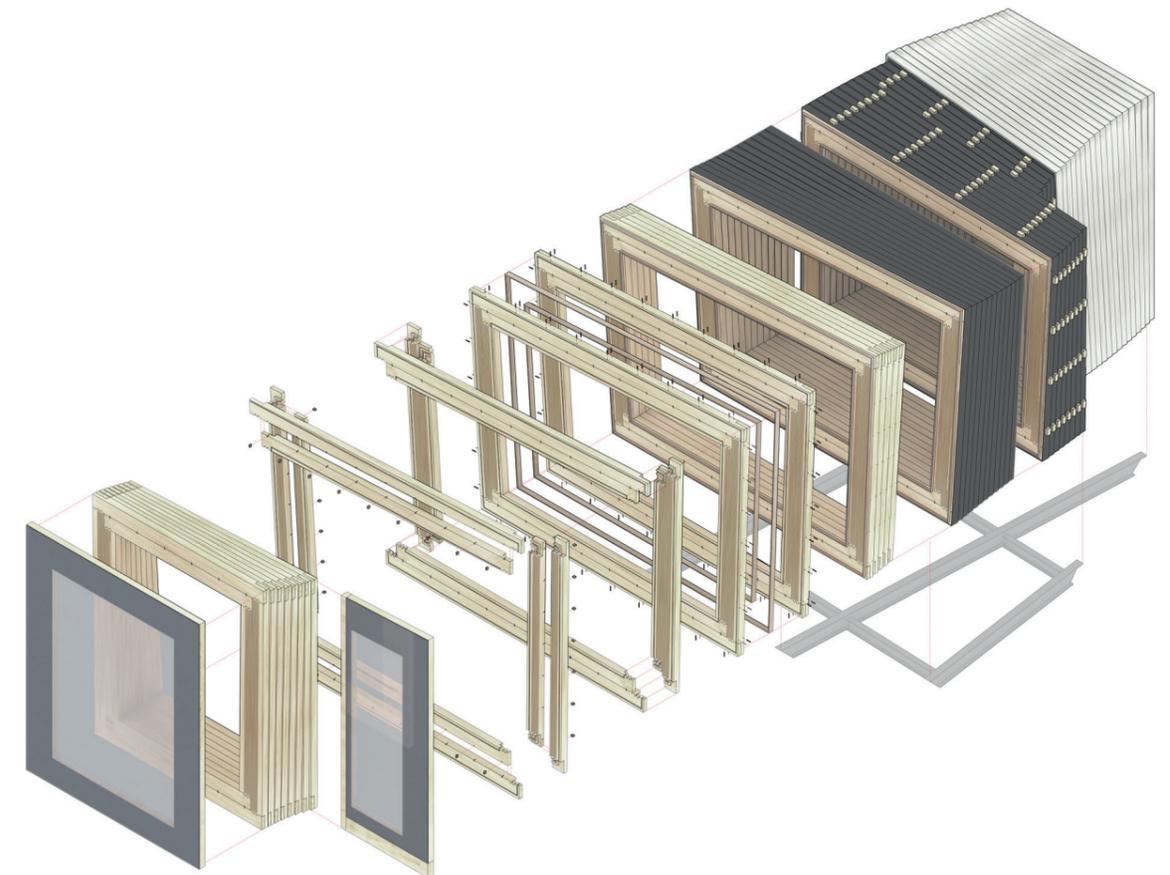
Abbildung 12:
Timber Prototype House,
IBA Thüringen,
Foto: Thomas Müller.

Gefördert durch die Forschungsinitiative »Zukunft Bau« des Bundes entstand in Zusammenarbeit des Teams um Prof. Achim Menges, Universität Stuttgart und Hans Drexler, Jade Hochschule Oldenburg sowie der IBA Thüringen ein Experimentalbau in Apolda. Das Potential des regionalen Baustoffs Holz sollte mit Hilfe modernster digitaler Planungswerkzeuge und Fertigungstechnologien aufgezeigt werden. Dabei wurde ebenfalls auf das Prinzip der traditionellen Blockbauweise zurückgegriffen - diese jedoch erheblich weiterentwickelt. Entstanden ist ein circa 15 Quadratmeter großer Versuchsbau aus vertikalen und in freier Form angeordneten Holzbalken. Durch die digitale Bearbeitung des Holzes konnten sowohl der Dämmwert verbessert als auch hochpräzise Füge- und Verbindungslösungen realisiert werden. Die grundlegende Funktionalität ist die eines gedrehten Blockhauses. Sie kombiniert die Vorteile traditioneller, kostengünstiger Blockbauweisen mit den Möglichkeiten digitaler Planungs- und Fertigungsverfahren. Im Gegensatz zur horizontalen Stapelung typischer Blockbauweisen sind hier Kantvollhölzer stehend aufgereiht. So stimmt die Ausrichtung der Wandbauteile mit der Haupttragrichtung des Holzes überein. Zugleich ermöglicht diese Bauweise

das Einbringen von Schlitzern ohne Beeinträchtigung der Tragfähigkeit. Die Schlitz dienen zugleich als Entlastungsschnitte, die ein Reißen des Vollholzes verhindern. So kann die Formstabilität und Dichtigkeit gewährleistet werden, was in herkömmlichen Blockbauweisen eine erhebliche Schwierigkeit darstellt. Gleichzeitig werden die Schlitzungen als Luftkammern genutzt, um die Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren und die Isolationswerte des Materials zu erhöhen. Die digitale Fertigung ermöglicht dabei die Ausbildung hochpräziser, luftdichter und sortenreiner Verbindungen der Holzelemente, ohne jegliche zusätzlichen Metallbauteile oder Klebstoffe. Das so entstandene, nachhaltige Mono-Material-Bausystem ist Tragwerk, Hülle und Dämmung in einem. Selbst für das Erreichen der strengen deutschen Energiesparstandards ist keine zusätzliche Isolierung erforderlich.

Das ‚Timber Prototype House‘ wurde der Öffentlichkeit im März 2019 zugänglich gemacht. Er war Teil der Internationalen Bauausstellung (IBA) Thüringen und konnte in diesem Rahmen vom 24. Mai bis 29. September 2019 vor dem Eiermannbau in Apolda besichtigt werden.

Abbildung 13:
Timber Prototype House,
IBA Thüringen, Verbindung
Rahmenecke,
Foto: Hans Drexler und
Studierende der JHS.



Graphik 14:
3D-Axometrie des
Timber Prototype House.

5.1. ANNAHMEN // DEFINITION DES UNTERSUCHUNGSRAUMS

Jede wissenschaftliche Studie und jeder architektonische Entwurf geht von bestimmten Annahmen und Voraussetzungen aus, muss aber auch die Grenzen definieren, innerhalb derer nach Lösungen gesucht wird. In diesem Abschnitt geht es darum, eben diese Grenzen der Forschung explizit zu machen und damit, gegebenenfalls für weiterführende Forschungsprojekte, zur Diskussion zu stellen. Es geht auch darum, die Voraussetzungen der eigenen Forschung selbstreflexiv zu spiegeln, um die wissenschaftliche Transparenz zu gewährleisten. Einige der denkbaren Varianten werden im Folgenden diskutiert. Zur Gewährleistung einer eindeutigen und fokussierten Analyse beschränkt sich die Studie auf einen klar abgegrenzten Untersuchungsgegenstand, um mögliche, verzerrende Einflüsse der Berücksichtigung einer zu umfangreichen Parametervielfalt zu eliminieren. Die Untersuchung wird wie folgt eingeschränkt:

- Das System wird im Hinblick auf eine Wohnnutzung untersucht.
- Das System wird aus Holz entwickelt.
- Es werden orthogonale Systeme untersucht.

Definition der Materialität // Holzbau als Schlüsseltechnologie des nachhaltigen Bauens

Wie weiter oben bereits erläutert, wird die Baukonstruktion als Faktor für die Nachhaltigkeit eines Gebäudes in der konventionellen Baupraxis 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 vor allem auf den Betrieb konzentriert. Baukonstruktion ist aber 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. Für die Konstruktion ergeben sich folgende ökologische Anforderungen:

- Erhöhung des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen (vor allem Holz).
- Rückbaufähigkeit und Wiederverwendbarkeit der Bauteile.

Holz ist als einheimischer, nachwachsender Rohstoff der zukunftsfähigste Baustoff, da es der einzige ist, der in großen Mengen für alle Bauaufgaben eingesetzt werden kann und nicht auf limitierten Ressourcen, wie

fossilen Energien, Sand oder Metall-Erzen, 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.³⁴ Holz belastet die Ressourcen und die Umwelt im Bezug auf Emissions- und Abfallaufkommen weniger als nicht-nachwachsende Baustoffe. Für die Herstellung und Verarbeitung ist deutlich weniger Primär-Energie erforderlich.³⁵ 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.

Churkina et al. (2020) schlagen vor, den absehbar anhaltend hohen Bedarf an neuen Gebäuden als eine anthropogene Kohlenstoff-Senke für das Erreichen der Klima-Ziele zu nutzen, die zu einer erheblichen Reduktion der baubedingten CO₂-Emissionen führen können.³⁶ Die AutorInnen legen dar, dass der alleinige Vergleich von konventionellen mineralischen Bauweisen (Stahl, Beton, Mauerwerk) mit Bauweisen, die auf nachwachsenden Rohstoffen wie Holz und Bambus basieren, nicht zu belastbaren Szenarien führt, sondern dass der Aufwand für diese Transformation zukünftiger Bautätigkeit auch mit anderen anthropogenen CO₂-Senken, wie etwa ‚Carbon capture and storage‘ (CCS), zusammen betrachtet werden muss.

In der systematischen Untersuchung „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus - 6 Ein- und Mehrfamiliengebäude“³⁷ für das Umweltbundesamt (UBA) hat das Ingenieurbüro EGS Plan insgesamt 400 Variantenkombinationen der Parameter Baukonstruktion (Material), energetischer Standard, Haustechnik und Energieträger berechnet. Ziel der Studie war es, zu untersuchen, welche der genannten Variantenkombinationen Gebäudekonzepte ergeben, die die Klimaziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 erreichen. Ein weitgehend klimaneutralen Gebäudebestand ist eines der erklärten Ziele. Das Ergebnis zeigt, dass die wenigstens Varianten überhaupt den Zielkorridor erreichen und die Varianten, die auf einer überwiegenden Holzkonstruktion basieren, deutlich im Vorteil im Hinblick auf die Erreichung der Klimaziele sind.

34 Hermann Kaufmann, Stefan Krötsch, Stefan Winter, Atlas: Mehrgeschossiger Holzbau (München: DETAIL, 2017), 26f.

35 James Edward Gordon, Structures: Or Why Things Don't Fall Down (Cambridge: Da Capo Press, 2003).

36 Galina Churkina et al., „Buildings as a Global Carbon Sink,“ Nature Sustainability, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>.

37 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.

Verglichen mit konventionellen Holzbauten wird beim vorliegenden Bausystem eine deutliche Reduktion der Anteile von Stahlbauteilen und Verbindungsmitteln erreicht. 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 dabei verloren. Bei der Hybrid-Bauweise wird die Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Verwendung von Holz durch die hohen Emissionen der Sekundärstoffe (Beton, Stahl, Kunststoffe) in Teilen aufgehoben. Gerade die Produktion metallischer Verbindungsmittel macht einen großen Anteil an den Gesamtemissionen bei der Herstellung von Holzgebäuden aus. Im Hinblick auf eine sortenreine Trennung, Rückbaubarkeit und die Wiederverwendung von Bauteilen ist das Bausystem den konventionellen Massivbauweisen aus Mauerwerk und/oder Stahlbeton überlegen. Eine Extraktion von Verbundstoffen und anderen Fraktionen als Holz (Beton, Metall) ist so aufwendig, dass sie in der Praxis nicht stattfindet. Holzbauteile und reine Holz-Konstruktionen lassen sich dagegen sortenrein trennen und rezyklieren (Recycling, stoffliche Wiederverwendung, Verarbeitung zu Holzwerkstoffen).

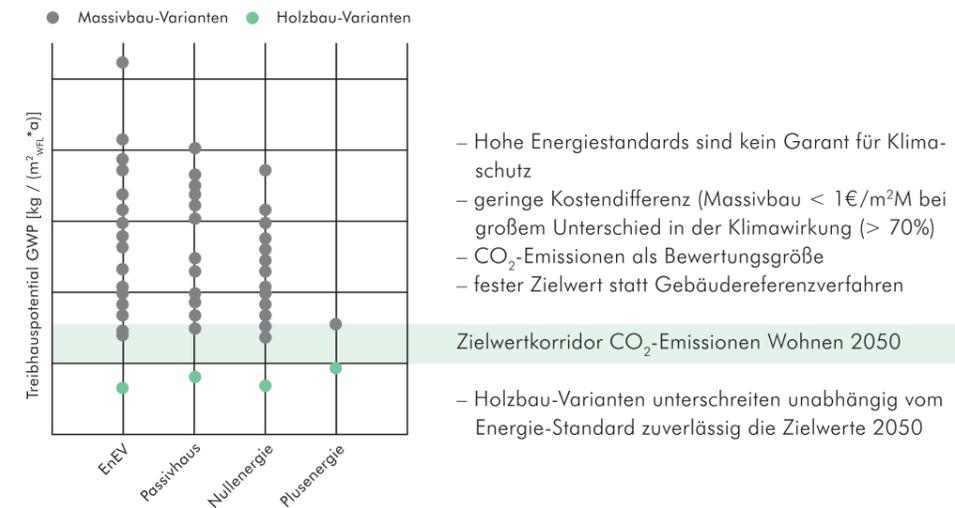
Für Skelettbauten eignet sich Holz in besonderer Weise: Holz hat von allen gängigen Baumaterialien das günstigste Verhältnis von Eigengewicht zu Tragfähigkeit. Deswegen lassen sich aus Holz besonders effiziente Tragsysteme konstruieren. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Wärmeleitfähigkeit mit der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

Bauphysikalisch sind metallische Verbindungsmittel beim Holzbau nachteilig, weil der erhöhte Wärmedurchgang zu Kondensat führen kann. Dies führt wiederum zu Bauschäden, gerade im Holzbau. In einer Nur-Holz-Konstruktion werden die Wärmebrücken vermieden. Die Planung wird darüber hinaus vereinfacht, weil die Betrachtung von Wärmebrücken und thermischen Schwachstellen entfällt.

Vorteile der Holzbauweise zusammengefasst:

- geringer Primär-Energieinhalt und geringe CO₂-Emissionen,
- nachwachsender Rohstoff,
- einfache Verarbeitung,
- geringes Gewicht, weswegen sich Holz besonders für Anpassungen im Betrieb eignet.

Gleichzeitig kann Holz als Baustoff aber auch bestimmte Nachteile aufweisen: Der Schallschutz kann im Holzbau problematisch werden. Dem Material fehlt in den meisten Fällen die notwendige Masse, um mit dem Primär-Baustoff einen ähnlich effektiven Schallschutz zu erzielen, wie er bei



Graphik 15:
Die Variantenstudie vergleicht CO₂-Emissionen und Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus 6 Ein- und Mehrfamiliengebäude Neubau und Sanierung 400 Variantenkombinationen.
Quelle: EGS Plan, Stuttgart.

Stahlbeton und schwerem Mauerwerk gängig ist. Im Bausystem wurden im vorliegenden Forschungsprojekt unterschiedliche Schallschutzmaßnahmen umgesetzt, untersucht und in praktikable, baubare Details übersetzt, so dass die Funktionstauglichkeit der Teststände bezüglich des Schallschutzes, aber auch des Brandschutzes, messtechnisch nachgewiesen werden konnte.

Grundsätzlich ist Holz als brennbares Material feuergefährdet. Im Bausystem basiert der konstruktive Brandschutz auf der Verkohlung der oberen Holzschichten im Brandfall, die den Durchbrand verlangsamen, bis die Menschen gerettet und wirksame Löscharbeiten eingeleitet werden. Bei Massivholz wird durch die sich bildende Kohleschicht der Abbrand verlangsamt, so dass ohne Verkleidung und Beschichtung hohe Brandwiderstandsklassen erreicht werden können.

Nachteile der Holzbauweise:

- Schlechter Schallschutz.
- Brandschutz, Brennbarkeit.
- Feuchtebeständigkeit, Holzschutz.

Die Nachteile des Baustoffs Holz müssen in der Planung sorgfältig adressiert werden. Die Systementwicklung hatte das Ziel, diese Herausforderungen des Holzbaus systematisch zu erfassen und exemplarisch zu lösen.



5.2. UNTERSUCHUNG VON SYSTEMVARIANTEN

Konstruktive Hierarchien des Bausystems

Die grundlegenden Zielstellungen für die Systementwicklung bilden die Parameter, anhand derer organisatorische und konstruktive Entscheidungen für das System getroffen wurden. Insbesondere im Hinblick auf die Trennbarkeit von Materialien, eine effiziente Montage und den Rückbau von Bauteilen wurde eine Strategie zur Strukturierung des Systems gewählt, die eine klare, hierarchische Gliederung in konstruktiv-funktionaler und zeitlicher Dimension sowie im Bezug auf die Flexibilität der Bauteile vorsieht.

Die Definition der Hierarchieebenen ist einerseits an die zu erwartende Lebensdauer der einzelnen Materialien und Bauteile gekoppelt. Dadurch soll einerseits Flexibilität im Montageprozess gewährleistet werden, da die Bauteile sowohl als größere Module gemeinsam vorgefertigt als auch sukzessive vor Ort eingebaut werden können. Das System kann so, gemäß der Forschungsprämisse, auf projektspezifische Gegebenheiten und Einschränkung angepasst werden (Transport, Zugänglichkeit des Grundstücks, Möglichkeit der Vorfertigung, etc.). Andererseits ist die Lebensdauer, insbesondere bezüglich der Revisionierbarkeit, des Austauschs, des Um- und Rückbaus sowie des Recyclings der Bauteile entscheidend. Die klare Trennung der Hierarchieebenen soll sich daher auch physisch, das heißt konkret in der konstruktiven Fügung und geometrischen Anordnung der Bauteile, widerspiegeln, um eine sortenreine Trennbarkeit sicherzustellen.

Definition funktionaler Subsysteme

Die zunächst theoretische Logik der Hierarchieebenen findet im Bausystem eine konkrete Entsprechung in der Unterteilung funktionaler Subsysteme der Gesamtkonstruktion. Die Bauteile gemäß ihrer primären Funktion innerhalb des Gesamtsystems den jeweiligen Subsystemen zugeordnet. Daraus ergeben sich insgesamt vier Subsysteme, die sich auf drei Hierarchieebenen aufteilen.

Tragwerk

In das Subsystem des Tragwerks fallen alle primär tragenden und aussteifenden Bauteile der Skelettstruktur. Dazu zählen neben Stützen und Unterzügen auch gemeinsam als Platte wirkende Deckenelemente sowie massiv ausgeführte tragende Wandscheiben aus BSP (Brettsperrholz).

Abbildung 14:
Links: dgj244 Greenhouse,
Case Study für das Bausystem
2020, Foto: Hans Drexler.

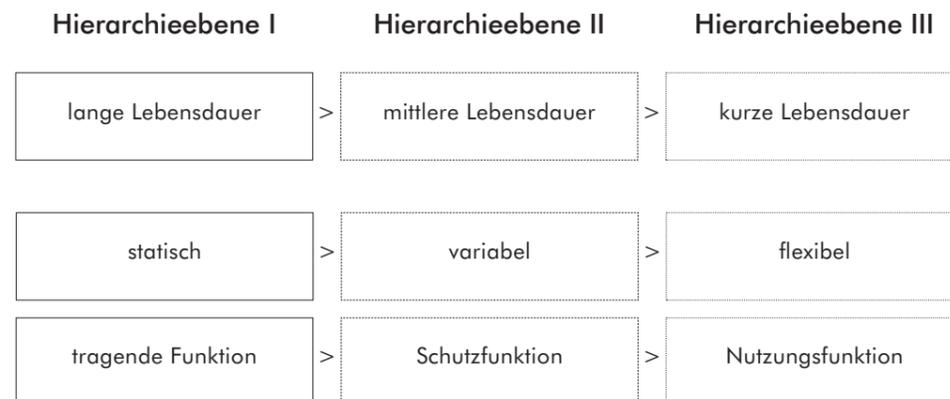
Gebäudehülle

Das Subsystem der Gebäudehülle umfasst alle konstruktiven Elemente, die den primären äußeren Raumabschluss bilden. Die entsprechenden Bauteile erfüllen grundlegende Funktionen des Brandschutzes sowie des Wärme- und Witterungsschutzes.

Ausbau

Dem Subsystem des Innenausbaus lassen sich sowohl gesamte Bauteile als auch einzelne Bauteilschichten zuordnen, die zur Erfüllung der Anforderungen an innenliegende Raumabschlüsse notwendig sind.

Graphik 16:
Konstruktive Hierarchieebenen
des Bausystems.



Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen (zum Beispiel für Wohnungstrennwände, Bodenaufbauten) ist auch von unterschiedlichen Lebensdauern beziehungsweise einem niedrigeren oder höheren Grad der Flexibilität auszugehen.

Technische Gebäudeausrüstung

Die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) dient ebenfalls der Erfüllung der Nutzungsfunktionen und läßt sich demnach in die dritte Hierarchieebene einordnen. Dabei bildet die Technik insofern ein gesondertes Subsystem, als die Austauschbarkeit und Flexibilität in besonderem Maße gewährleistet sein muss. Innerhalb des Systems kann zusätzlich zwischen Leitungsführung und Installationen unterschieden werden.

Geometrische Ordnung

Jeder Hierarchieebene und damit den einzelnen Subsystemen wird je ein geometrischer Raum zugewiesen, in dem die entsprechenden Bauteile mit allen zur Erfüllung funktionaler Anforderungen notwendigen Schichten angeordnet sind. Dabei ist zunächst nicht bestimmt, ob sich diese geometrischen Räume überschneiden beziehungsweise in Teilbereichen überlagern oder vollständig voneinander getrennt sind. Aus den jeweiligen Konstellationen ergeben sich die unterschiedlichen Strategien für die Gestaltung des Bausystems nach Anwendungsfall und für die Definition einer geometrischen Ordnung.

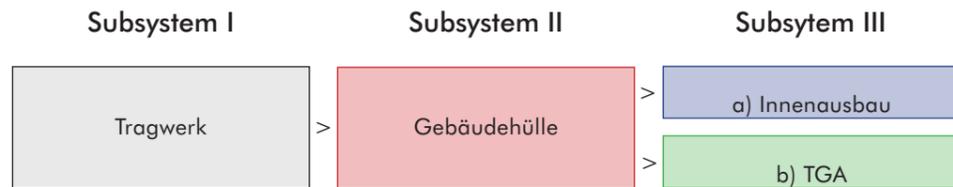
Im Fokus stehen die entgegengesetzten Strategien einer integrierten und einer differenzierten Bauweise. Für den Ansatz eines integrierten Systems wird angenommen, dass sich die geometrischen Räume der Subsysteme so weit wie möglich überlagern, während die differenzierte Strategie von einer größtmöglichen Trennung in einzelne Komponenten ausgeht. Diese Unterscheidung darf dabei zunächst nicht mit einem konstruktiven Verbund, der dem Anspruch der Trennbarkeit entgegensteht, beziehungsweise mit einer kleinteiligen Elementierung von Montageeinheiten gleichgesetzt werden. Allerdings werden im Vergleich der Strategien Einschränkungen, die diesbezüglich auftreten, deutlich gemacht und entsprechende Folgen für die Subsysteme aufgezeigt.

Die verschiedenen Strategien stellen Abstufungen innerhalb eines fließenden Spektrums an Möglichkeiten dar. Für die Übertragung auf das angewandte Bausystem lassen sich einzelne Aspekte verschiedener Strategien kombinieren. Außerdem lassen sich im Hinblick auf den tatsächlichen Aufbau eines Bauteils und seiner Montagelogik unterschiedliche Einordnungen vornehmen. Damit wird der Ansatz der ‚Assembly Hierarchies‘ nach N.J.Habraken³⁸, der eine konstruktive Logik und Bauabfolge bestimmt, auf einzelne Montageprozesse erweitert. Dem Bausystem garantiert dieses Vorgehen größtmögliche Flexibilität für eine breite Palette von Anwendungsfällen.

38 Habraken, N.J.: „The Structure of the Ordinary, Form and Control in the Built Environment“ MIT Press, Cambridge/London, 1998

Zusätzlich wird eine ‚monolithische‘ Bauweise als weitere Option vorgestellt, bei der als Steigerung der integrierten Bauweise eine Reduktion auf möglichst wenige oder nur ein einzelnes Baumaterial angestrebt wird, das alle Funktionen eines Bauteils aufnimmt. Anhand dieses Konstruktionsansatzes an einem extremen Ende der Skala lassen sich die Auswirkungen der gewählten geometrischen Strategie auf deren tatsächliche konstruktive Umsetzung gut veranschaulichen. Für die Anwendung im Bausystem ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet, da er zum einen nicht auf die Skelettbauweise übertragbar ist und zum anderen die gewünschte Flexibilität einschränkt.

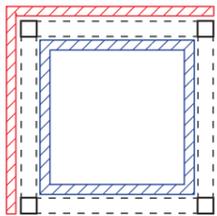
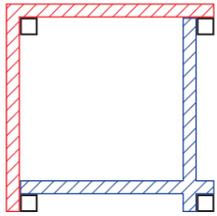
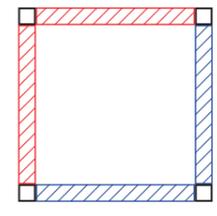
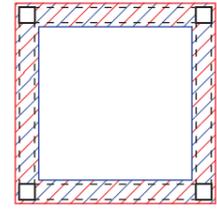
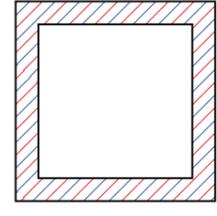
Schematische Darstellung der Hierarchien im Bausystem:



Graphik 17:
Diese Seite:
Geometrische Räume und
Strategien, wie für diese
Untersuchung definiert.

Graphik 18:
Rechts: Schematische
Darstellung der geometrischen
Räume der Subsysteme,
Skalierung abgestuft
zwischen den beiden Polen
„integriert“ und „differenziert“.

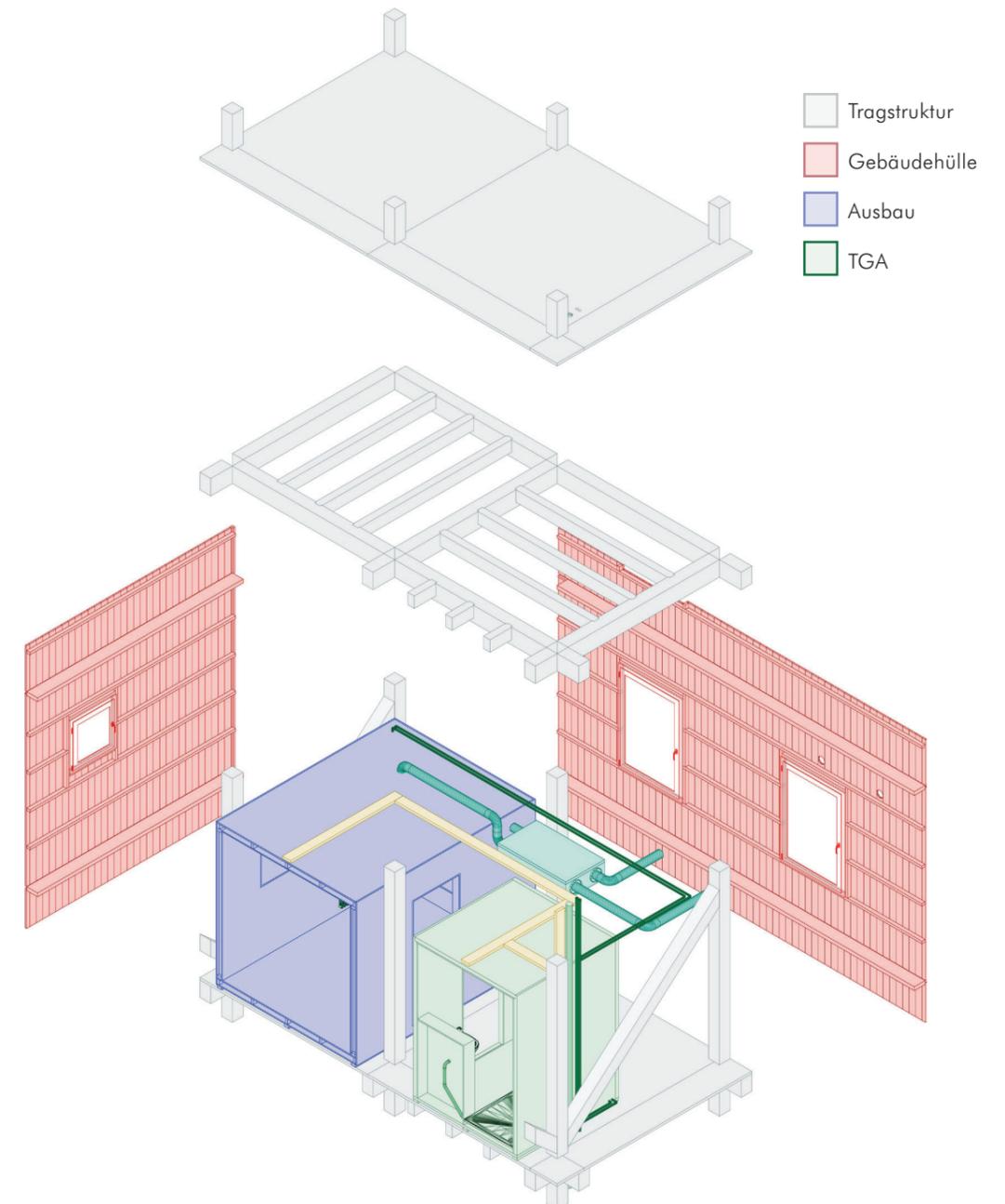
Schematische Darstellung der geometrischen Räume und zugehörigen Strategien

	Bezeichnung	Beschreibung
↑ differenziert	 Differenzierte Strategie	Die differenzierte Strategie geht von einer größtmöglichen räumlichen und konstruktiven Trennung der verschiedenen Subsysteme aus. Das heißt, dass die Anschlusspunkte zwischen den Bauteilen unterschiedlicher Hierarchien auf ein Minimum reduziert werden.
	 Parallele Ebenen / Layer	Die räumliche Trennung bleibt insofern bestehen, als dass die einzelnen Subsysteme in Schichten vor- bzw. nebeneinander angeordnet sind. Es ergeben sich sowohl minimale Berührungsflächen als auch "Schichtungen" entlang gesamter Bauteile. Dabei soll ein Materialverbund zwischen den Schichten vermieden und somit ihre Trennbarkeit erhalten werden.
	 geteilte räumliche Ebene / „Ausfachung“	Die untergeordneten Systeme werden in den Zwischenräumen der Tragelemente angeordnet - das Tragwerk wird ausgefacht. Auch hier soll nach Möglichkeit die Trennbarkeit der Bauteile bzw. funktionalen Schichten erhalten bleiben.
	 integrierte Strategie / gemeinsamer Raum	Die klare räumliche Trennung wird weitestgehend aufgehoben, indem Bauteile bzw. größere Montageeinheiten die Funktionen der verschiedenen Subsysteme in sich vereinen. Einzelne Komponenten und Schichten lassen sich aber noch eindeutigen Funktionen zuordnen.
↓ integriert	 monolithische Strategie	Mit dem Ziel der größtmöglichen Integration sollen auf wenige Materialien reduzierte Bauteilaufbauten alle Funktionen in sich vereinen.

Differenzierte Ausführungsvariante

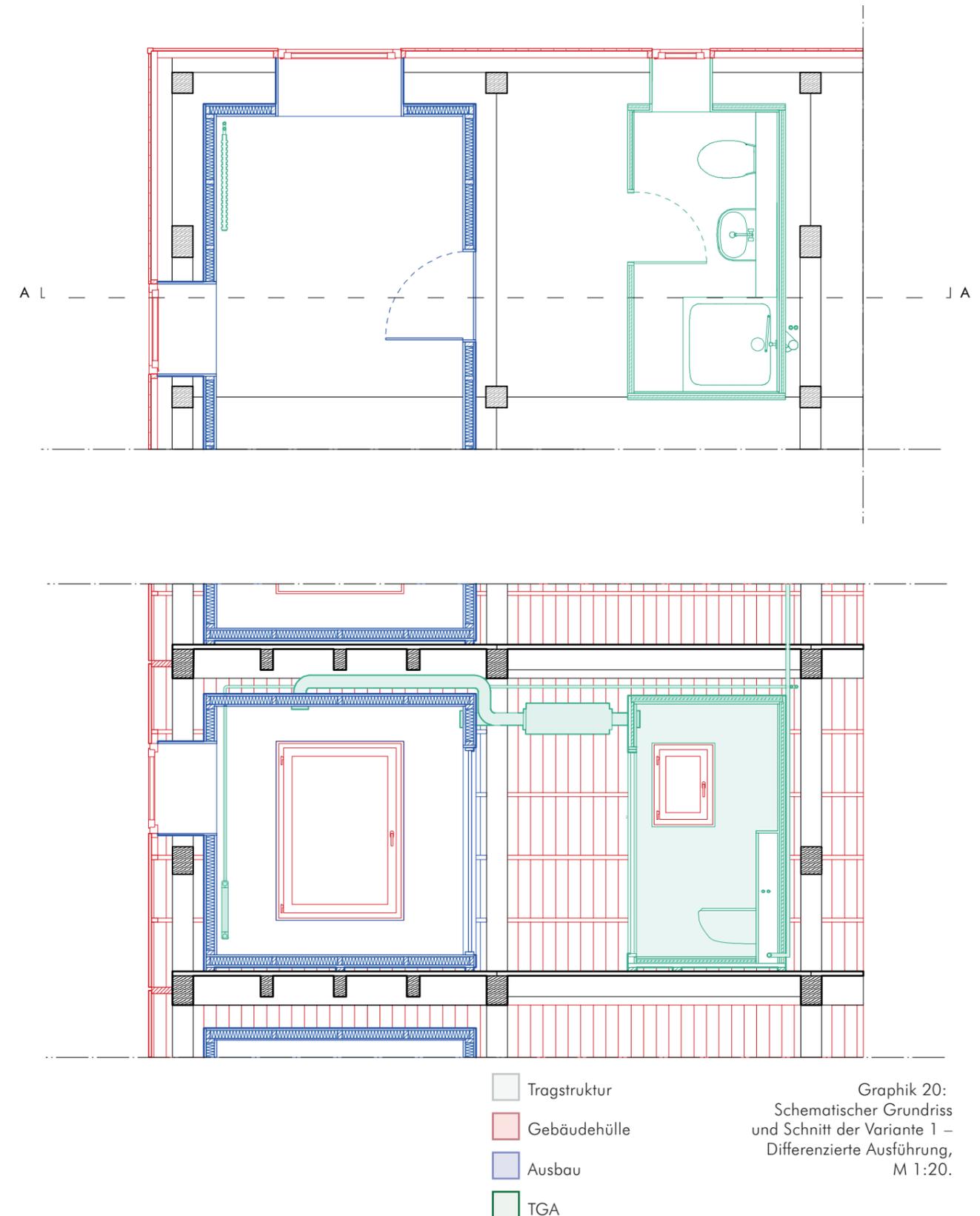
Die größtmögliche Trennung der Subsysteme hat zur Folge, dass sich jeweils eigenständige Montagemodule ausbilden lassen, die prinzipiell im „Baukastensystem“ vor Ort zusammengefügt werden können. Die Tragstruktur tritt dabei effektiv als im Rohbau belassenes Grundgerüst in Erscheinung, an dem Fassadenelemente angebracht und in dem vorgefertigte Raummodule im Ausbau platziert werden können. Diese lassen sich während der Nutzung eines Gebäudes neu positionieren und ermöglichen somit vielfältige Wohnkonfigurationen. Allerdings sind die Module in sich selbst nur begrenzt flexibel, beispielsweise durch die Kopplung von zwei oder mehr Räumen, und bedingen durch die Doppelung von Konstruktionen (für Tragwerk und Ausbau) und notwendige Abstandsflächen größere Flächenverluste. Zudem stellen die Installationsführung, Fassadenöffnungen sowie die Gewährleistung von Brand-, Schall- und Wärmeschutzanforderungen schwer lösbare Herausforderungen dar, die bei fachgerechter Ausführung eine weitere Einschränkung der Flexibilität nach sich ziehen würden.

Graphik 19:
Explosionsaxonomie,
Variante 1 – Differenzierte
Ausführung.



Beschreibung und Bewertung der differenzierten Ausführungsvariante

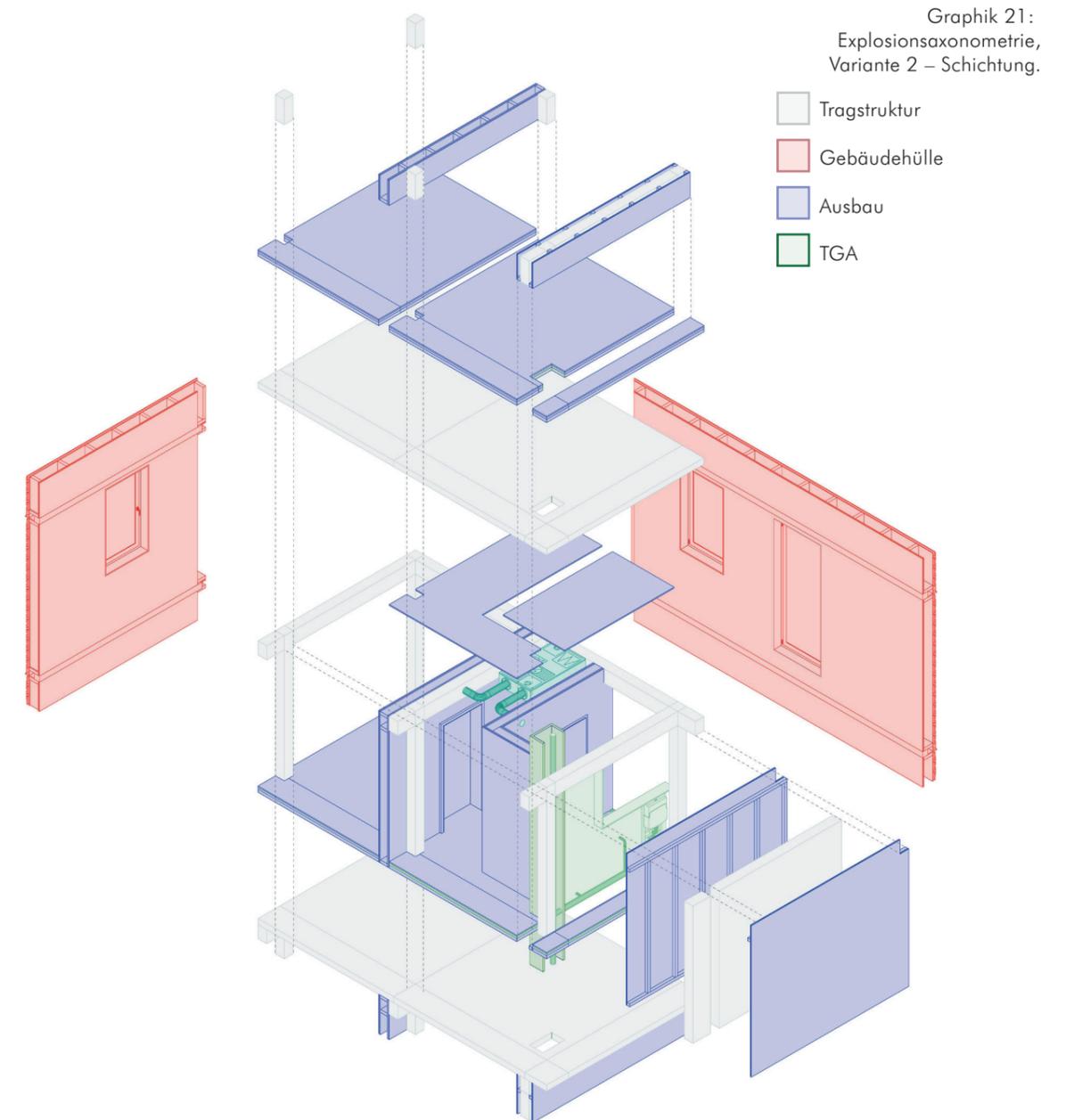
Tragwerk	Die Tragstruktur wird als „reiner“ Skelettbau fast ausschließlich aus stabförmigen Einzelelementen gebildet. Die horizontale Aussteifung wird durch Auskreuzungen mit Holzbalken als Druckstäbe und die Plattenwirkung einer einfachen Holzschalung auf Holzbalkendecken erreicht. Das Tragwerk bleibt als Rohbau vollständig freiliegend und wirkt funktional nicht mit Bauteilen anderer Subsysteme zusammen.
Brandschutz	Eine Abtrennung verschiedener Brandabschnitte innerhalb eines Gebäudes ist in einer vollständig differenzierten Konstruktionslogik kaum umsetzbar. Raumabschließende Elemente stellen allein die Fassaden oder vorgefertigte Raummodule dar. Die freiliegenden Tragelemente können direkt am Brandgeschehen teilnehmen und stehen somit unter besonderer Beanspruchung, die durch eine entsprechende Heißbemessung in der Statik zu berücksichtigen ist.
Schallschutz	Die Erfüllung von Schallschutzanforderungen können maximal innerhalb der abgeschlossenen Raummodule angenommen werden. Analog zu Brandabschnitten kann keine schalltechnische Trennung von Räumen bzw. Nutzungseinheiten hergestellt werden. Eine Schallübertragung durch tragende Bauteile, insbesondere Trittschall, wird nicht eingedämmt, sofern keine zusätzlichen Bauteilschichten im Ausbau hinzugefügt werden.
Thermische Bauphysik	Für die der Tragstruktur vorgelagerte Fassade kommen vielfältige Ausführungsmöglichkeiten mit entsprechenden Qualitäten hinsichtlich des Witterungs- und Wärmeschutzes oder des Wärmeeintrags in Frage. Unabhängig davon wird weitestgehend verhindert, dass Tragelemente Wärmebrücken bilden.
Flexibilität	Raummodule können zunächst grundsätzlich frei im Grundriss angeordnet werden, lassen sich später verschieben und können auch zu größeren Einheiten verbunden werden. Die Flexibilität wird allerdings durch die Installationsführung oder die Anordnung von Fassadenöffnungen eingeschränkt. Zudem ist die Größe der Module durch das Rastermaß begrenzt.
Austausch und Rückbau	Durch die minimalen Verbindungen untereinander lassen sich die Bauteile der verschiedenen Subsysteme größtenteils unabhängig voneinander austauschen und mehrheitlich zerstörungsfrei zurückbauen.
Trennbarkeit und Recycling	Alle Bauteile und Module sind nach dem zerstörungsfreien Rückbau vollständig wiederverwendbar. Das mono-materiale Tragwerk, die konstruktiv möglichst einfachen Fassaden sowie Installationselemente sind größtenteils sortenrein trennbar und recyclebar. Die Raummodule sind ggf. schwieriger zu trennen, aber im ganzen wiederverwendbar.
Vorfertigung	Die Tragelemente werden „montagefertig“ abgebunden. Raummodule werden als vollständig vorgefertigte Montageeinheiten hergestellt. Selbsttragende Fassadenkonstruktionen können ggf. vorgefertigt werden. Ansonsten werden sie, wie die Installationen, aus Einzelkomponenten vor Ort montiert.
Standardisierung	Die vorgefertigten Raummodule erfordern ein weitestgehend einheitliches Rastermaß. Damit geht eine Reduzierung auf wenige standardisierte Anschlussdetails einher. Für Fassadenkonstruktionen und Installationen bietet sich die Verwendung von verfügbaren industriellen Standardelementen an.
Montage	Die verschiedenen Subsysteme bzw. ihre Bauteile werden getrennt voneinander und größtenteils aus Einzelkomponenten vor Ort montiert. Die Skelettstruktur des Tragwerks kann als vollständiges Grundgerüst hergestellt werden. Raummodule des Ausbaus und Installationen werden ggf. vor der Montage der Fassade eingebracht.



Parallele Räume / Schichtung der Subsysteme

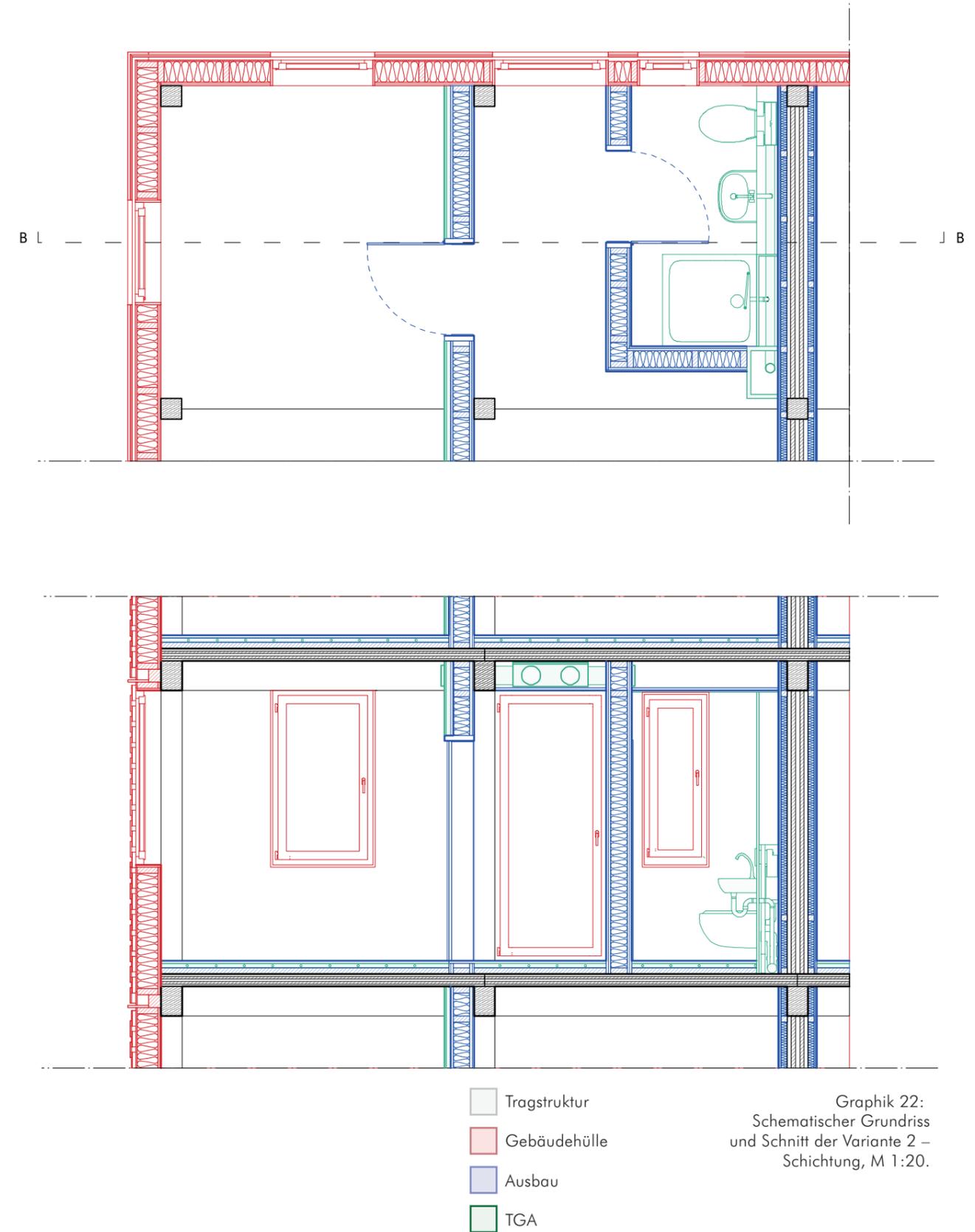
Bei der Strategie der geschichteten Subsysteme werden die einzelnen Schichten als eigenständige, weitestgehend mono-funktionale Bauteile betrachtet und können somit weiterhin eindeutig den einzelnen Subsystemen zugeordnet werden. So sind beispielsweise Tragelemente und Installationsebenen nicht effektive Bestandteile des Raumabschlusses, das heißt, die Funktionen der angrenzenden Bauteile bleiben unabhängig von ihnen bestehen. In der praktischen Umsetzung ist dieses Prinzip allerdings bei einigen Bauteilaufbauten nur begrenzt umsetzbar. Ausnahmen bilden daher Wohnungstrennwände oder Fußbodenaufbauten, da einzelne Schichten, die unterschiedlichen Subsystemen zugeordnet werden können, nur im Bauteilverbund alle Anforderungen erfüllen, beziehungsweise als Ertüchtigung flächiger Tragelemente gebraucht werden.

Hinsichtlich der Flexibilität bietet diese Strategie vor allem Vorteile durch den vergleichsweise einfachen Aus- und Umbau aufgrund weniger komplexer Bauteilanschlüsse. Die Positionierung der raumbildenden Bauteile ist dabei enger an die Tragstruktur gebunden.



Beschreibung und Bewertung der parallelen Räume / Schichtung der Subsysteme

Tragwerk	Es bietet sich an, auch die „Schicht“ des Tragwerks zum Teil als flächiges Element auszubilden und somit eine hybride Struktur aus Skelett- und Massivbau herzustellen. Deckenscheiben und zum Teil Trennwandelemente aus BSP sorgen für die horizontale Aussteifung. Aufgrund der mehrheitlich freiliegenden Tragelemente besteht nur bei Decken und Trennwänden ein funktionales Zusammenwirken mit anderen Subsystemen.
Brandschutz	Die Trennung in Brandabschnitte erfolgt durch die massiven BSP-Trennwände mit zusätzlichen, feuerhemmenden Schichten bzw. durch zweischalige entkoppelte Wandaufbauten. Der Raumabschluss kann nach gängiger Praxis an Beplankungsstößen durch Fugenversatz bzw. Stufenfalz gewährleistet werden. Anschlüsse an Tragelemente – abgesehen von Decken – sind hinsichtlich des Raumabschlusses nicht relevant. Allerdings ist das weitestgehend freiliegende Tragwerk im Brandfall besonders beansprucht und entsprechend zu bemessen.
Schallschutz	Mehrschichtige Wand- und Deckenbauteile können entsprechend zugelassener Bauteilaufbauten ausgeführt werden und die Schallschutzanforderungen erfüllen. Eine direkte Übertragung durch tragende Bauteile kann teilweise eingedämmt werden, da diese nicht Teil des Raumabschlusses sind.
Thermische Bauphysik	Durch die vor der Tragstruktur liegende Fassadenebene lässt sich eine ununterbrochene Dämmschicht und Dichtebene gut herstellen. Die innenliegenden Tragelemente stellen dabei keine Wärmebrücken dar.
Flexibilität	Innenwände können flexibel im Grundriss angeordnet werden, sind aber weitestgehend an das Tragwerksraster gebunden. Da keine vertikale Trennung der Tragstruktur vorgesehen ist, können auch Wohnungstrennwände freier positioniert werden, wodurch eine flexiblere Wohnungsaufteilung möglich ist.
Austausch und Rückbau	Die Bauteile des Ausbaus, der Fassaden und Installationsebenen lassen sich grundsätzlich unabhängig voneinander austauschen und zerstörungsfrei zurückbauen. Einschränkung bestehen dabei durch die Schichtung von Ausbau- und Installationsschichten.
Trennbarkeit und Recycling	Die Bauteile der einzelnen Subsysteme sind einfach voneinander trennbar. Bauteilschichten lassen sich weitestgehend sortenrein trennen und wiederverwerten. Die Bauteile von Tragwerk und Fassade sind ggf. im Ganzen wiederverwendbar.
Vorfertigung	Bis auf Bodenaufbauten kann ein Großteil der Bauteile vorgefertigt werden. Die Tragelemente werden „montagefertig“ abgebunden. Selbsttragende Fassaden- und Wandbauteile können als Montageeinheiten vorgefertigt werden.
Standardisierung	Die weitestgehend standardisierten Systemdetails kommen zur Anwendung, während flexible Rastermaße und Bauteildimensionen gewählt werden können.
Montage	Die Montageabläufe entsprechen der funktionalen und konstruktiven Hierarchie der Subsysteme. Die „Schichten“ werden dementsprechend sukzessive eingebaut. Bei einem höheren Vorfertigungsgrad werden tragende Bauteile und Montageeinheiten der Fassade und des Ausbaus geschossweise montiert.



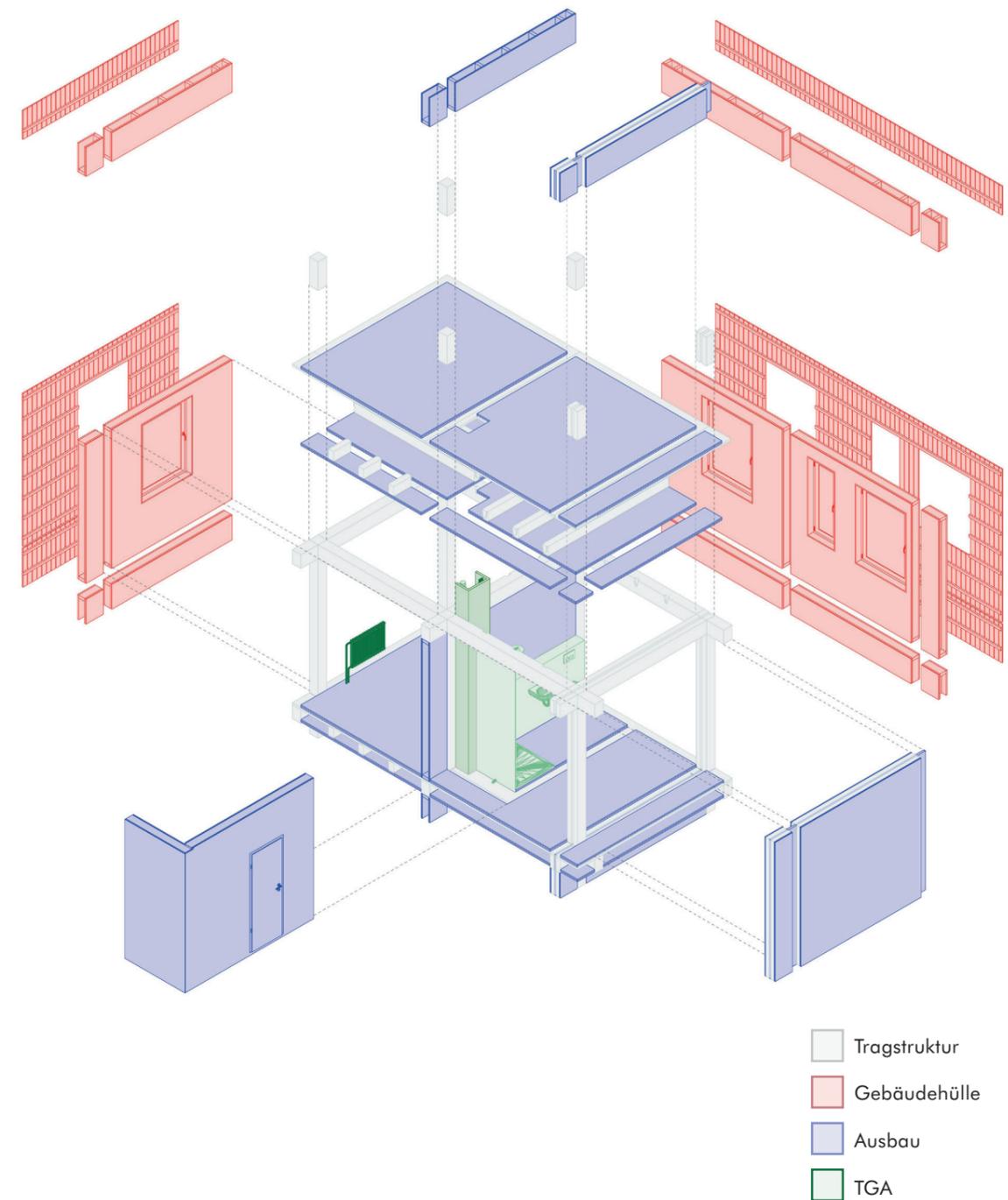
Graphik 22:
Schematischer Grundriss
und Schnitt der Variante 2 –
Schichtung, M 1:20.

Ausfachung

Die Bauteile der verschiedenen Subsysteme teilen sich in der Variante 3, der Strategie der Ausfachung, die gleichen räumlichen Ebenen entlang des Konstruktionsrasters. Dadurch kommt es auch zu funktionalen Überlagerungen, da die Tragelemente als Teil des Raumabschlusses in Fassade und Ausbau eingebunden sind. Entscheidend ist daher die Ausführung der Anschlussdetails zwischen Tragwerk und Ausbau. Dabei bleiben die Bauteile verschiedener Subsysteme unabhängige Montagemodule, die möglichst leicht voneinander getrennt ein- und ausgebaut werden können und somit eine flexible Grundrissgestaltung und spätere Anpassungen zulassen.

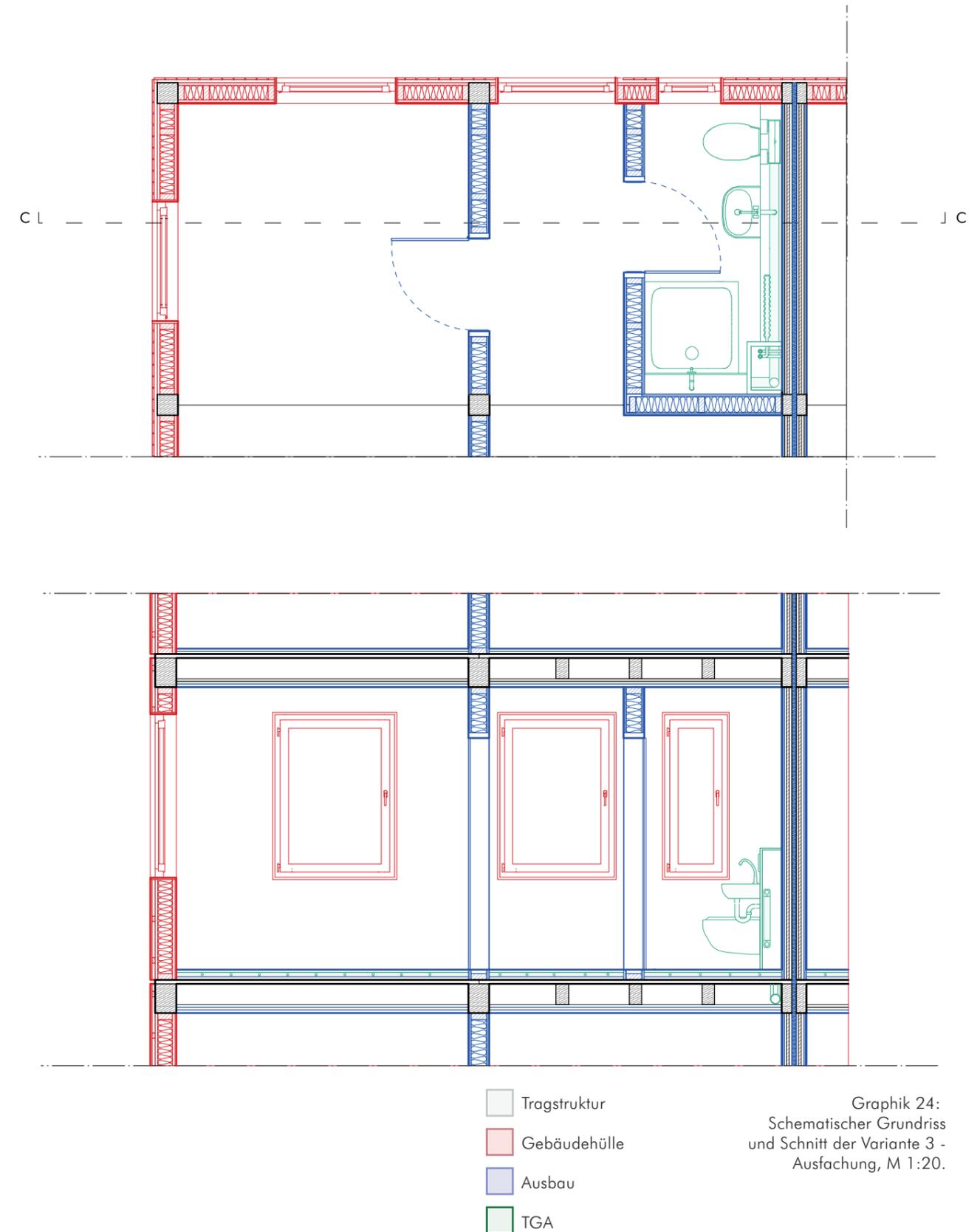
Bei Wohnungstrennwänden und Geschossdecken ergibt sich erneut ein mehrschichtiger Aufbau, um die verschiedenen funktionalen Anforderungen erfüllen zu können.

Graphik 23:
Explosionsaxonomie,
Variante 3 - Ausfachung.



Beschreibung und Bewertung der Ausfächung

Tragwerk	Die Tragstruktur wird vorrangig als Skelett aus stabförmigen Elementen gebildet. Zur Aussteifung werden einzelne Wandfelder mit massiven BSP-Elementen ausgefacht. Zudem werden Decken als Balken- oder Kastendecken ausgeführt und erzeugen über ihre Beplankungslagen eine Scheibenwirkung. In den geometrischen Ebenen der Wände und Decken sollen Funktionen der anderen Subsysteme integriert werden, weshalb sich Tafelbauweise und Balkendecken anbieten. Daraus ergibt sich auch automatisch eine Doppelfunktion der Tragelemente.
Brandschutz	Die Trennung von Brandabschnitten erfolgt über zweischalige, entkoppelte Wandaufbauten und eine durchgängige Trennung der Tragstruktur mit zusätzlichen, feuerhemmenden Schichten. Die teilweise freiliegende Tragstruktur muss auf Abbrand bemessen werden. Da Tragelemente einen Teil des Raumabschlusses bilden, stellt die Ausführung der Tragwerkdetails sowie Anschlussverbindungen zwischen Ausbau und Tragwerk eine größere Herausforderung dar. Durch die form- und kraftschlüssigen Verbindungen können die Tragelemente als homogene und somit raumabschließende Bauteile betrachtet werden. Die Anschlüsse des Ausbaus müssen mit nichtbrennbaren Dämmstoffen abgedichtet werden.
Schallschutz	Die form- und kraftschlüssigen Verbindungen gestalten sich hinsichtlich des Schallschutzes zunächst nachteilig, da sie als direkte Schallbrücken zwischen Geschossen wirken. Dieser Effekt wird durch die Ausbildung möglichst steifer Verbindungen und somit einer größeren, anzuregenden Masse reduziert. Zwischen Nutzungseinheiten wirkt die Entkopplung der Wandschalen und der Tragstruktur horizontaler Schallübertragung entgegen.
Thermische Bauphysik	Die Tragelemente sind in die Gebäudehülle integriert und können Wärmebrücken bilden. Eine außen vorgelagerte, ununterbrochene Dämmschicht ist zusätzlich erforderlich, um Energiestandards einzuhalten. Ebenso gilt besonderes Augenmerk der Ausführung der wasserführenden Schichten und Dampfbremsen, um Feuchteintrag durch Witterung oder Kondensatbildung in der Tragstruktur zu vermeiden.
Flexibilität	Innenwände können flexibel im Grundriss angeordnet werden, sind aber weitestgehend an das Tragwerksraster gebunden. Da keine vertikale Trennung der Tragstruktur vorgesehen ist, können auch Wohnungstrennwände freier positioniert werden, wodurch eine flexiblere Wohnungsaufteilung möglich ist.
Austausch und Rückbau	Die Bauteile des Ausbaus, der Fassaden und Installationsebenen lassen sich weitestgehend unabhängig voneinander austauschen und zerstörungsfrei zurückbauen. Einschränkung bestehen dabei durch die Schichtung von Ausbau- und Installationsschichten.
Trennbarkeit und Recycling	Die Bauteile der einzelnen Subsysteme sind einfach voneinander trennbar. Bauteilschichten lassen sich grundsätzlich sortenrein trennen und wiederverwerten. Die Bauteile von Tragwerk und Fassade sind ggf. im Ganzen wiederverwendbar.
Vorfertigung	Bis auf Bodenaufbauten kann ein Großteil der Bauteile vorgefertigt werden. Die Tragelemente werden „montagefertig“ abgebunden. Selbsttragende Fassaden- und Wandbauteile können als Montageeinheiten vorgefertigt werden.
Standardisierung	Die weitestgehend standardisierten Systemdetails kommen zur Anwendung, während flexible Rastermaße und Bauteildimensionen gewählt werden können.
Montage	Die Montageabläufe entsprechen der funktionalen und konstruktiven Hierarchie der Subsysteme. Die „Schichten“ werden dementsprechend sukzessive eingebaut. Bei einem höheren Vorfertigungsgrad werden tragende Bauteile und Montageeinheiten der Fassade und des Ausbaus geschossweise montiert.

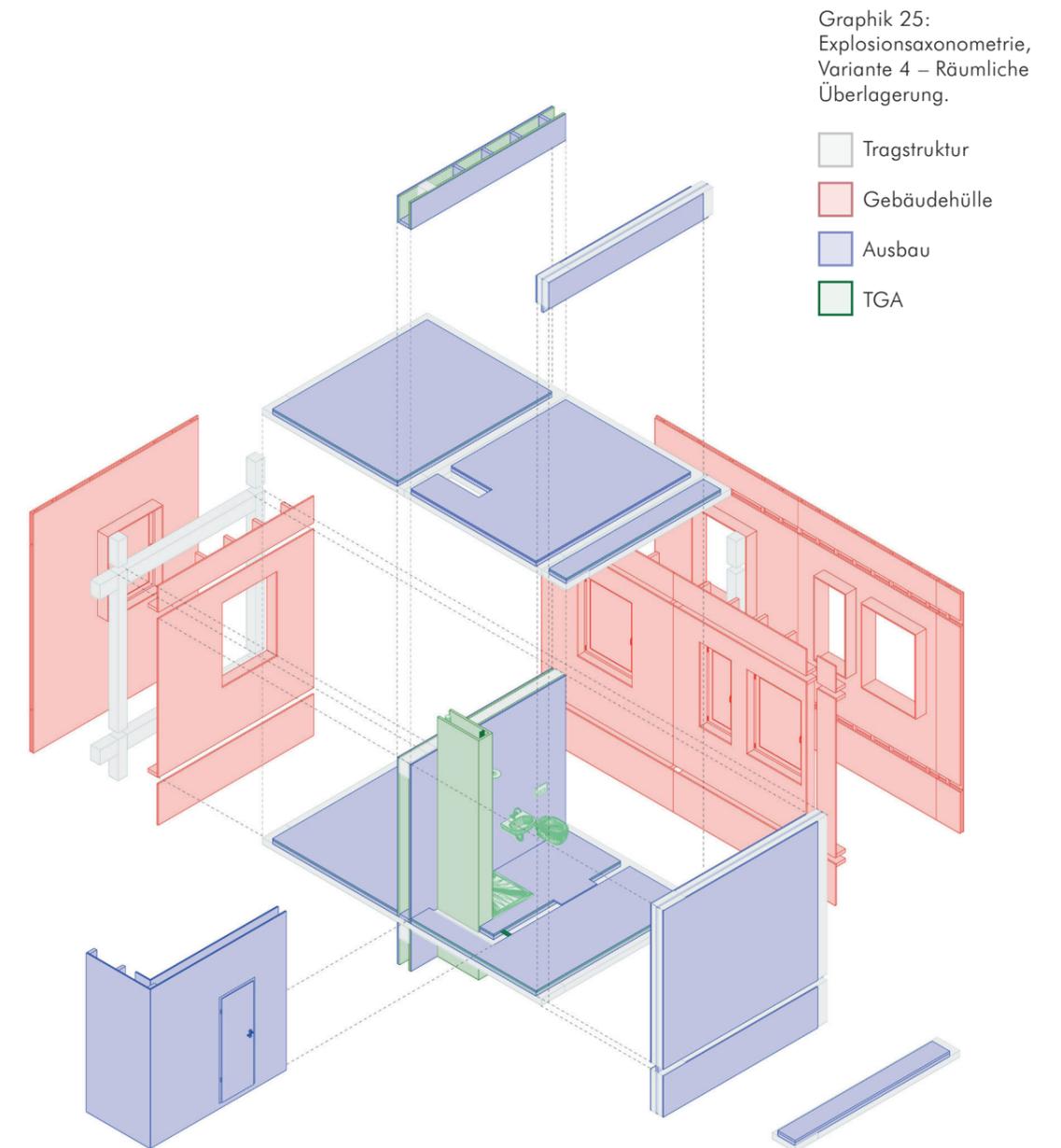


Graphik 24:
Schematischer Grundriss
und Schnitt der Variante 3 -
Ausfächung, M 1:20.

Räumliche Überlagerung der Subsysteme

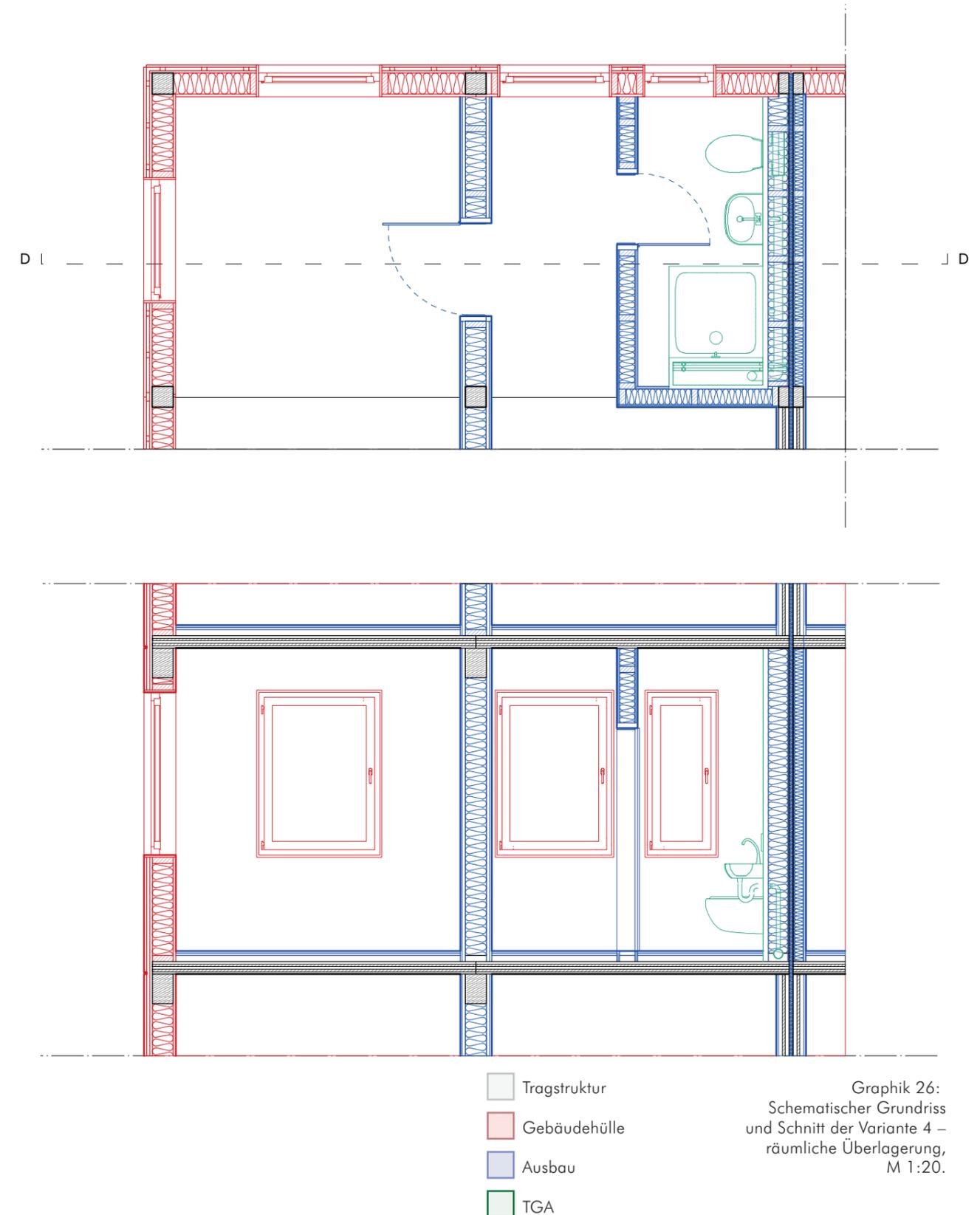
Die Bauteile verschiedener Subsysteme werden bei einer räumlichen Überlagerung (Variante 4) in Montagemodulen zusammengefasst, die mehrere funktionale Anforderungen im Verbund erfüllen. Die Herstellung der Bauteilanschlüsse wird dadurch gegebenenfalls komplexer, was sich aber vor allem hinsichtlich der Brand- und Schallschutzanforderungen positiv auswirkt. Aufgrund des hohen Grades der Integration innerhalb der Konstruktion wird die Flexibilität entscheidend eingeschränkt, da eine einfache Trennbarkeit der Bauteilschichten nicht mehr ohne Weiteres möglich ist.

Das Konstruktionsprinzip entspricht am ehesten einer gängigen und flächendeckend bauordnungsrechtlich zulässigen Ausführung im mehrgeschossigen Holzbau, da sich sichtbare Holzoberflächen weitestgehend vermeiden lassen und Anforderungen an Kapselung und Anschlussausführungen mit entsprechenden Beplankungsschichten erfüllt werden können.



Beschreibung und Bewertung der räumlichen Überlagerung der Subsysteme

Tragwerk	Das Tragwerk wird als hybride Struktur aus stabförmigen Elementen für Stützen und Unterzüge und massive BSP-Decken und aussteifende Wandelementen gebildet. Tragende und aussteifende Funktionen können in Bauteilen zusammengeführt werden, indem beispielsweise massive Wandelemente angrenzende Stützen und Unterzüge ersetzen.
Brandschutz	Auch wenn die Tragkonstruktion nur teilweise oder gar nicht sichtbar ausgeführt ist, wird sie bei erhöhten Anforderungen (hochfeuerhemmend) auf Abbrand bemessen. Die Trennung von Brandabschnitten erfolgt über zweischalige entkoppelte Wandaufbauten und eine durchgängige Trennung der Tragstruktur mit zusätzlichen, feuerhemmenden Schichten. Die Tragelemente sind Teil des Raumabschlusses, stellen aber entweder als massive Bauteile keine Problemstellen dar oder sind durch die zusätzlichen, mit Fugenversatz bzw. Stufenfalz ausgeführten Verkleidungen und deren Anschlüsse abgedichtet. Allgemein können alle mehrschichtige Wand- und Deckenbauteile entsprechend zugelassener Bauteilaufbauten ausgeführt werden und somit die Brandschutzanforderungen erfüllen.
Schallschutz	Die Entkopplung der Trennwände zwischen Nutzungseinheiten ist auch schallschutztechnisch wirksam. Durch die zusätzliche Verkleidung wird eine direkte Schallübertragung durch tragende Bauteile reduziert. Flankenschallübertragung ist v.a. bei der Ausführung freiliegender Deckenunterschichten zu berücksichtigen. Allgemein können alle mehrschichtige Wand- und Deckenbauteile entsprechend zugelassener Bauteilaufbauten ausgeführt werden und somit die Schallschutzanforderungen erfüllen.
Thermische Bauphysik	Die Tragelemente sind in die Gebäudehülle integriert und können Wärmebrücken bilden. Eine außen vorgelagerte, ununterbrochene Dämmschicht ist zusätzlich erforderlich, um Energiestandards einzuhalten. Ebenso gilt besonderes Augenmerk der Ausführung der wasserführenden Schichten und Dampfbremsen, um Feuchteintrag durch Witterung oder Kondensatbildung in der Tragstruktur zu vermeiden. Allgemein können alle Außenwandbauteile entsprechend zugelassener Bauteilaufbauten ausgeführt werden und somit die bauphysikalischen Anforderungen erfüllen.
Flexibilität	Der Ausbau ist weitestgehend an das Tragwerksraster gebunden. Innenwände können darin zunächst frei angeordnet werden, lassen sich später aber nur mit größerem Aufwand versetzen. Durch die Entkopplung des Tragwerks im Bereich der zweischaligen Wohnungstrennwände sind diese nicht verschiebbar und die Flexibilität der Wohnungsaufteilung eingeschränkt.
Austausch und Rückbau	Ein unabhängiger Ausbau und Austausch von Bauteilen einzelner Subsysteme ist durch die funktionalen Überlagerungen nur eingeschränkt oder nicht möglich. Einzelne Schichten oder Komponenten, beispielsweise Installationen, lassen sich ggf. unabhängig austauschen.
Trennbarkeit und Recycling	Die Bauteile bzw. Montageeinheiten umfassen Komponenten, die verschiedenen funktionalen Systemen zugewiesen werden und sind nicht in kleinere Elemente teilbar. Ggf. sind die Montageeinheiten im ganzen wiederverwendbar. Einzelne Schichten lassen sich weitestgehend sortenrein trennen und wiederverwerten.
Vorfertigung	Bis auf Bodenaufbauten kann ein Großteil der Bauteile zu größtmöglichen Transport- und Montageeinheiten zusammengefasst und vorgefertigt werden.
Standardisierung	Es kommen grundsätzlich standardisierten Systemdetails zur Anwendung, während flexible Rastermaße und Bauteildimensionen gewählt werden können. Aufgrund des hohen Vorfertigungsgrads bieten sich einheitlichere Dimensionen an.
Montage	Die weitestgehend vorgefertigten und integrierten Montageeinheiten werden vor Ort geschossweise zusammengesetzt. Zusätzliche Ausbauten und Installationsführungen folgen in abschließenden Montageschritten.



6.1. TRAGWERK

Das Tragwerk ist Ausgangspunkt der Entwicklungsarbeit. Hier konnte auf bereits vorausgegangene Forschungsergebnisse im Projekt ‚Holz: Form- und kraftschlüssig‘³⁹ aufgebaut werden, in dem die Grundlagen für das globale und lokale Tragwerk erarbeitet wurden.

Allgemeine Anforderungen an das Tragwerk

Grundlegende Anforderung an jede Tragstruktur ist die Gewährleistung der Standsicherheit im Hinblick auf die Lastannahmen für alle auftretenden ständigen und veränderlichen Lasten. Ständige Lasten sind gleichbedeutend mit der Eigenlast der Gesamtkonstruktion des Gebäudes. Die veränderlichen Lasten bestehen einerseits aus den Nutz- und Verkehrslasten und andererseits aus äußerlich auf die Tragstruktur einwirkenden Lasten wie Schnee-, Wind- und gegebenenfalls Erdbebenlasten. Aus der Kombination der ständigen und veränderlichen Lasten ergibt sich die jeweils anzusetzende Gesamtlast, die für die Bemessung aller Bauteile maßgeblich ist.

Um die primäre Beanspruchung einzelner Bauteile zu bestimmen, werden die Lasten zusätzlich entsprechend ihrer Wirkrichtung in vertikale und horizontale Lasten unterschieden.

Der rechnerische Nachweis zur Standsicherheit des Tragwerks erfolgt durch die Bemessung der tragenden Bauteile und Bauteilanschlüsse.

Da Holz als primärer Baustoff für die Tragstruktur feststeht, sind besondere Voraussetzungen beziehungsweise Anforderungen für den Holzbau zu berücksichtigen. Holz ist ein anisotropes Material, dessen Tragverhalten stark in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung variiert. In Faserrichtung ist es vor allem in Relation zum geringen Eigengewicht besonders leistungsfähig, während die Tragfähigkeit quer zur Faser wesentlich niedriger ist.

Bei der Bemessung von Deckenkonstruktionen im Holzbau ist zusätzlich die Anforderung der Gebrauchstauglichkeit zu beachten, die durch den Schwingungsnachweis und Nachweis der Durchbiegung sichergestellt wird. Orientiert an den Vorgaben des Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1:2010-12) wird in der Baupraxis die Anforderung an Wohnungstrenndecken gestellt, dass Verformungen und Schwingungen weitestgehend nicht wahrnehmbar sein dürfen. Dies entspricht einer maximalen Durchbiegung von $l/300$ sowie einer Eigenfrequenz von 8 Hz.

³⁹ Hans Drexler et al., Holz: Form- und kraftschlüssig. Entwicklung eines Voll-Holz-Bausystems mit form- und kraftschlüssigen geometrischen Verbindungen. (Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2020).

Tragstruktur im Bausystem

Im vorangegangenen Forschungsprojekt wurden maßgebliche Bemessungsmodelle für tragende Bauteile und Ausführungsdetails für die Bauteilfügungen entwickelt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Tragwerksentwicklung zusammengefasst.

Statisches System

Durch das gewählte statische System wird näher bestimmt, wie die Lasten von den Bauteilen abgetragen werden und welche Kräfte auf die Bauteilquerschnitte und an den jeweiligen Anschlusspunkten wirken. Für eine geeignete Auswahl des statischen Systems sind verschiedene Parameter maßgeblich.

Zunächst bestimmen die Gebäude- bzw. Rasterabmessungen Spannweiten (oder Knicklängen) und Spannrichtungen der Bauteile und fließen direkt in deren Dimensionierung ein. In der Logik des Bausystems lassen sich theoretisch beliebige Rastermaße und Spannweiten sowohl in gerichteten als auch ungerichteten Systemen umsetzen. Allerdings zeigen die Bemessungsmodelle Systemgrenzen auf, an denen statische Höhen der Bauteile erreicht werden, die nach architektonischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht mehr sinnvoll erscheinen.

Des Weiteren beeinflusst die Ausbildung des Tragsystems als Ein- oder Mehrfeldsystem die Auflagerlasten und somit die Ausbildung der Anschlussdetails und die Dimensionierung der Bauteile. Aufgrund der angestrebten reinen Holzfügung können keine Kräfte durch zusätzliche übliche Stahlverbindungsmitel aufgenommen werden.

Da bei Mehrfeldsystemen die höchste Momentbelastung über dem Auflager liegt, hat dies zur Folge, dass die hohen Auflagerlasten direkten Einfluss auf die Querschnitte der anschließenden Unterzüge und Stützen haben. Um diese Auswirkungen zu vermeiden und zudem an allen Anschlusspunkten einheitliche Details und Bauteilquerschnitte zu erhalten, wäre ein Einfeldsystem zu bevorzugen. Im Bausystem ist dennoch ebenso vorgesehen, Mehrfeldsysteme ausbilden zu können. Dies ist beispielsweise in Abhängigkeit zu dem gewählten bzw. notwendigen Prinzip der Horizontalaussteifung von Vorteil. Zudem wirken sich die unterschiedlichen Ausführungen des Tragwerks auch auf die Anforderungsbereiche des Schallschutzes aus.

Globales Tragwerk - Tragstruktur des Bausystems

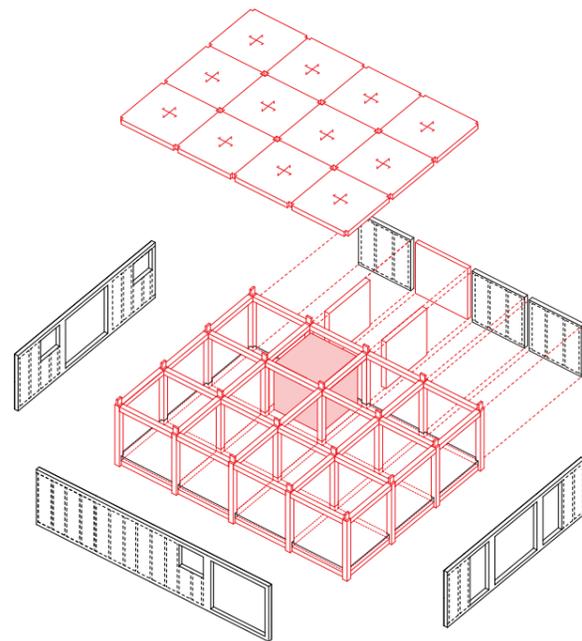
Alle für den vertikalen und horizontalen Lastabtrag innerhalb eines Bauwerks notwendigen Bauteile wurden als Elemente des globalen Tragwerks definiert. Die Betrachtung umfasste dabei zunächst unterschiedliche Konstruktionsprinzipien, die als Interpretationen für das Bausystem denkbar sind. Es wurden eine Skelettstruktur mit vorrangig stabförmigen tragenden Bauteilen, eine Hybridstruktur mit stabförmigen und flächigen Tragelementen sowie eine Massivholzkonstruktion mit ausschließlich flächigen Tragelementen untersucht. 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 verschiedenen Konstruktionsweisen der globalen Tragsysteme notwendig sind. Die benötigten Holzvolumen wurden exemplarisch für eine Wohneinheit von 84m² verglichen.

Holzvolumen für 84m² WFL:

- a. Skelettbau: 24,3m³
- b. Hybridkonstruktion: 28,2m³
- c. Massivbau: 31,9m³

Graphik 27:
Übergeordnete
Konstruktionsprinzipien:
a) Skelettbau.
b) Hybridkonstruktion.
c) Massivbau.

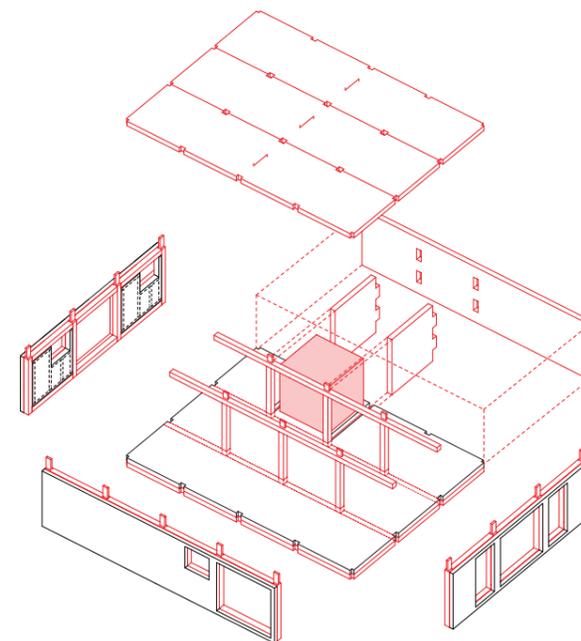
a)



Darüber hinaus fließen Parameter der verschiedenen Betrachtungsfelder, die im Kapitel 5 „Strukturelle Systementwicklung“ angesetzt wurden, in die Bewertung der Konstruktionsweisen ein. Darunter fallen die (Um-)Nutzbarkeit und Flexibilität des Gebäudes, Herstellungs- und Montageprozesse, insbesondere hinsichtlich des erreichbaren Grades der Vorfertigung, sowie die sortenreine Trennbarkeit und Wiederverwertbarkeit der Bauteile.

Auf Grundlage dieser Erwägungen wurde die Grundstruktur eines Skelettbaus mit Elementen einer Massivholzkonstruktion ergänzt (wie in Abb. 36 a) dargestellt), indem massive Brettsperrholzelemente als Decken und aussteifende Wände eingesetzt werden. Die vertikalen Lasten werden durch die Skelettstruktur aus den stabförmigen Elementen der Unterzüge und Stützen abgetragen, während Wand- und Deckenscheiben die horizontale Aussteifung gewährleisten. Für die nicht flexiblen, massiven Wandelemente bietet es sich in der Planung an, diese mit Nutzungsfunktionen zu verknüpfen und als Wohnungstrennwände oder an Erschließungs- und Installationskernen einzusetzen, während die offenere Skelettstruktur eine freie Grundrissgestaltung für die Wohnnutzung zulässt.

b)

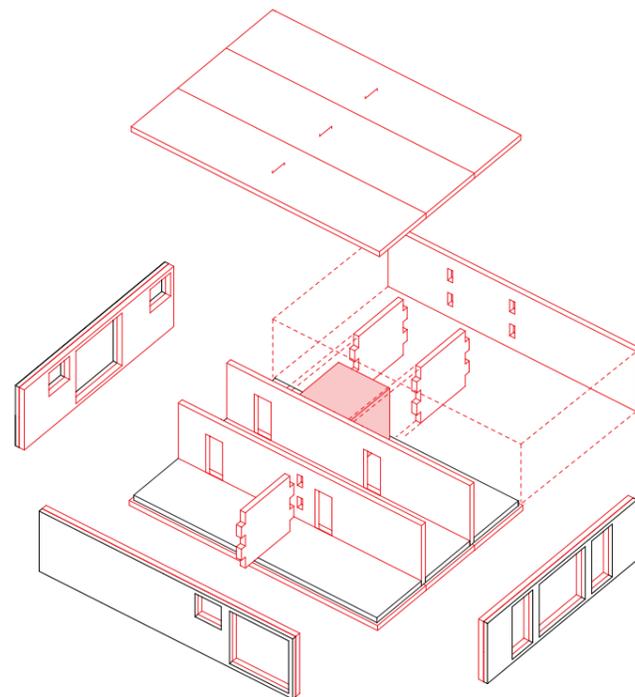


Zu berücksichtigen ist, dass an den Schnittstellen, an denen zum Beispiel eine tragende Stütze neben einer aussteifenden Wandscheibe anschließt, eine Redundanz im System entsteht. Die Wandscheibe könnte vertikal alle Lasten aufnehmen und somit nicht nur die Stütze, sondern auch den Träger ersetzen. In Hinblick auf eine größtmögliche Flexibilität wäre eine Ausführung des reinen Skelettbaus mit flexiblen Wänden und Decken wünschenswert, während hinsichtlich der Herstellungs- und Montageprozesse – und den damit verbundenen Kosten – eine funktionale Integration der Bauteile vorteilhafter ist.

Für den Ausbau mit nichttragenden Wänden und Fassaden werden Holztafel- und Holzrahmenbau eingesetzt. Diese Ständerbauweisen haben im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit Vorteile. Aufgrund der weiten Verbreitung gibt es große Produktionskapazitäten, die zu günstigen Preisen führen. Im mehrgeschossigen Wohnungsbau ist die Ausbildung eines leistungsfähigen und optimierten Holzskeletts mit Trennwänden und Fassaden aus Holztafeln somit eine wettbewerbsfähige Möglichkeit.

Die in dieser Forschung zentralen Fragestellungen zu den Auswirkungen auf die Umsetzung des Brandschutzes, Schallschutzes und der Anforderungen an die thermische Bauphysik bauen auf dieser gewählten Systemlösung auf.

c)



Bemessungsmodelle und Planungstool

Für die Dimensionierung der Tragelemente wurden Bemessungsmodelle hinsichtlich des Materialverbrauchs und der Flächenausnutzung abgeleitet. Dabei wurden verschiedene Lastfälle in Abhängigkeit von Gebäudedimensionen und Konstruktionsrastern, äußeren Lasteinwirkungen sowie Anforderungen an den Brandschutz berücksichtigt. Ergänzend wurden daraus weitere Berechnungsmodelle hinsichtlich des Materialverbrauchs und der Flächenausnutzung abgeleitet.

Diese Berechnungsmodelle wurden in ein Planungstool übertragen, mit dessen Hilfe PlanerInnen schon in einer frühen Projektphase verschiedene Konfigurationen der Tragstruktur des Bausystems erproben können.

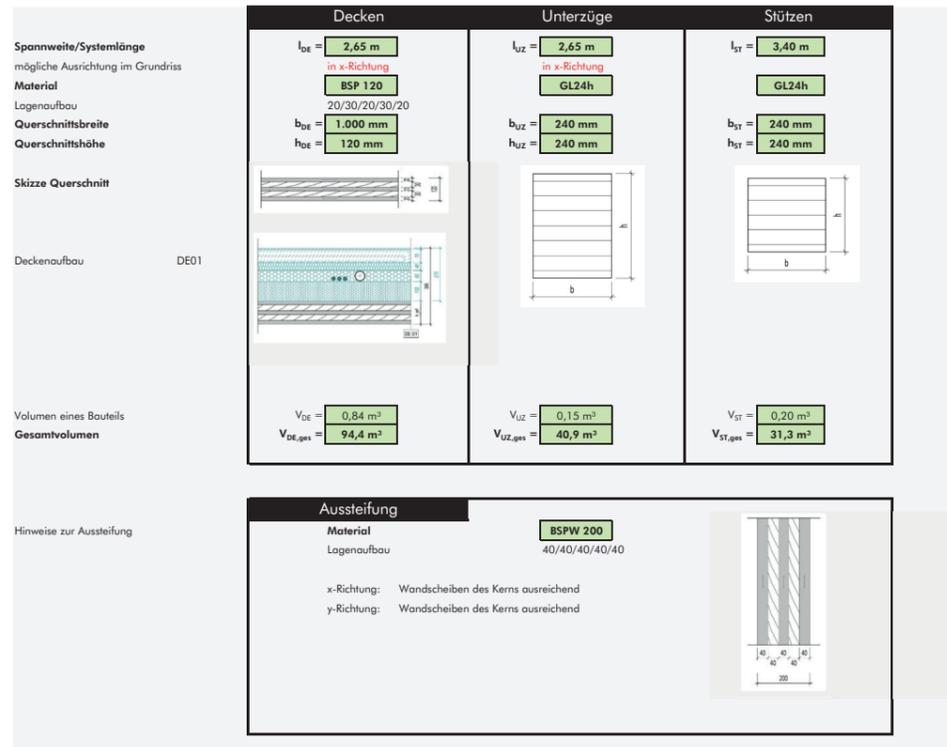
Auf Grundlage weniger Parameter des Projekts werden Lastfälle generiert und übergeordnete Anforderungen, insbesondere des Brandschutzes, definiert, die in die Dimensionierungen einfließen. Für alle im Planungstool hinterlegten Rastermaße werden daraus Holzmenngen und die entsprechende Materialeffizienz (Materialvolumen/m² BGF) ermittelt, die als erste Orientierung für weitere Planungsentscheidungen dient.

Die Auswahl eines geeigneten Rasters kann zusätzlich gegen nutzungsbedingte Anforderungen abgewogen werden, die ebenfalls im Planungstool abrufbar sind. So wird für die unterschiedlichen Raster die Flächeneffizienz beziehungsweise die Grundrissausnutzung durch verschiedene Wohnungsgrößen und Wohnnutzungen ermittelt. Beispielhaft werden die Abwägungen zu unterschiedlichen Rastergrößen hinsichtlich des Materialverbrauchs und der Flächeneffizienz in der Fallstudienbetrachtung dgj253 ‚Wohngruppe Mannheim‘ dargestellt.

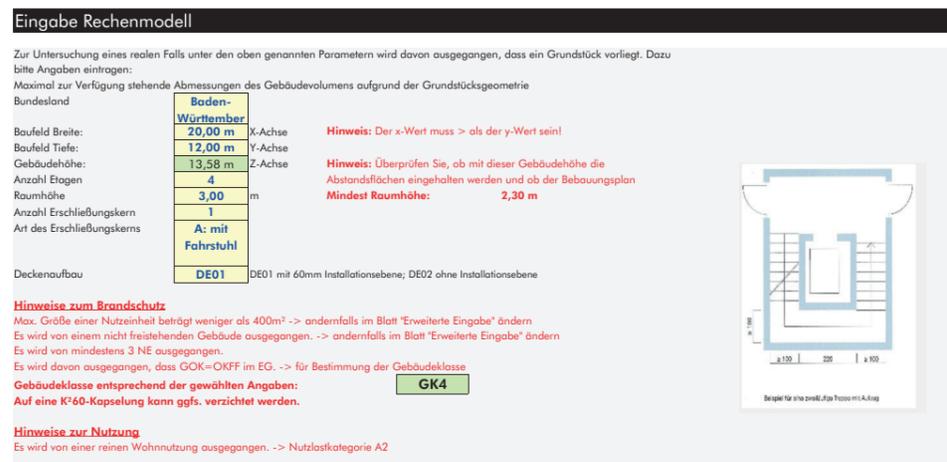
Je nach Rasterauswahl berechnet das Planungstool im nächsten Schritt die Dimensionen der einzelnen tragenden Elemente – der Deckenplatten, Unterzüge, Stützen und aussteifender Wandscheiben – sowie gebäudekundliche Eckdaten wie Gebäudeabmessungen, BGF und A/V-Verhältnis.

Im aktuellen Stadium ermöglicht das Planungstool, erste Einschätzungen zur Anwendbarkeit des Bausystems auf ein konkretes Bauvorhaben und zur Effizienz des Systems zu treffen. Die ermittelten überschlägigen Werte können als Orientierung im weiteren Planungsprozess herangezogen werden. Eine ausführliche statische Bemessung kann es jedoch nicht ersetzen. Vielmehr lassen sich einerseits verschiedene Varianten innerhalb des Systems schnell vergleichen und andererseits auch Grenzen der Anwendung aufzeigen.

Graphik 28: Eingabe der Gebäudeparameter und Berechnung der Holzvolumina im Planungstool, Primin Jung Deutschland GmbH und DGJ Architektur.



Graphik 29: Ergebnisfelder der Bauteilbemessung und Flächenermittlung im Planungstool, Pirmin Jung Deutschland GmbH und DGJ Architektur.



Lokales Tragwerk – Ausbildung der Verbindungsdetails

Das lokale Tragwerk umfasst alle Anschlussdetails zwischen den verschiedenen Tragelementen, die sich im Allgemeinen auf die stabförmigen Elemente, Stützen und Träger, und die flächigen Massivholzelemente der Decken und aussteifenden Wände beschränken.

Für die Entwicklung der sortenreinen, form- und kraftschlüssigen Verbindungen wurde zur ersten Orientierung auf traditionelle Zimmereitechniken zurückgegriffen. Sowohl im historischen Holzbau in Europa als auch insbesondere in Asien lassen sich, wie weiter oben erläutert, bewährte Konstruktionsweisen finden, die einen eindrücklichen Nachweis über die statische Leistungsfähigkeit von geometrischen Holzverbindungen liefern.

Im modernen Holzbau bestehen nun zusätzliche Herausforderungen, da die Konstruktionen höheren Anforderungen – sowohl statisch als auch brand- und schallschutztechnisch – gerecht werden und darüber hinaus wirtschaftlich konkurrenzfähig sein müssen. Diese beiden Voraussetzungen können traditionelle Methoden nicht erfüllen. Gleichzeitig bieten moderne, digital gesteuerte Fertigungsverfahren neue Chancen für die Präzision und Passgenauigkeit der Elemente.

Der Ansatz bei der Entwicklung der Tragwerksdetails war daher, die traditionellen Techniken auf moderne Herstellungs- und Montagetechniken zu übertragen und die Fügungsprinzipien entsprechend anzupassen.

Daraus ergaben sich zwei verschiedene Ansätze, die im Folgenden jeweils näher erläutert werden:

- Die Integration der Fügungselemente in die Bauteilgeometrie.
- Die Herstellung form- und kraftschlüssiger Verbindungen durch zusätzliche Holzverbindungsmitel.

Bauteilintegrierte Fügung

Das Prinzip der bauteilintegrierten Fügung basiert auf dem Ansatz, alle Anschlüsse durch geometrische Verschneidung der Bauteile herzustellen. Durch die präzise Passung der Bauteile im Montageprozess wird der Form- und Kraftschluss in den Anschlüssen erzeugt.

Auf diese Weise ließe sich die Herstellung der Verbindungen bereits vollständig in den Abbund der Bauteile integrieren. Mit Hilfe von CNC-Abbundtechnologien lassen sich auch komplexere Geometrien umsetzen. Die Montageprozesse können vereinfacht werden, indem die Bauteile als Baukasten- bzw. Stecksystem zu begreifen sind und die handwerklichen Arbeitsschritte auf der Baustelle auf ein Minimum beschränkt werden, da keine zusätzlichen Verbindungsmittel eingebracht werden müssen.

In den ersten Entwicklungsschritten beschränkte sich das Fügungsprinzip auf nur zwei Verbindungsarten. Zum einen ausgefräste Schwalbenschwanzverbindungen, mit denen Träger an Stützen bzw. Deckenelemente an den Trägern einklinken werden. Zum anderen zusätzliche Zapfenverbindungen, die für die Trägereauflager an den Stützen eingesetzt werden (Abb. 39).

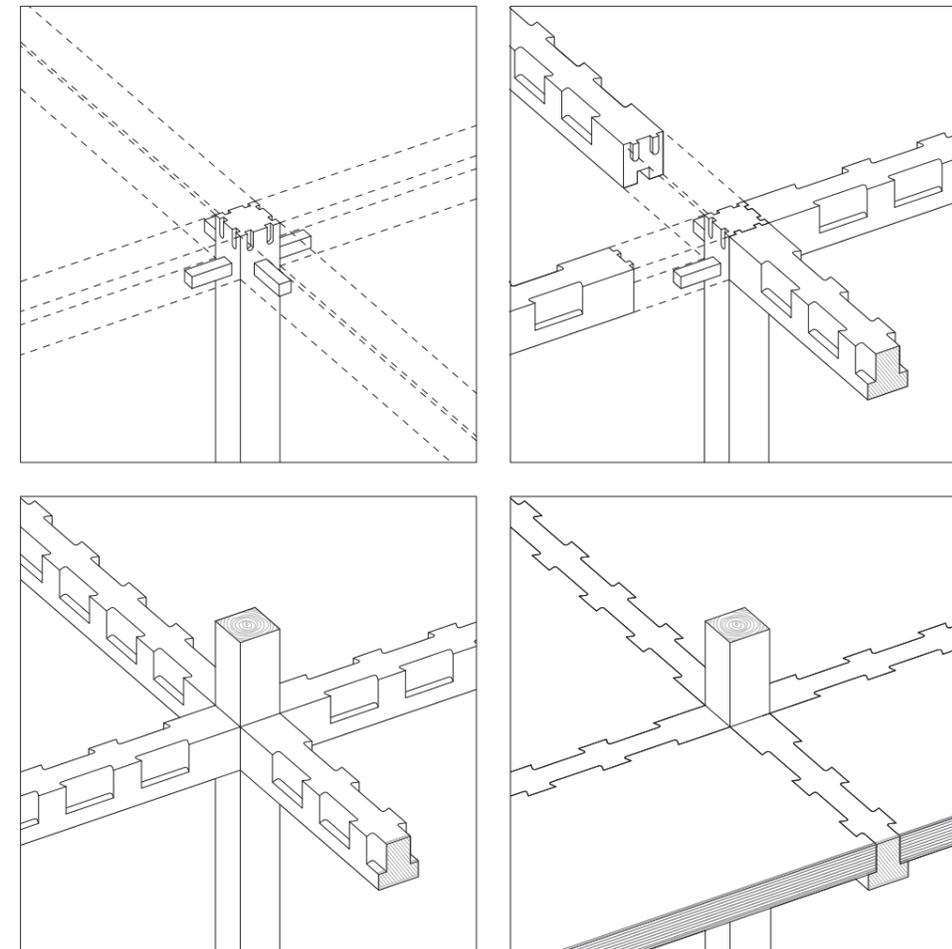
Dabei ist zu beachten, dass diese Art der Fügung ein hohes Maß an Präzision in der Fertigung erfordert und kaum Montagetoleranzen zulässt, die im Holzbau im Vergleich zu anderen Bauweisen ohnehin wesentlich geringer sind. Auch wenn digitale Fertigungstechniken diese Präzision nahezu problemlos erreichen, ziehen die Komplexität sowie die Anzahl der auszubildenden Anschlüsse einen erhöhten Produktionsaufwand nach sich.

Zudem nehmen bei der Ausführung rein geometrischer, kraftschlüssiger Verbindungen die Bemessungen der Tragelemente und der Anschlussdetails gegenseitigen Einfluss aufeinander, da die in den Knotenpunkten auftretenden Kräfte nicht durch zusätzliche Verbindungsmittel aufgenommen werden können. Diese Kräfte wirken sich daher direkt auf die Dimensionierung der Tragelemente aus, was im Ausführungsprozess besonders zu beachten ist.

Demonstrationsbau – Bauteilintegrierte Fügung

Für das Modellvorhaben ‚dgi223 Collegium Academicum‘ wurde ein Demonstrationsbau errichtet, an dem die räumliche Qualität und Nutzbarkeit des Bausystems vermittelt werden sollte. Der Demonstrationsbau setzt sich aus zwei Rastermodulen des Bausystems zusammen und bildet somit beispielhaft ein Privatzimmer in dem damals noch in Planung befindlichen Studierendenwohnheim ab.

Zusätzlich ließ sich im Zuge dessen erproben, wie sich das Prinzip der bauteilintegrierten Fügung in der praktischen Anwendung auf Herstellungs- und Montageprozesse übertragen lässt.



Graphik 30:
Schematische Darstellung der
bauteilintegrierten Fügung,
Anschluß Träger an Stützen.

Die zuvor beschriebenen, rein geometrischen Verbindungen wurden in der Ausführung des Demonstrationsbaus an verschiedenen Stellen abgewandelt. Der Anschluss der Decken- beziehungsweise Boden-Platten an die angrenzenden Träger wurde nicht durch einzeln ausgefräste Verbindungen, sondern durch ein Auflager in einer Ausklinkung über die gesamte Länge der Träger hergestellt. Die Träger wurden wiederum durch Zapfenverbindungen an die Stützen angeschlossen. Da als Wandelemente im Demonstrationsbau ausschließlich massive BSP-Scheiben eingesetzt wurden, kam als zusätzlicher Fügepunkt der Anschluss der Wände an Stützen hinzu. Dieser wurde mit einer Nut-Feder-Verbindung gelöst. Ein zusätzlicher Anschluss der Wände an Decken oder Unterzüge wurde nicht vorgesehen.

Trotz der weitestgehenden Vorfertigung der Bauteile im CNC-Abbund zeigte sich, dass die Montage nach dem Prinzip eines Stecksystems mit einem erhöhten Aufwand verbunden ist. Grundsätzlich konnten die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der reinen Holzverbindungen in kleinem Maß-

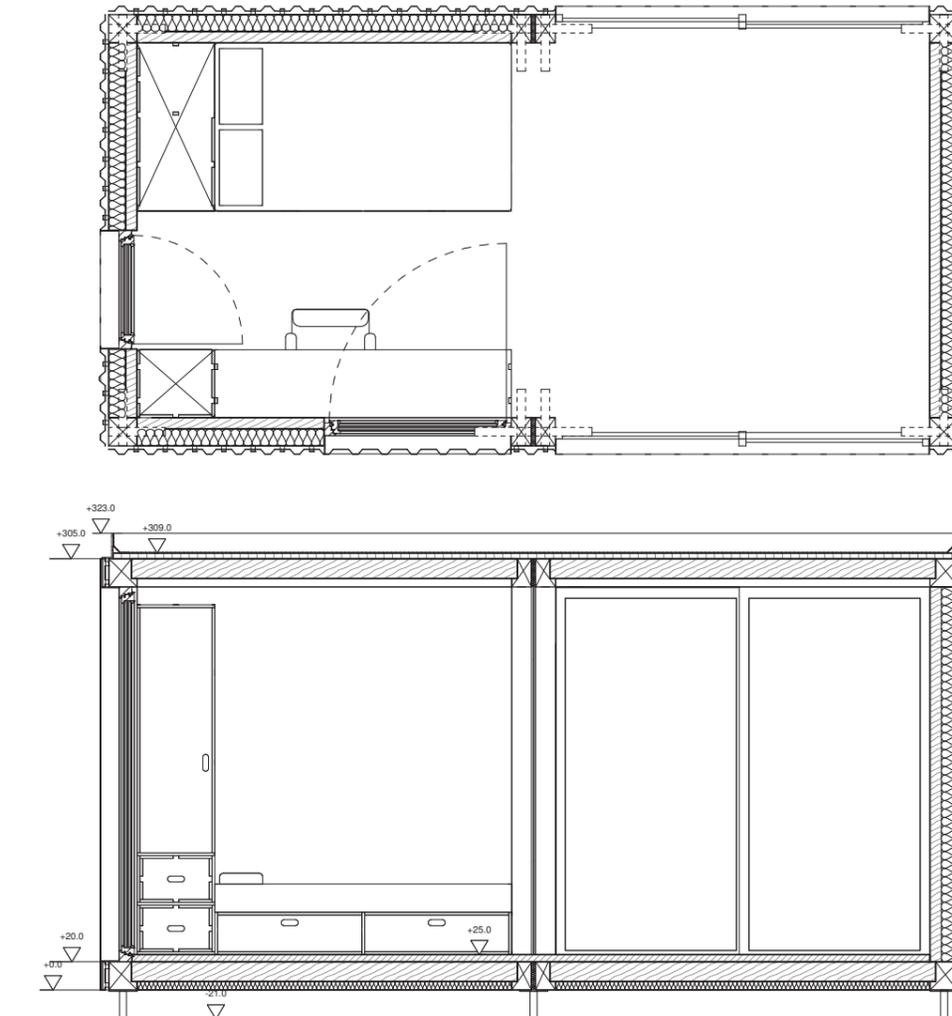
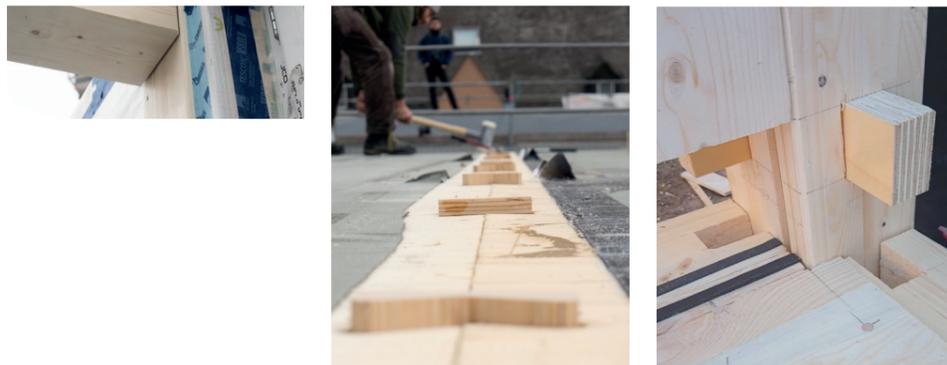
stab nachgewiesen werden. Die Herstellung der form- und kraftschlüssigen Verbindungen musste allerdings größtenteils handwerklich erfolgen. Damit zeigte sich, dass diese Ausführungsvariante nicht für die Umsetzung in größerem Maßstab praktikabel wäre. Vor allem durch das hohe Maß der Präzision kommt es immer wieder zu Verzögerungen im Montageablauf, sobald Toleranzen nur minimal überschritten werden.

Bauteilfügung durch Holz-Verbindungsmitel

Alternativ zum Kraftschluss durch geometrische Verschneidung der Bauteile wurde der Ansatz untersucht, die aneinandergrenzenden – aber räumlich getrennten - tragenden Bauteile durch das Einbringen zusätzlicher Verbindungsmittel zu verbinden. Im Gegensatz zu den im modernen Holzbau gängigen Stahlverbindungsmittel wird hier ausschließlich auf Holzverbindungsmitel zurückgegriffen.

Die Fügungen können somit mit einer geringeren Komplexität hergestellt werden, wodurch sich auch der Aufwand im Abbund verringert. Im Abbund werden die Bauteile mit Vorbohrungen und Ausfräsungen versehen, in die bauseits Verbindungsmittel eingebracht werden können und dadurch den Form- und Kraftschluss herstellen. Somit lassen die Abschlusspunkte etwas höhere Toleranzen zu.

Abbildung 15:
Links: Nut-Feder-Verbindung zwischen Wand und Stütze.
Mitte: Deckenaufleger.
Rechts: Zapfenverbindung zwischen Stützen und Trägern.



Graphik 31:
Grundriss (oben) und Schnitt (unten) des Demonstrationsbaus, Maßstab 1:50.



Abbildung 16:
Transportmodul des Demonstrationsbaus oder auch „Demonstrators“ am Collegium Academicum.

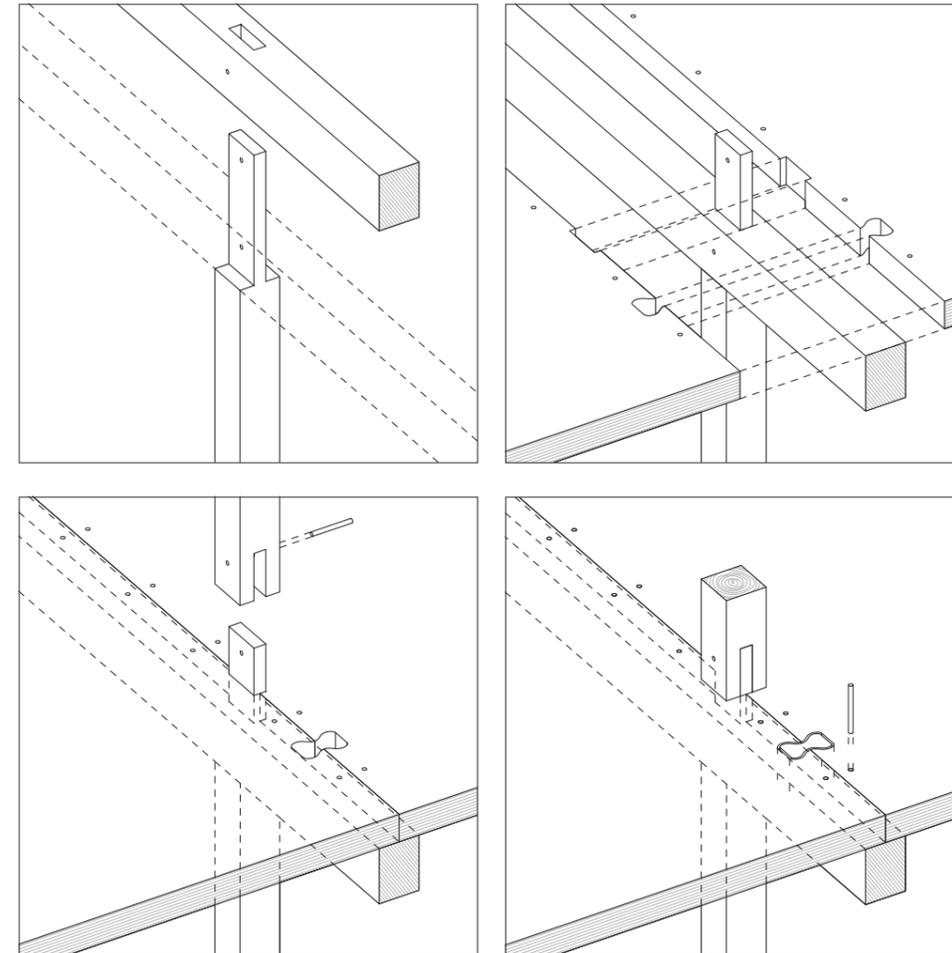
Musterdetails – Holzverbindungenmittel

Die Anwendung der Holzverbindungenmittel wurde anhand von zwei prototypischen Musterstücken erprobt. Die untersuchten Ausschnitte entsprechen den Anschlusspunkten zwischen Decke, Unterzug und aussteifender Wand sowie dem Knotenpunkt am Geschossübergang zwischen zwei Stützen mit Unterzug und Deckenelementen. Als Verbindungsmittel wurden in den Detailversuchen Hartholzdübel aus Buchenholz sowie sogenannte X-Fix-Verbinders verwendet (exemplarisch in Abbildung 17 gezeigt).

Mit dem Musterdetail zwischen Deckenelement, Unterzug und Wandscheibe wurden zwei verschiedene Anschlusslösungen untersucht, die auch unabhängig voneinander beziehungsweise an anderen Stellen im Bausystem zum Einsatz kommen können.

Der Anschluss zwischen Wand und Unterzug erfolgt durch das Einschlagen der X-Fix-Verbinders im Abstand von 400mm. Diese zweiteiligen, schwalbenschwanzförmigen Dübel ziehen die Tragelemente dicht zusammen und ermöglichen eine zug- und schubsteife Verbindung. Dasselbe Prinzip wird auch für den seitlichen Anschluss der Wandelemente an Stützen sowie die Verbindung von Deckenelementen untereinander vorgesehen.

Zur Lagesicherung der Deckenelemente auf den Unterzügen werden Buchendübel in zwei versetzten Reihen eingeschlagen. Diese Verbindungen werden sowohl bei über mehrere Rasterfelder durchlaufenden Decken als auch bei über dem Unterzug liegenden Elementstößen eingesetzt.



Graphik 32:
Schematische Darstellung
der Fügung mit
Holzverbindungenmitteln,
Anschluß Träger an Stützen.

Im Knotenpunkt am Geschossübergang zwischen zwei Stützen wurde eine komplexere Anschlusslösung erprobt. Die Verbindung der Stützen, die sowohl Druck- als auch Zugkräfte aufnehmen soll, erfolgt durch eine Furnierschichtholz-Lasche, die in die eingeschlitzten Stützen eingesteckt wird. Die FSH-Lasche durchstößt auch den Unterzug und die Ebene der Deckenelemente, in denen jeweils entsprechende Aussparungen ausgefräst wurden.

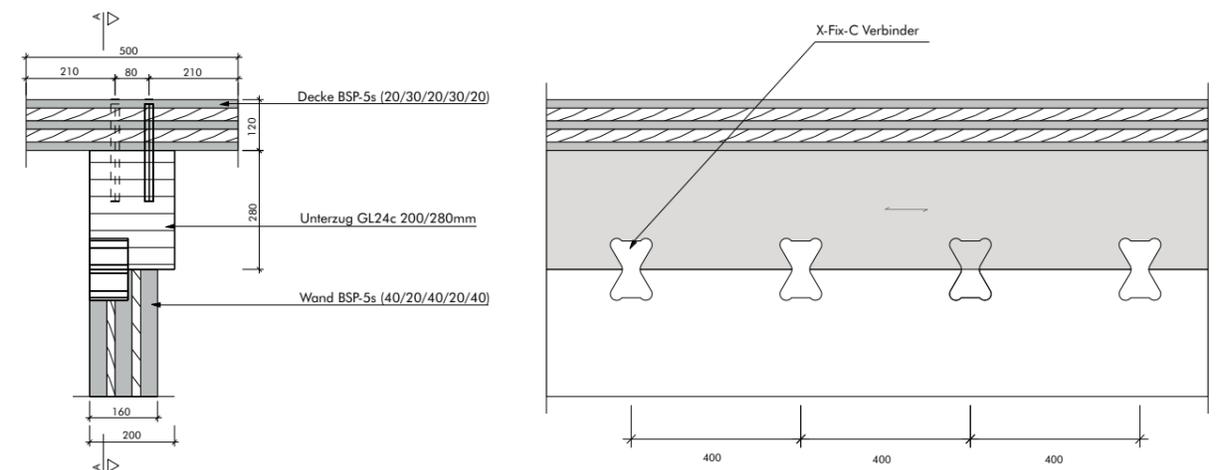
Die Fixierung der Verbindung erfolgt mit Buchendübeln, die quer durch die Stütze und FSH-Lasche geschlagen werden. Zusätzlich wurde an den Enden der Lasche ein Hartholzapfen als Lastverteiler in die Stützen eingebracht.

Die Verbindung der Deckenelemente sowie ihre Fixierung auf dem Unterzug erfolgt, wie zuvor beschrieben, durch X-Fix-Verbinder und Buchendübel.

Im Fokus lagen sowohl die Umsetzbarkeit der Herstellung im automatisierten Abbund als auch die Praktikabilität der Verbindungen im Montageprozess. Dabei konnten erste überschlägige Abschätzung zum jeweiligen Zeitaufwand gemacht werden. Während die zusätzlichen Bearbeitungsschritte im Abbund einen höheren Aufwand nach sich ziehen, kann davon ausgegangen werden, dass dieser sich durch die Reduktion der herzustellenden Verbindungen in der Montage ausgleicht. Zudem ist zu berücksichtigen, dass durch die weitgehende Automatisierung lediglich die Betriebszeiten- und kosten der Maschinen zum Tragen kommen. Andererseits erfolgte die Montage bisher ausschließlich manuell, wodurch ein höherer Arbeitsaufwand entsteht.

Allgemein erwiesen sich das Fügungsprinzip und die Holzverbindungs-mittel im Hinblick auf Funktionalität und Leistungsfähigkeit als praktikable Alternativen zu konventionellen Bauweisen mit Stahlverbindungen. Entscheidende Nachteile gegenüber diesen konnten aus den Detailversuchen nicht abgeleitet werden.

Abbildung 17:
X-Fix-C Verbinder (Quelle:
Schilcher Trading &
Engineering GmbH, <http://www.x-fix.at/de/x-fix-c/>)..



Graphik 33:
Musterdetail, Anschluss
zwischen Deckenelement,
Unterzug und aussteifender
Wand .

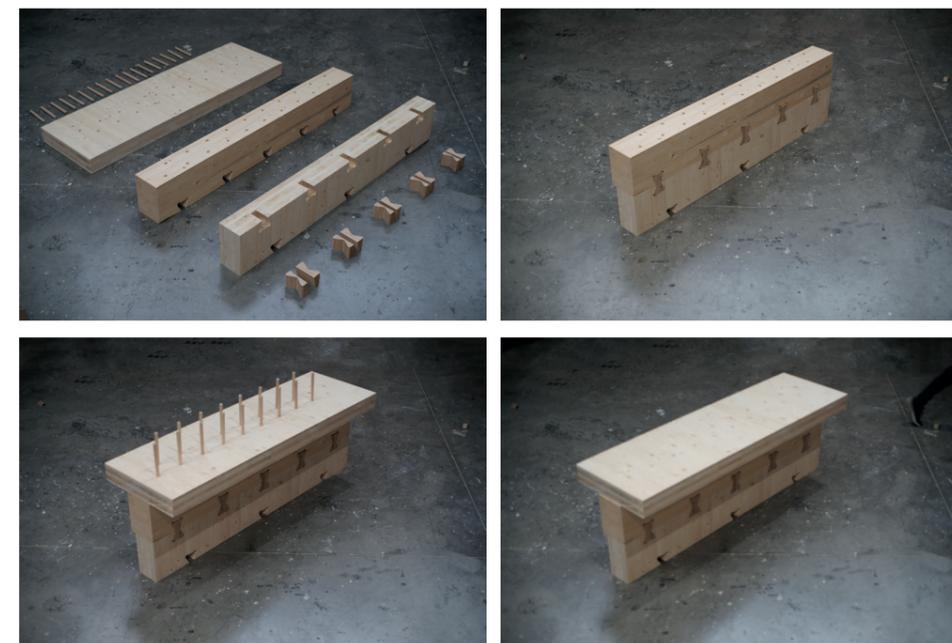


Abbildung 18:
Montageschritte für
den Anschluss zwischen
Deckenelement, Unterzug und
aussteifender Wand.

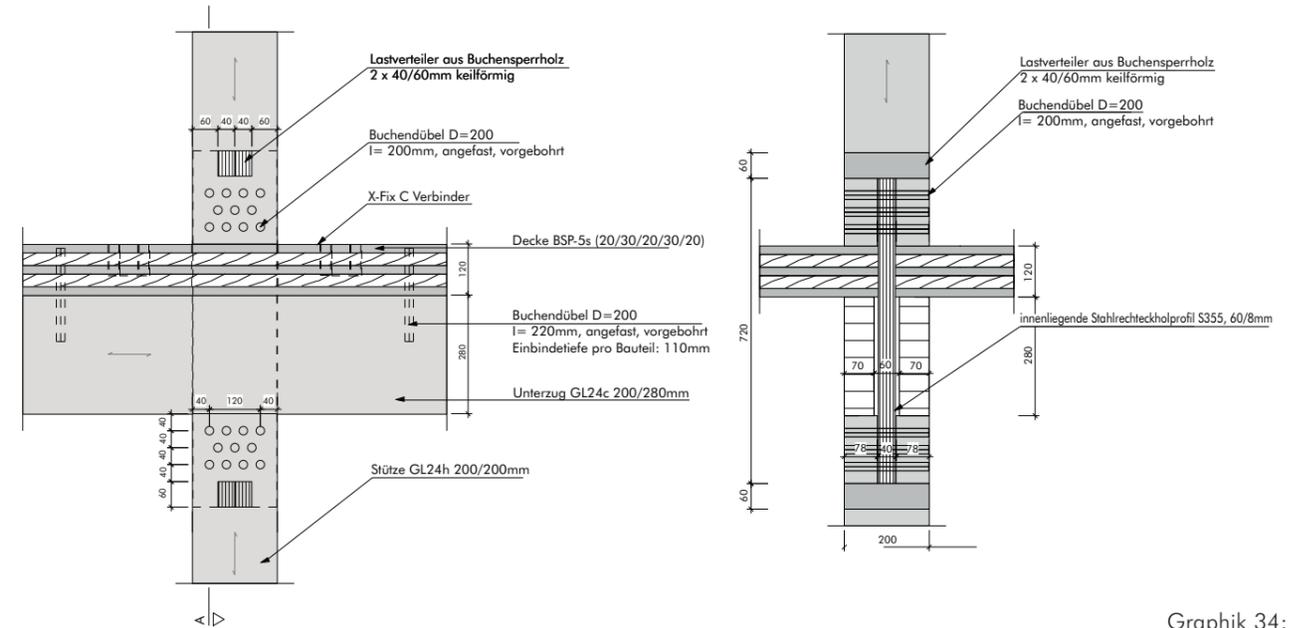
Tragwerksdetails im Modellvorhaben ‚Collegium Academicum‘

Das Modellvorhaben ‚dgi223 Collegium Academicum‘ wurde in Heidelberg, Baden-Württemberg, realisiert und Anfang 2023 als Studierendenwohnheim in Betrieb genommen. Hier war ein weitreichender Einsatz freiliegender Tragelemente aus Holz möglich (eine nähere Erläuterung dazu im Kapitel ‚6.2. Brandschutz‘). Somit sind die Tragelemente und Anschlüsse erhöhten Belastungen ausgesetzt und werden dementsprechenden dimensioniert.

Das Gebäude wird durch die durchgängige Trennung der Konstruktion zwischen Nutzungseinheiten in statisch unabhängige Abschnitte unterteilt. Da die Erschließung über einen der Holzkonstruktion vorgelagerten und somit nicht aussteifenden Laubengang erfolgt, müssen die einzelnen, statischen Einheiten des Bausystems alle Lastenwirkungen gleichermaßen aufnehmen können.

Dies wirkt sich vor allem auf die Aussteifung gegen horizontale Lasten aus, die zunächst von den Deckenscheiben aufgenommen werden. Wie im Abschnitt zu den ‚Musterdetails – Holzverbindungsmitel‘ dargestellt, werden die einzelnen Deckenelemente zu schubsteifen Scheiben verbunden. Die Schubkräfte werden in die darunterliegenden Unterzüge beziehungsweise aussteifenden Wandscheiben übertragen, die (hier in x-Richtung) im Bereich der Wohnungstrennwand und der Außenwand und (in y-Richtung) als tragende Wohnungsinnenwände (um einen Installations-/Sanitärkern) angeordnet sind. Aus den Wänden werden die Lasten ebenfalls durch Holzverbinder (X-Fix) in die Stützen übertragen. Dadurch wirken auf diese Stützen sowohl Druck- als auch Zuglasten, die in der Ausbildung der Knotendetails am Geschossübergang und Bodenanschluss berücksichtigt werden müssen.

In der Übersicht Graphik 38 werden alle für das Bausystem relevanten, tragenden Bauteile und ihre Anschlüsse dargestellt. Exemplarisch werden allein druckbelastete sowie druck- und zugbelastete Bauteilanschlüsse im Detail gezeigt.



Graphik 34: Knotenpunkt zwischen Stützen, Unterzug und Deckenelementen am Geschossübergang.

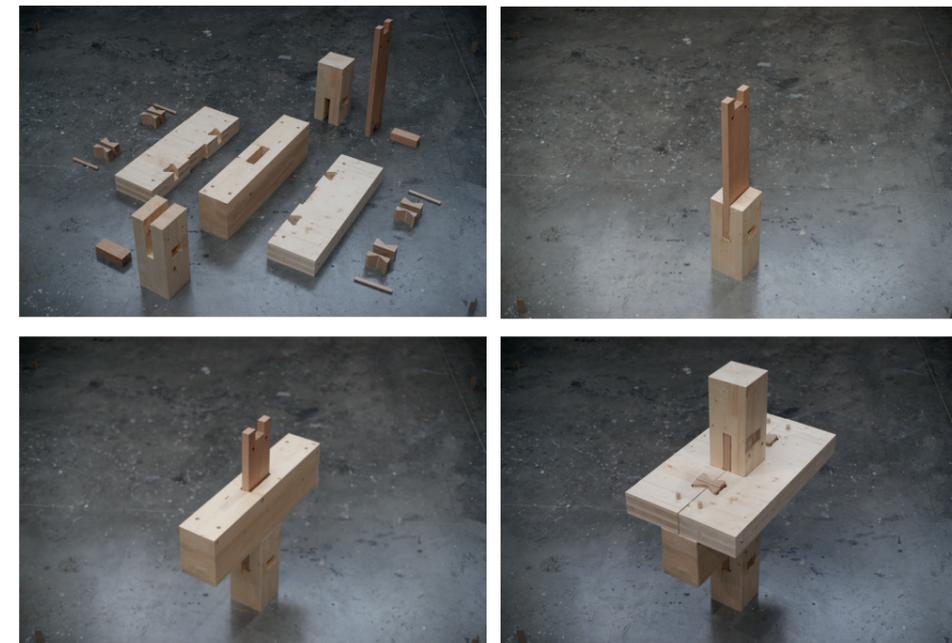


Abbildung 19: Montageschritte für den Knotenpunkt zwischen Stützen, Unterzug und Deckenelementen am Geschossübergang.

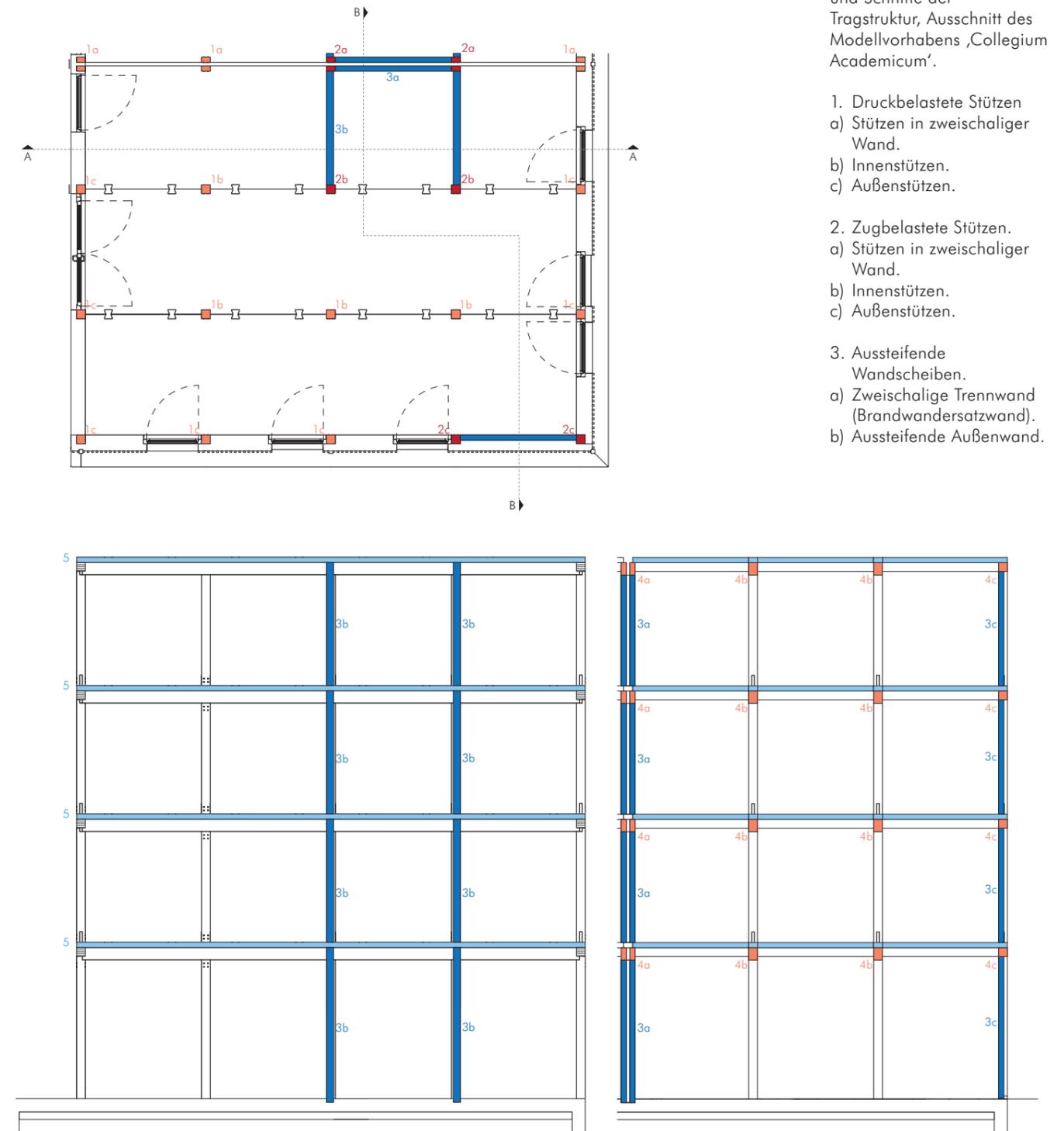
Tragwerksdetails im Modellvorhaben ‚Collegium Academicum Heidelberg‘

Das Modellvorhaben ‚Collegium Academicum‘ wird in Baden-Württemberg realisiert, wodurch ein weitreichender Einsatz freiliegender Tragelemente aus Holz möglich ist. (Eine nähere Erläuterung dazu findet sich im Kapitel ‚6.2. Brandschutz‘.) Somit sind die Tragelemente und Anschlüsse erhöhten Belastungen ausgesetzt und werden dementsprechend dimensioniert.

Das Gebäude wird durch die durchgängige Trennung der Konstruktion zwischen Nutzungseinheiten in statisch unabhängige Abschnitte unterteilt. Da die Erschließung über einen der Holzkonstruktion vorgelagerten und somit nicht aussteifenden Laubengang erfolgt, müssen die einzelnen statischen Einheiten des Bausystems alle Lastenwirkungen gleichermaßen aufnehmen können.

Dies wirkt sich vor allem auf die Aussteifung gegen horizontale Lasten aus, die zunächst von den Deckenscheiben aufgenommen werden. Wie im Abschnitt ‚1.1.2.3.4 Musterdetails – Holzverbindungsmitel‘ dargestellt werden die einzelnen Deckenelemente zu schubsteifen Scheiben verbunden. Die Schubkräfte werden in die darunterliegenden Unterzüge bzw. Aussteifende Wandscheiben übertragen, die (hier in x-Richtung) im Bereich der Wohnungstrennwand und der Außenwand und (in y-Richtung) als tragende Wohnungstrennwände (um einen Installations-/Sanitärkern) angeordnet sind. Aus den Wänden werden die Lasten ebenfalls durch Holzverbinder (X-Fix) in die Stützen übertragen. Dadurch wirken auf diese Stützen sowohl Druck- als auch Zuglasten, die in der Ausbildung der Knotendetails am Geschossübergang und Bodenanschluss berücksichtigt werden müssen.

In der Übersicht werden alle für das Bausystem relevanten tragenden Bauteile und ihre Anschlüsse dargestellt. Exemplarisch werden allein druckbelastete sowie druck- und zugbelastete Bauteilanschlüsse im Detail dargestellt.

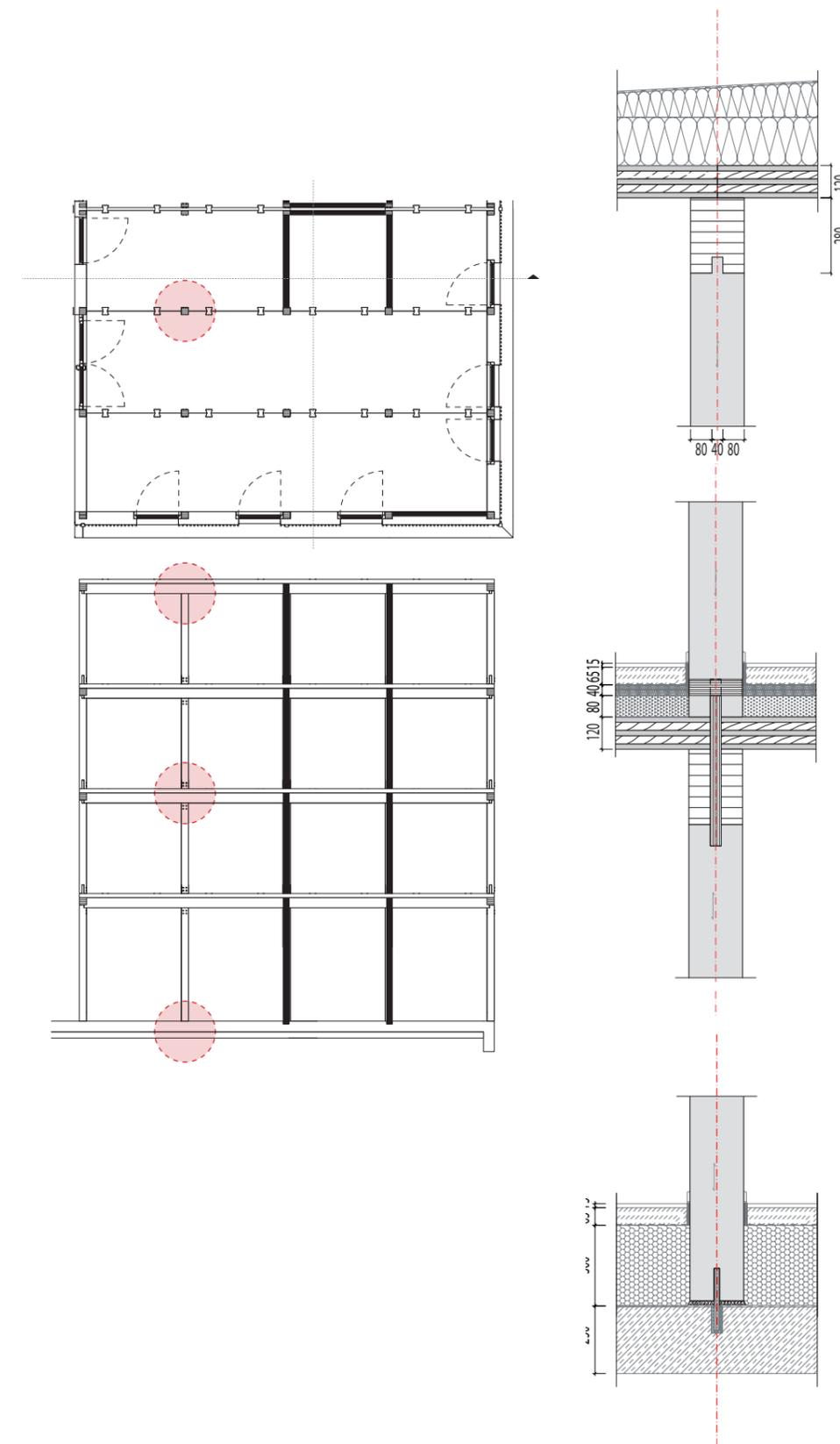


Druckbelastete Innenstützen

Zur Ableitung der vertikalen Punktlasten in die Fundamente bedarf es in erster Linie der Lagesicherung der druckbelasteten Stützen. Am Fundamentanschluss erfolgt dies über einen in die Bodenplatte eingelassenen Holzdübel, der nach dem Einstellen der Stütze mit hochfließfähigem Mörtel vergossen wird. Zum Ausgleich von Unebenheiten wird ein Mörtelbett unter der Stütze vorgesehen.

An den Geschossübergängen kommen je nach Lastfall verschiedene Möglichkeiten des Übertrags in Frage. Bei geringeren Lasten kann ein direkter Stoß zwischen den Stützen durch die Ausbildung eines Schwertes (an der unteren Stütze) und eines Zapfens installiert werden. Bei höheren Lasten (in den unteren Geschossen) werden ein Lastverteiler und eine Lasche aus Hartholz (Buchensperrholz) in die Stützen eingebracht und letztere mit zwei Holzdübeln je Stütze fixiert (s. zugbelastete Stützen).

Am Dachanschluss ist die Ausbildung einer Zapfenverbindung an den Unterzug ausreichend.



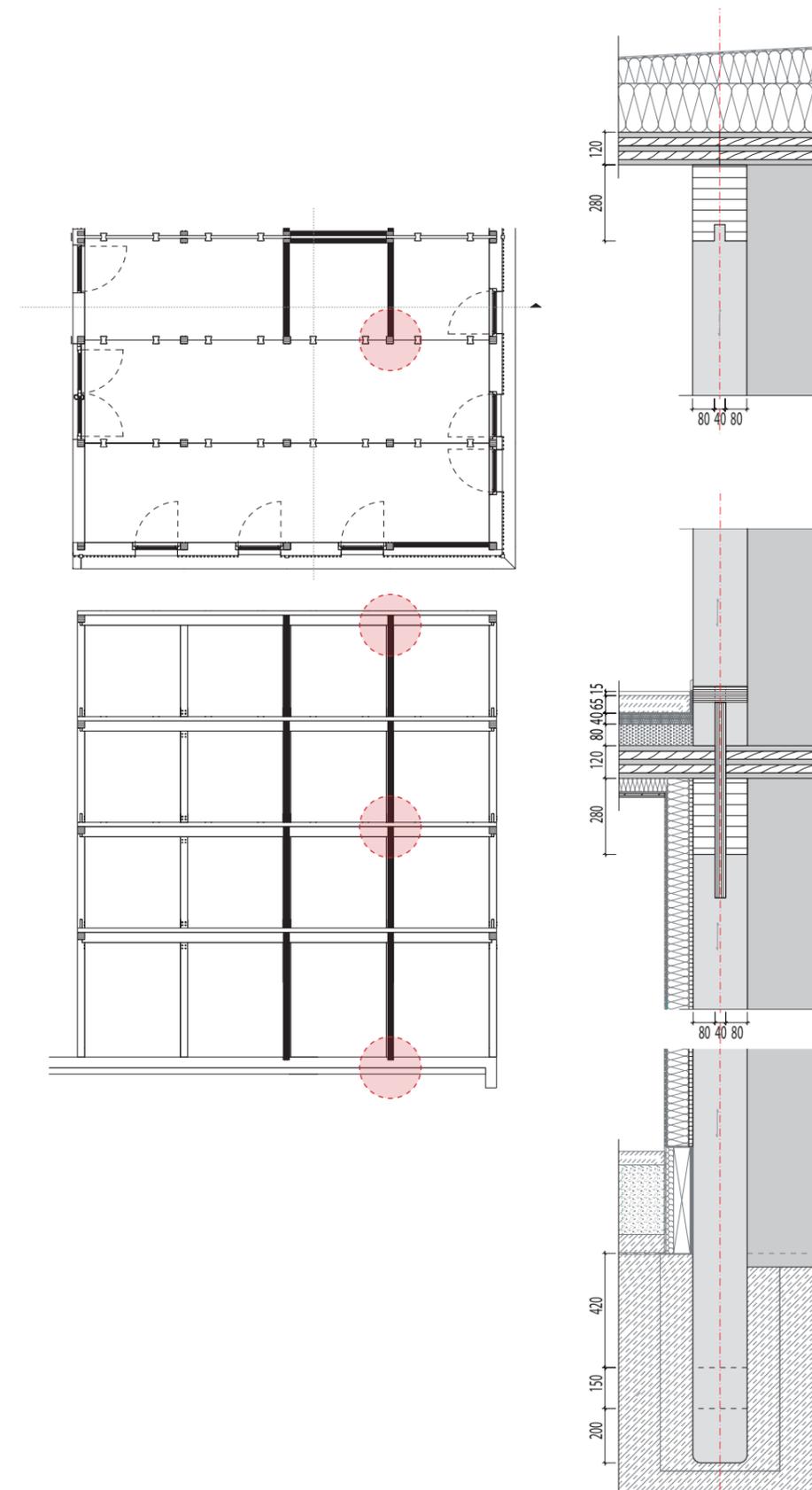
Graphik 36:
Positionen und Details
druckbelasteter Innenstützen
– Bodenanschluss,
Geschossübergang,
Dachanschluss.

Zugbelastete Innenstützen

Für die Aufnahme von Zugkräften müssen die Stützen im Fundament verankert werden. Dies erfolgt durch das Vergießen der verlängerten und mit einer Beschichtung (gemäß abZ) versehenen Stützen in einem Köcherfundament. Zur Verankerung werden an den Stützen 150mm breite Kerben ausgefräst.

An Geschossübergängen werden in Abhängigkeit der Lasten längere Hartholzlaschen in die eingeschlitzten Stützen eingelegt und mit einer entsprechenden Anzahl Holzdübel fixiert. Zur Überleitung der Druckkräfte wird in einer oder beiden Stützen ein Lastverteiler eingebracht. (vgl. 1.1.2.3.4

Musterdetails – Holzverbindungsmitel) Am Dachanschluss ist auch hier die Ausbildung einer Zapfenverbindung an den Unterzug ausreichend, da die Zugkräfte aus der Verbindung zur anschließenden aussteifenden Wand entstehen



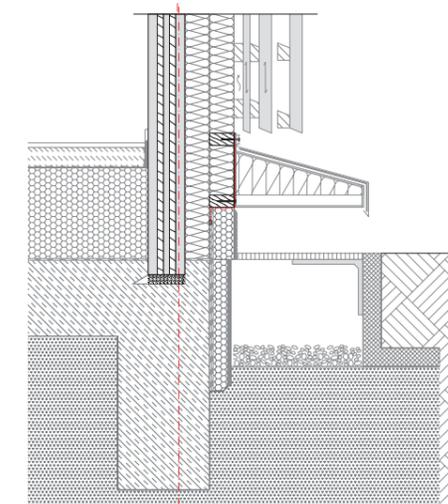
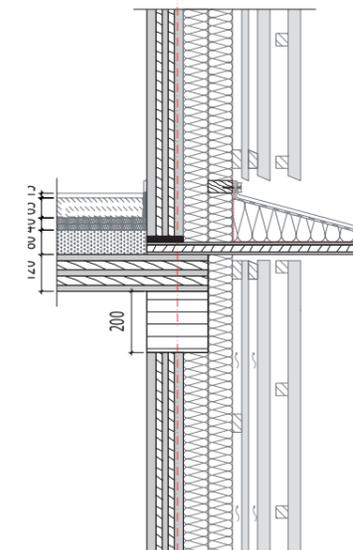
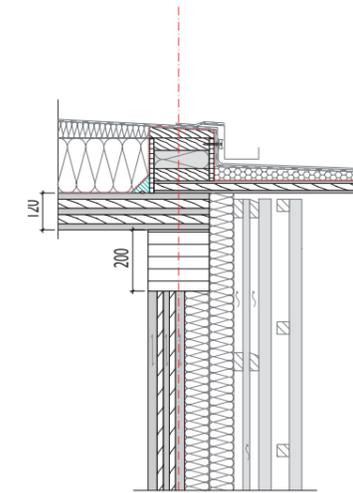
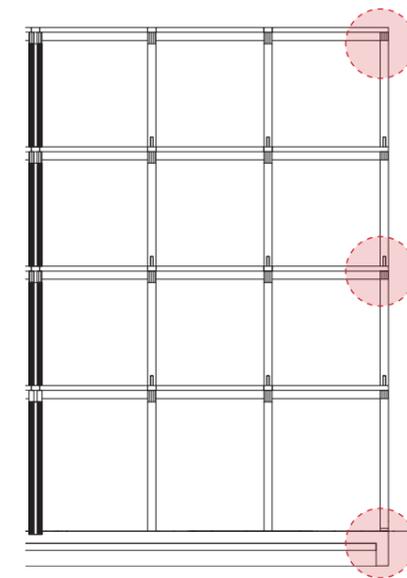
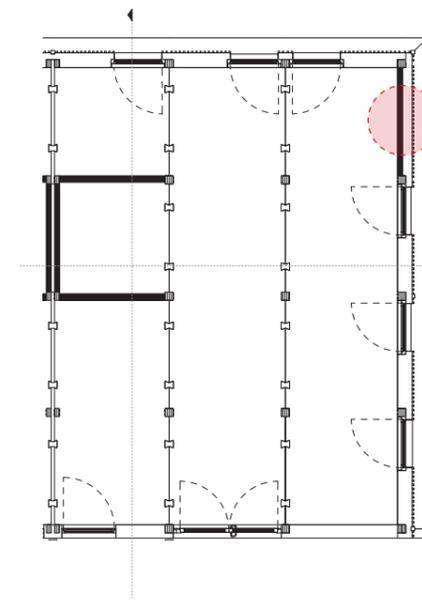
Graphik 37:
Positionen und Details
zugbelasteter Innenstützen
– Bodenanschluss,
Geschossübergang,
Dachanschluss.

Aussteifende Außenwände

Die aussteifenden Außenwände werden in das Fundament beziehungsweise die Bodenplatte eingestellt. Zur schubsteifen Verbindung werden Kerfen/Schubnocken an der Unterseite der Wände und entsprechende Aussparungen im Fundament ausgebildet. Diese werden abschließend mit Mörtel vergossen.

Am Geschossübergang werden die Wände oben und seitlich an die Randunterzüge und Stützen mit X-Fix-Verbindern angeschlossen. Für den unteren Anschluss an die Deckenplatte ist daher keine weitere Lagesicherung notwendig. An der Auflagefläche kann daher, in erster Linie zu Schallschutzzwecken, eine elastische Schicht zur Schwingungsdämpfung (zum Beispiel Polyurethan) eingebracht werden.

Der Dachanschluss wird analog zum oberen Deckenanschluss ausgeführt (s.a. Graphik 38 'Übersicht Musterdetails – Holzverbindungsmitel').



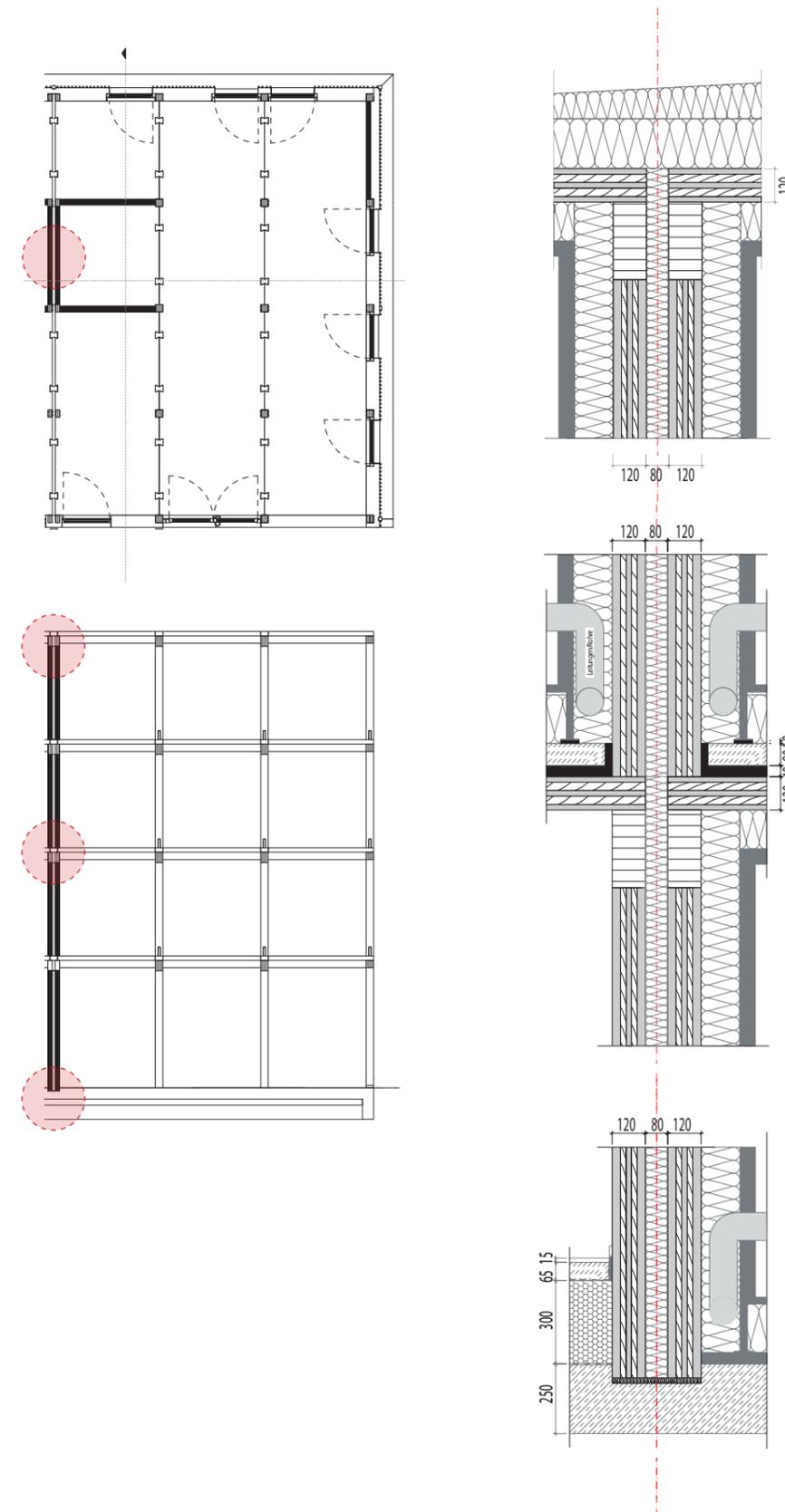
Graphik 38:
Positionen und Details
aussteifender Außenwände
– Bodenanschluss,
Geschossübergang,
Dachanschluss.

Aussteifende Wohnungstrennwände

Die aussteifenden Wände im Bereich der Wohnungstrennwände (und analog dazu auch Brandwandersatzwände) werden aus zwei getrennten massiven Elementen gebildet, die statisch unabhängig voneinander sind. Sie bilden jeweils den Abschluss einer statischen Einheit des Bausystems im Modellvorhaben und erfüllen somit die gleichen statischen Anforderungen wie die aussteifenden Außenwände.

Die Prinzipien der Bauteilanschlüsse sind daher dieselben, also schubsteife Verbindungen an Stützen und Unterzüge sowie die Ausbildung von Schubnocken am Anschluss an die Bodenplatte.

Die angrenzenden aussteifenden Innenwände (s. Abbildung 20: Schematischer Grundriss und Schnitte der Tragstruktur) unterscheiden sich darin, dass sie direkt an die Unterseite der Deckenelemente stoßen. Der Anschluss zwischen Decke und Wand wird hier durch Holzdübel hergestellt.



Graphik 39:
Positionen und
Details aussteifender
Wohnungstrennwände
– Bodenanschluss,
Geschossübergang,
Dachanschluss.

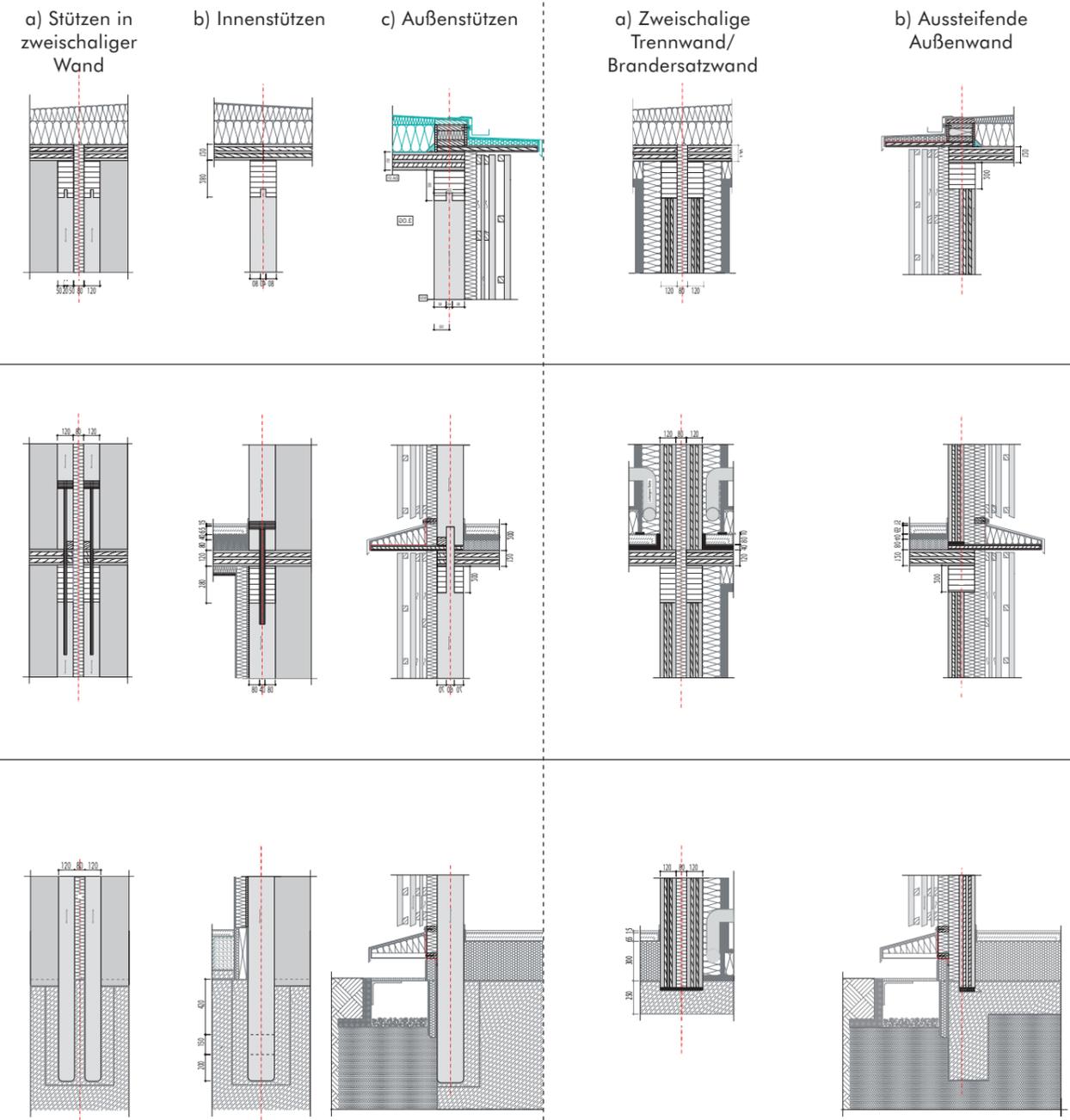
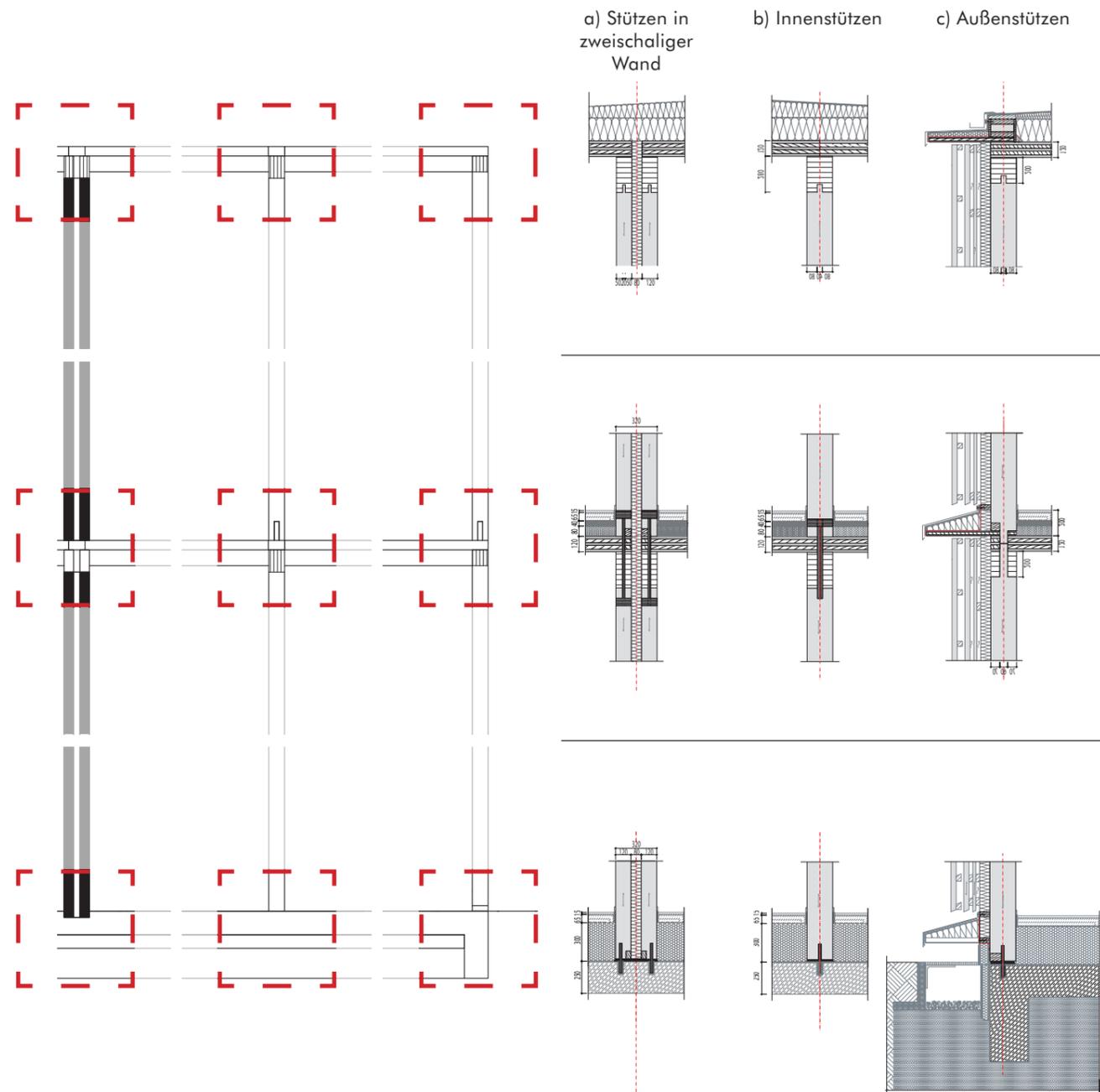
ÜBERSICHT MUSTERDETAILS – HOLZVERBINDUNGSMITTEL

Graphik 40:
Übersicht Musterdetails Holzverbindungsmitel.

1. Druckbelastete Stützen

2. Zugbelastete Stützen

3. Aussteifende Wandscheiben



6.2. BRANDSCHUTZ

Die Brennbarkeit des Primärbaustoffs erfordert eine besondere Beachtung des Brandschutzes. 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 Heiß-Bemessung von Bauteilen genutzt, indem die Querschnitte größer dimensioniert werden als für das Tragverhalten erforderlich, so dass im Brandfall der tragende Rest-Querschnitt 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.

Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2 und DIN EN 13501-2

Baustoffe werden nach ihrer Feuerwiderstandsdauer klassifiziert. Grundlage ist die deutsche ‚DIN 4102-2.: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen‘ und die europäische Norm ‚DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen‘.

Feuerwiderstand

Die Bezeichnungen „feuerhemmend“, „hochfeuerhemmend“ und „feuerbeständig“ sind durch die Feuerwiderstandsklassen F-30, F-60 und F-90 nach DIN 4102 definiert. Eine weitere Differenzierung erfolgt nach DIN EN 13501 durch die Kriterien der Standsicherheit (R), des dichtem Raumabschlusses (E) und der Eindämmung des Wärmedurchgangs (I).

Die numerischen Angaben 30, 60 und 90 beschreiben dabei immer die Dauer in Minuten, in der ein Bauteil die Erfüllung der jeweiligen Anforderung unter Brandeinwirkung aufrechterhalten kann.

Weitere pauschale Zeitangaben für die Widerstandsfähigkeit sind: 15, 20, 45, 120, 180, 240, 360 (jeweils Minuten).

Standsicherheit R

Die Standsicherheit (R; fr. résistance) ist bei allen tragenden Bauteilen das maßgebliche Kriterium des Feuerwiderstands. Es muss gewährleistet werden, dass die Bauteile ihre statischen Eigenschaften für einen ausreichend langen Zeitraum aufrechterhalten, um die primären Schutzziele zu erreichen und wirksame Lösch- und Rettungsarbeiten zu ermöglichen.

Raumabschluss E

Das Kriterium des Raumabschlusses (E; fr. étanchéité) beschreibt die Dichtigkeit eines Bauteils und seiner Anschlüsse gegen Luft- und Rauchausbreitung. Die Anforderung wird grundsätzlich an alle am Raumabschluss beteiligten Bauteile zwischen Nutzungseinheiten, Brandabschnitten und zum Außenraum gestellt, um eine Rauch- und Brandausbreitung zu verhindern beziehungsweise solange zu verzögern, dass die Einhaltung der Schutzziele gewährleistet werden kann.

Eindämmung des Wärmedurchgangs I

Das Temperaturkriterium (I; fr. isolation) fordert die Eindämmung der Hitzeausbreitung auf angrenzende Räume beziehungsweise feuerabgewandte Bauteilschichten. Der Wärmedurchgang durch Bauteile und Bauteilschichten muss so geringgehalten werden, dass eine Entzündung weiterer Bauteilschichten und somit die Brandausbreitung auf angrenzende Räume ausreichend lange verhindert wird.

Brandüberschlag

Als zusätzliche Anforderung gegen die Brandausbreitung an Außenbauteilen gilt es, geschossübergreifende Hohlräume bei be- und hinterlüfteten Fassaden brandschutztechnisch wirksam zu unterbrechen.

Allgemeine Brandschutzanforderungen, rechtliche Grundlagen

Grundlage für die Beurteilung des Brandschutzes bilden die jeweiligen Landesbauordnungen (LBO). Je nach Gebäudeklasse, in Abhängigkeit von der Höhe des Gebäudes und der Größe der Nutzungseinheiten, werden Brandschutzanforderungen an die Bauteile definiert. Unterschieden wird dabei zwischen Anforderungen wie folgt:

- feuerhemmend (fh)
- hochfeuerhemmend (hfh)
- feuerbeständig (fb)

Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2 und 3 <small>[Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102]</small>						
Bauaufsichtliche Benennung	Tragende Bauteile ohne Raumabschluss	Tragende Bauteile mit Raumabschluss	Nicht tragende Innenwände	Nicht tragende Außenwände	Doppelböden	Selbstst. Unterdecken
Feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i→o) EI 30 (i←o)	REI 30 ETK (f)	EI 30 (a→b) EI 30 (a←b) EI 30 (a↔b)
	[F 30]			[W 30]	[F 30]	[F 30 von oben nach unten] [F 30 von unten nach oben] [F 30 von beiden Seiten]
	R 60	REI 60	EI 60	E 60 (i→o) EI 60 (i←o)	REI 60 ETK (f)	EI 60 (a→b) EI 60 (a←b) EI 60 (a↔b)
	[F 60]			[W 60]	[F 60]	[F 60 von oben nach unten] [F 60 von unten nach oben] [F 60 von beiden Seiten]
Feuerbeständig ¹⁾	R 90	REI 90	EI 90	E 90 (i→o) EI 90 (i←o)	REI 90 ETK (f)	EI 90 (a→b) EI 90 (a←b) EI 90 (a↔b)
	[F 90]			[W 90]	[F 90]	[F 90 von oben nach unten] [F 90 von unten nach oben] [F 90 von beiden Seiten]
Feuerwiderstandsdauer 120 min	R 120	REI 120	-	-	-	-
	[F 120]		-	-	-	-
Brandwand	-	REI-M 90	EI-M 90	-	-	-

¹⁾ Zurzeit nach § 17 Abs. 2 MBO: In wesentlichen Teilen aus nicht brennbaren Baustoffen

Tabelle 1:
Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2 und 3.
Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN).

Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen

Die Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen sowohl nach DIN 4102-2 als auch nach DIN EN 13501-2 werden diesen bauaufsichtlichen Anforderungen zugeordnet. Die folgende Tabelle zeigt die Zuordnung nach DIN EN 13501-2:

Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen nach DIN 4102-2 und ihrer Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen (Auszug aus DIN 4102-2, Tabelle 2)						
Zeile	Bauaufsichtliche Anforderung nach MBO (Abweichungen in einzelnen LBOs)	Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102-2 Tabelle 1	Baustoffklasse nach DIN 4102-1 für		Benennung der Feuerwiderstandsfähigkeit	Kurzbezeichnung
			wesentliche Teile	übrige Bestandteile		
1	feuerhemmend	F30	B	B	Feuerwiderstandsklasse F30	F30B
2			A	B	Feuerwiderstandsklasse F30 und in den wesentlichen Teilen aus „nichtbrennbaren“ Baustoffen	F30 - AB
3			A	A	Feuerwiderstandsklasse F30 und aus „nichtbrennbaren“ Baustoffen	F30 - A
4			B	B	Feuerwiderstandsklasse F 60	F 60 - B
MHFHHolzR [2] Pkt. 3.2	hochfeuerhemmend	F 60	B [K<60]	B	Feuerwiderstandsklasse F 60, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen mit einer allseitigen brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung), Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen;	F 60 - B K260
5			A	B	Feuerwiderstandsklasse F 60 und in den wesentlichen Teilen aus "nichtbrennbaren" Baustoffen	F 60 - AB
6			A	A	Feuerwiderstandsklasse F 60 und aus „nichtbrennbaren“ Baustoffen	F 60 -A
7	nicht feuerbeständig[1.]	F 90	B	B	Feuerwiderstandsklasse F 90	F 90 - B
8	feuerbeständig		A	B	Feuerwiderstandsklasse F 90 und in den wesentlichen Teilen aus "nichtbrennbaren" Baustoffen	F 90 -AB
9			A	A	Feuerwiderstandsklasse F 90 und aus „nichtbrennbaren“ Baustoffen	F 90 -A

¹ Ausnahmen in einzelnen Landesbauordnungen
² Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise - M-HFHHolzR (Fassung Juli 2004)

Tabelle 2:
Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen
DIN 4102-2.
Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN).

Anforderungen an die Bauteile

Den Anforderungen an die Bauteile durch die jeweiligen Landesbauordnungen ist eine bundesweite Musterbauordnung (MBO) vorgelagert, die im Jahre 2019 von der Bauministerkonferenz (Konferenz der Bauminister der Länder der Bundesrepublik Deutschland (ARGEBAU)) verabschiedet wurde. Die Länder übernehmen Teile der MBO, sind aber an diese nicht gebunden, weswegen es wichtig ist, bei einem konkreten Bauvorhaben das geltende Landesrecht sorgfältig zu prüfen.

Nach § 26 Abs. 2 Satz 3 der MBO vom 27.09.2019 müssen die tragenden und aussteifenden Elemente feuerbeständiger Bauteile (F 90 nach DIN 4102-2) aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Raumabschließende Bauteile müssen darüber hinaus eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen haben. Hochfeuerhemmende Bauteile (F 60 nach DIN 4102-2), deren tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen, müssen allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) haben und, sofern vorhanden, mit nichtbrennbaren Dämmstoffen gedämmt sein.

In der MBO § 26 Abs. 2 Satz 4 MBO ist für Bauteile, die feuerbeständig (F 90 nach DIN 4102-2) oder hochfeuerhemmend (F 60 nach DIN 4102-2) sein müssen, eine Verwendung brennbarer Baustoffe zulässig. Aufgrund des anderen Brandverhaltens sind sie definitionsgemäß nicht feuerbeständig bzw. nicht als „hochfeuerhemmende“ Bauteile eingestuft. Die Verwendung brennbarer Baustoffe ist daher unter den Vorbehalt gestellt, dass die angewendeten Bauarten den technischen Baubestimmungen nach § 85a MBO entsprechen, das heißt durch Planungen, Berechnungen, allgemeine oder spezifische Eignungsnachweise und Übereinstimmungsnachweise als für den Verwendungszweck geeignet beschreibbar sind. In diesem Sinne sind entsprechende Konkretisierungen zu erbringen für:

- hochfeuerhemmende Bauteile in Holzrahmen- oder Holztafelbauweise,
- feuerwiderstandsfähige Bauteile in Massivholzbauweise bei Standardgebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5 und
- Außenwandbekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen.

In der MBO 2019, deren brandschutzrelevante Bestandteile von den meisten Bundesländern auch in Landesrecht übernommen wurden, sind die Anforderungen an die tragenden, aussteifenden und trennenden Bauteile wie folgt definiert:

Bauteilanforderungen werden davon ausgehend und in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe definiert. Dazu nimmt die MBO eine Einteilung von Gebäuden in Gebäudeklassen vor:	„Gebäude niedriger Höhe“ ¹			„Gebäude mittlerer Höhe“ ¹	
	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5
Beschreibung	freistehende Gebäude	nicht freistehende Gebäude	sonstige Gebäude	-	sonstige Gebäude
OKF²	≤7m	≤7m	≤7m	≤13m	≤22m
Nutzungseinheiten	≤2 Σ ≤400m ²	≤2 Σ ≤400m ²	n. def.	n.def. je NE ≤400m ²	n.def.
Anforderungen an tragende und aussteifende Bauteile	feuerhemmend			hochfeuerhemmend	feuerbeständig
Rettungsarbeiten	mit Steckleiter möglich			mit Drehleiter nötig	

¹ vor MBO gebräuchliche Beschreibung

² Oberkante des Fertigfußbodens im höchsten Geschoss mit möglichen Aufenthaltsräumen

Eine Konkretisierung kann unter anderem aus der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise erfolgen (MHolzBauRL:2020-10) (in der aktuellen Fassung Oktober 2020). Kommen von dieser Richtlinie abweichende Bauarten in Holz zur Anwendung, so bedarf dies einer Bauartgenehmigung nach § 16a Abs. 2 MBO:

(2) 1 Bauarten, die von Technischen Baubestimmungen nach § 85a Absatz 2 Nr. 2 oder Nr. 3 Buchstabe a) wesentlich abweichen oder für die es allgemein anerkannte Regeln der Technik nicht gibt, dürfen bei der Errichtung, Änderung und Instandhaltung baulicher Anlagen nur angewendet werden, wenn für sie eine allgemeine Bauartgenehmigung durch das Deutsche Institut für Bautechnik oder eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung durch die oberste Bauaufsichtsbehörde erteilt worden ist.

Sofern von den bauordnungsrechtlichen Anforderungen abgewichen werden soll, ist darüber hinaus eine Abweichungsentscheidung nach § 67 MBO erforderlich. Voraussetzung ist aber, dass die Zwecke der jeweiligen bauordnungsrechtlichen Anforderung berücksichtigt werden und die schutzwürdigen öffentlichen und nachbarlichen Belange entsprechend berücksichtigt wurden.

Tabelle 3:
Übersicht nach der
Musterbauordnung,
Stand: 2019: Anforderungen
an Bauteile im Bezug auf den
Brandschutz.
Quelle: [https://www.
bauministerkonferenz.de](https://www.bauministerkonferenz.de).

Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise

Wichtigste Rechtsquelle für die brandschutztechnische Einstufung des Bausystems ist die oben genannte Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL:2020-10). Der Anwendungsbereich ist wie folgt definiert:

„Diese Richtlinie gilt für Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5, deren tragende, aussteifende oder raumabschließende Bauteile hochfeuerhemmend oder feuerbeständig nach § 26 Abs. 2 Satz 3 MBO sein müssen und die davon abweichend nach § 26 Abs. 2 Satz 4 MBO aus brennbaren Baustoffen bestehen dürfen.“

Unterschieden wird zwischen Holzrahmen- und Holztafelbauweise und Massivholzbauweisen. Die gegenständliche Holz-Skelettbauweise ist als Holzrahmen- oder Holztafelbauweise einzustufen, weil die tragenden Bauteile stabförmig sind und Hohlräume besitzen. Die hier vorgestellte Bauweise mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen ist sowohl als Skelettbauweise (im Sinne der MHolzBauRL als Holzrahmen- und Holztafelbauweise) oder auch als Massivbauweise möglich. Die unterschiedlichen Anforderungen der MHolzBauRL gelten entsprechend.

Das Bausystem ist als Massivholz- oder Skelettkonstruktion konzeptioniert, weil die form- und kraftschlüssigen Anschlüsse in beiden Bauweisen angewendet werden können. In den meisten betrachteten Fällen kamen jedoch Skelettbauweisen mit aussteifenden Wänden in Holzrahmenbau zum Einsatz. Diese Bauweise hat Vorteile im Hinblick auf den Materialverbrauch, die Kosten und die Flexibilität der Grundrisse. Deswegen wird im Folgenden das Bausystem als Holzrahmen- und Holztafelbauweise im Sinne der MHolzBauRL eingestuft. Diese Einstufung bedeutet, dass die Anforderungen für die Massivholz-Bauweisen etwas geringer sind, weil in der MHolzBauRL im Abschnitt 5 die Errichtung hohlraumfreier Bauteile aus brennbaren Baustoffen (Massivholz) ohne vollständige Brandschutzbekleidung bei Gebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5 geregelt wird.

Die Einführung der letzten Fassung der MHolzBauRL hat die Einsatzmöglichkeiten für Holzrahmen- und Holztafelbauweise gegenüber der vorherigen Situation geschmälert, weil für diese festgelegt wird:

- Als tragende/raumabschließende Bauteile müssen diese einen Nachweis über eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 60 Minuten besitzen, allseitig mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus nicht brennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) nach

§ 26 Abs. 2 Satz 2 Nr. 3 MBO versehen sein, die eine Entzündung der tragenden und aussteifenden Bauteile aus Holz oder Holzwerkstoffen während eines Zeitraumes von mindestens 60 Minuten verhindert und

- Dämmstoffe aufweisen, die nichtbrennbar sind und einen Schmelzpunkt $\geq 1000^\circ\text{C}$ entsprechend DIN 4102-17:2017-12 besitzen.

Hochfeuerhemmende Elemente in Holzrahmen- und Holztafelbauweisen (Gebäudeklasse 4) müssen einen Nachweis über eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 60 Minuten erbringen, mit nicht brennbaren Bekleidungen und nicht brennbaren Dämmstoffen.

Für Massivholzkonstruktionen (Gebäudeklasse 4 und 5) müssen feuerbeständige Elemente eine Mindestfeuerwiderstandsdauer von 60 (Gebäudeklasse 4) oder 90 (Gebäudeklasse 5) Minuten nachweisen, nicht brennbare Verkleidungen an brennbaren Oberflächen verwenden und ausreichende Rauchdichtigkeit für Trennwände und Decken gewährleisten. Die MHolzBauRL konkretisiert diese Anforderungen in den Abschnitten 4 und 5. Insbesondere sind Außenverkleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen in Gebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5 mit geeigneten Maßnahmen zur Begrenzung der Brandausbreitung gestattet. Hochfeuerhemmende Elemente in Holzrahmen- und Holztafelkonstruktionen (Gebäudeklasse 4) müssen einen Nachweis über eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten erbringen, nicht brennbare Verkleidungen aufweisen und nicht brennbare Dämmstoffe mit einem Schmelzpunkt $\geq 1000^\circ\text{C}$ verwenden.

Der Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen kann, wenn möglich, über eine technische Regel (zum Beispiel anerkannte Regeln der Technik), die als technische Baubestimmung bekannt gemacht worden ist, oder über eine Bauartgenehmigung gemäß § 16a MBO geführt werden (siehe dazu Abschnitt 3.2 der MHolzBauRL).

Konstruktiver Brandschutz tragender, aussteifender und trennender Bauteile im Holzbau

Holz ist ein brennbarer Baustoff und deswegen nur bedingt brandbeständig. Dabei sind die Brennbarkeit und die Feuerwiderstandsfähigkeit tragender, aussteifender und trennender Bauteile getrennt voneinander zu betrachten und erfordern unterschiedliche Strategien in der konstruktiven Umsetzung, um den geforderten Brandschutz sicherzustellen. Grundsätzlich werden zwei Strategien zum konstruktiven Brandschutz im Holzbau verfolgt:

- Heißbemessung: Eine Überdimensionierung der Bauteile um dem Abbrand Rechnung zu tragen.
- Verkleidung, (vgl. der Kapselbauweise): Bekleidung der Holzbauteile mit nicht-brennbaren und feuerbeständigen Baumaterial.

Unverkleidete Holzbauteile

Der Einsatz unbedeckter Holzbauteile mit tragender, aussteifender oder raumabschließender Funktion ist in allen Bundesländern auch in den Gebäudeklasse 4 und 5 möglich, wenn Befreiungen beziehungsweise Abweichungen nach § 67 MBO zugestimmt wird. Dazu ist meistens ein umfassendes Brandschutzkonzept mit entsprechenden Kompensationsmaßnahmen erforderlich. Dies ist bei allen vorgestellten Modellvorhaben der Fall.

Ein Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojekts ist unter anderem die Leistungsfähigkeit von Holz als Baustoff aufzuzeigen und die Vermischung mit anderen Baumaterialien zu vermeiden. Deswegen ist es folgerichtig, den Einsatz von Verkleidungen zu reduzieren.

Wenn auf eine Brandschutzbekleidung verzichtet werden soll, ist es notwendig, die Brandbeanspruchung bei der Bemessung der tragenden Bauteile zu berücksichtigen. Dazu kann sich die Planung durchaus positive Eigenschaften, die Holz im Brandfall besitzt, zunutze machen. Durch die Bildung einer äußeren Kohleschicht wird der innere Querschnitt eines Holzbauteils geschützt. Da sich die Abbrandrate von Holz gut bestimmen lässt, kann je nach Anforderung die Dimensionierung über den statisch notwendigen Querschnitt hinaus ermittelt werden. Mit dieser Heißbemessung lässt sich ein ausreichender Feuerwiderstand auch mit unverkleideten Bauteilen aus Holz nachweisen. Dabei wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche Holzarten und Produkte mit einer vorher-sagbaren Abbrandrate abbrennen, weil der Brandfortschritt im Material durch die vergleichsweise stabile Kohleschicht (s. beispielhaft Abbildung 20) auf der Oberfläche des Holzes verlangsamt wird. Gleichzeitig ist der Wärmetransport innerhalb der Bauteile langsam, was den Brandfortschritt weiter verzögert. Der innere Teil der Bauteile bleibt damit vergleichsweise kühl und stabil.

Die Abbrandrate hängt vom Brandfall und der Holzart ab. Für Brettspertholz und Brettschichtholz (Fichte (Standard), Tanne, Kiefer, Lärche, Douglasie (seltener)) und Buchenfurnierschichtholz ist von diesen Abbrandraten auszugehen:

- Einseitiger Abbrandrate:
0,65mm pro Minute (z.B. für Trennwände und Decken)
- mehrseitiger Abbrandrate:
0,7mm pro Minute (z.B. für Trennwände und Decken)

Daraus ergeben sich folgende Erhöhung der Holzquerschnitte:

- F30 = 21mm
- F60 = 42mm
- F90 = 63mm



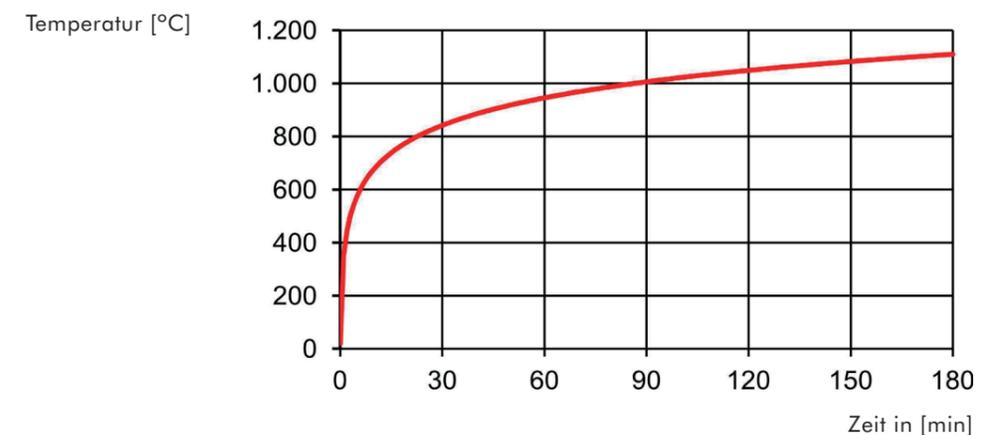
Abbildung 20:
Ausbildung der Kohleschicht um tragenden Restquerschnitt (Quelle: TU München, in Quelle: Kaufmann, Hermann et al (2017): Atlas mehrgeschossiger Holzbau, München: Detail Business Information GmbH).

Mit anderen Worten muss bei einem angestrebten Feuerwiderstand von beispielsweise 30 Minuten eine Stütze um $30\text{min} \times 0,7\text{mm}/\text{min} = 21\text{mm}$ größer dimensioniert werden als für den Standsicherheitsnachweis ohne Brandschutzanforderungen erforderlich.

Zu berücksichtigen ist, dass der Nachweis der Heißbemessung nur das Kriterium der Standsicherheit, nicht aber der Gebrauchstauglichkeit erfüllen muss, weil die Durchbiegung oder das Schwingungsverhalten im Brandfall irrelevant sind. Insbesondere bei Decken ist für die Dimensionierung meist nicht die Standsicherheit, sondern Gebrauchstauglichkeit und Schwingungsdämpfung maßgeblich. Deswegen führt eine Heißbemessung nicht notwendig zu einer Überdimensionierung.

Bei zusammengesetzten Holzprodukten ist von besonderer Bedeutung für die Dimensionierung der Bauteile, dass die Bauteile aus Lagen oder Schichten aufgebaut wurden, die im Brandfall getrennt betrachtet werden: So kann der Abbrand für die Heißbemessung nur innerhalb einer Lage/Schicht angesetzt werden. Die Schichtdicke muss so geplant werden, dass der Abbrand innerhalb einer Lage/Schicht des Brettspertholz nachgewiesen wird, weil bei einem Übergriff auf die nächste Schicht die gesamte angegriffene Schicht als nicht-tragend eingestuft werden muss. Da aber die Brettsperthölzer mit unterschiedlichen Schichtdicken geliefert werden können, lässt sich die Auswahl entsprechend der Anforderungen planen.

Limitierende Faktoren für diese Konstruktionsweise sind die baurechtlichen und normativen Vorgaben, die oben beschrieben wurden, die grundsätzlich eine Verkleidung der tragenden, aussteifenden und raumabtrennenden Bauteile vorschreiben. Die Einschätzung der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL:2020-10) liegt darin begründet, dass eine Unsicherheit bezüglich der Temperaturentwicklung im Brandfall besteht, wenn ein größerer Anteil von unbedeckten Holz-Oberflächen am Brandgeschehen teilnimmt. So basiert die Berechnung der Abbrandrate und darauf aufbauend die Brandwiderstands-

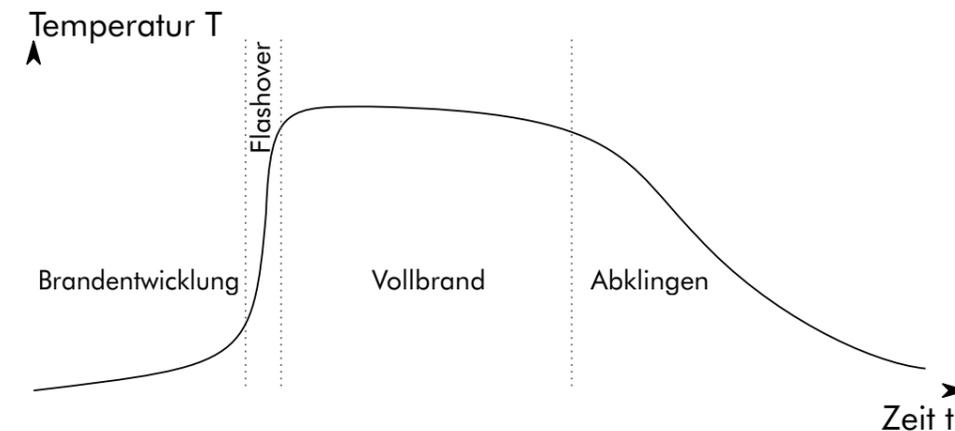


Graphik 41:
Temperaturen infolge der Temperaturzeitkurve (ETK) in Abhängigkeit von der Zeit.
Quelle: <https://www.heissbemessung.net/Infothek/Braende/ETK.html>.

dauer der Bauteile auf der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK). Die ETK wird durch die folgende Gleichung beschrieben, die sich auch im Eurocode EN1991-1-2 findet: $\Delta(t) = 20 + 345 \cdot \log(8t + 1)$. In der Gleichung bezeichnet Δ die Brandraumtemperatur und t die Zeit.

Wie die Einheits-Temperaturkurve (ETK) in der idealisierten Graphik 40 zeigt, klingen die Temperaturen in der ETK nicht ab. Dies widerspricht einem natürlichen Brand, bei dem die Brandlast zu einem bestimmten Zeitpunkt verbrannt ist, also kein brennbares Material mehr übrig ist, so dass die Temperaturen zu sinken beginnt und das Feuer irgendwann ausklingt. Auch Belüftung des Brandes und Eigenschaften der raumumfassenden Bauteile beeinflussen das Brandgeschehen. Tatsächlich verlaufen Naturbrände viel unregelmäßiger als die ETK diese simuliert. Es gibt zahlreiche Realbrandversuche, in denen abweichende Temperaturkurven gemessen wurden.

Die Heißbemessung und der Nachweis von Standsicherheit (tragende und aussteifende Bauteile) sowie des Raumabschluss basieren bei unverkleideten Holzbauteilen darauf, dass der Abbrand und die Zersetzung der Holzbauteile gemäß der oben beschriebenen Abbrandraten konstant sind. Dies ist für einen Norm-Brand, der der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) entspricht, nachgewiesen. Größere Unklarheit besteht jedoch, wie sich die Temperaturen in realen Räumen bei realen Brandgeschehen entwickeln, vor allem, wenn ein großer Teil der Oberflächen aus Holz und damit brennbar ist und damit am Brandgeschehen teilnimmt. Bei der Erarbeitung der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL:2020-10) wurde aus dieser Unsicherheit heraus festgelegt, dass zumindest bei den Holzrahmen- und Holztafelbauweisen, die zum einen meist ohnehin mit Verkleidungen arbeiten und deren Tragwerk durch die stabförmigen Elemente gefährdeter ist im Brandfall durchzubrennen und zu versagen, dass die Holzbauteile so zu verkleiden sind, dass sie über einen bestimmten Zeitraum (30, 60, 90... Minuten) nicht am Brandgeschehen teilnehmen. Durch die Verkapselung der Holzbauteile wird die Brandlast im Raum verringert und ein Flashover verzögert. Als Flashover wird in der Literatur der Punkt beschrieben, an dem ein Brand sich schlagartig von der Entstehungsphase mit relativ niedrigen Temperaturen zu einem Vollbrand entwickelt. Schutzziel im Brandschutz allgemein ist es, dass die Flucht oder Rettung von Personen vor dem Flashover möglich sein muss. Entsprechend ist der Flashover soweit zu verzögern. Je nach Höhe und Größe des Gebäudes und der Einheiten, die durch die Gebäudeklassen beschrieben werden, ist die Zeitspanne für die Flucht und Rettung sowie der Beginn wirksamer Löscharbeiten größer, weswegen höhere Anforderungen an den Feuerwiderstand von Bauteilen gestellt werden.



Graphik 42:
Idealisiertes Temperatur-Zeit-Diagramm eines Zimmerbrandes, nach Karlsson und Quintiere;
Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Raumbrand-flashover.svg>; Public domain, via Wikimedia Commons
Autor: Chris828.

In der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL:2020-10) legt der Abschnitt 5.2 fest:

„Brennbare Bauteiloberflächen von Wänden und Decken müssen eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen haben, die eine Entzündung der brennbaren Bauteiloberflächen während eines Zeitraumes von mindestens 30 Minuten verhindert. Dies gilt als erfüllt, wenn die Bekleidung aus einer mindestens 18 mm dicken Gipsplatte des Typs GKF nach DIN 18180 in Verbindung mit DIN EN 520 bzw. Gipsfaserplatte mit einer Mindestrohddichte von 1000 kg/m³ nach europäisch technischer Bewertung besteht und die in der Tabelle 2 aufgeführten Befestigungsmittel und deren Abstände untereinander beachtet werden.“

Abweichend hiervon sind je Raum der Nutzungseinheit entweder die Decke oder maximal 25% aller Wände, ausgenommen Trennwände, Wände anstelle von Brandwänden sowie Treppenraumwände, mit brennbaren Bauteiloberflächen zulässig (Fenster- und Türöffnungen können unberücksichtigt bleiben).“

Grundsätzlich dürfen also auch innerhalb der MHolzBauRL:2020-10 entweder 25 % aller Wände oder die Decken holzsichtig ausgeführt werden. Überlagert wird diese Anforderung von der oben beschriebenen Anforderung aus dem Abschnitt 4.2. der MHolzBauRL:2020-10 nach der Wände in Holztafelbauweise mit einer zweilagigen Bekleidung aus 2 x 18mm Gipsplatten Typ GKF nach DIN 18180 bekleidet werden sollen, um ein Entzünden der Holzbauteile über einen Zeitraum von 60 Minuten (K260) zu verhindern. Für Stützen und Träger gilt nach Abschnitt 4.5. der MHolzBauRL:2020-10:

„Hochfeuerhemmende Stützen und Träger, soweit sie nicht hohlraumfrei sind, sind mit einer Brandschutzbekleidung nach Abschnitt 4.2 auszuführen.“

Für Massivholzelemente, wie BSP, gelten die Vorgaben im Abschnitt 5.2 der MHolzBauRL:2020-10. Für diese wird eine einlagige Bekleidung der Wände und Decken mit 1 x 18 mm Gipsplatte Typ GKF nach DIN 18180 gefordert, um ein Entzünden der Holzbauteile über einen Zeitraum von 30 Minuten (K230) zu verhindern.

Die beschriebenen Maßnahmen dienen zwei Zielen:

- Ein beschleunigter Flash-Over soll gegenüber den aus den Brandversuchen bekannten Durchschnittszeiten verzögert werden.
- Die Brandraumtemperatur soll soweit begrenzt werden, dass die in den Rechenmodellen zur Heißmessung angesetzten Abbrandraten weiterhin gültig sind.

Diese Anforderungen gelten vorrangig für tragende und raumabschließende Elemente.

BA-Bauweise und Kapselung

Im Hinblick auf den mehrgeschossigen Holzbau werden die konkreten Anforderungen für das unter §26 (2 Nr.3) der MBO beschriebene Prinzip einer BA-Bauweise beschrieben, die für tragende Bauteile die Verwendung brennbarer Baustoffe mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen und den Einsatz von nicht brennbaren Dämmstoffen vorsieht. Die Bezeichnung „BA“ bezieht sich auf die in der DIN 4102-1 festgelegten Einteilung in Baustoffklassen A (nicht brennbar) und B (brennbar).

Um die Anforderung „hochfeuerhemmend“ zu erfüllen, müssen die entsprechenden Holzbauteile mit einer Brandschutzbekleidung gekapselt werden, die zum Beispiel für Gebäude der Klasse 4 der Kapselklasse K2-60 entspricht. Analog zu den Feuerwiderstandsklassen wird durch die Kapselklassen die Dauer beschrieben, für die eine Entzündung eines tragenden Bauteils verhindert werden muss.

Da über die Gebäudeklasse 4 hinaus die Ausführung feuerbeständiger Bauteile vorausgesetzt wurde, werden entsprechende Gebäude nicht durch die MHolzBauRL:2020-10 abgedeckt. Dasselbe gilt für den Einsatz von Massivbauweisen (mit Ausnahme von Brettstapeldecken), die noch nicht in der Richtlinie berücksichtigt wurden.

Mit der weitgehenden Übernahme beziehungsweise Anpassung der Bauordnungen an die MBO und die MHolzBauRL:2020-10 haben die Länder den Einsatz brennbarer Baustoffe für tragende Bauteile ermöglicht. Dabei

gehen die Bauordnungen von Baden-Württemberg, Berlin, Hamburg und Nordrhein-Westfalen bereits einen Schritt weiter und lassen Ausführungen ohne Brandschutzbekleidung sowohl in Gebäudeklasse 4 als auch Gebäudeklasse 5 zu. Auch in Hessen ist dies theoretisch möglich, ist aber von der Erfüllung technischer Baubestimmungen abhängig, die derzeit noch nicht vorliegen.

Die Verwendung des brennbaren Baustoffs Holz insbesondere für Bauteile des Tragwerks beziehungsweise tragende Elemente innerhalb eines Bauteils erfordert die Anwendung BA-Bauweise, um zu vermeiden, dass die Tragstruktur direkt von der Brandausbreitung betroffen ist oder zu dieser beiträgt. Dementsprechend gilt es, die brennbaren Elemente mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung zu kapseln, die sowohl aus nichtbrennbaren Materialien bestehen als auch die Rauchdichtheit gewährleisten muss. Außerdem wird der Einsatz nichtbrennbarer formschlüssig verbauter Dämmstoffe gefordert. Die gängigsten Materialien dafür sind einerseits Gipskarton-Feuerschutzplatten und andererseits Mineralwolle.

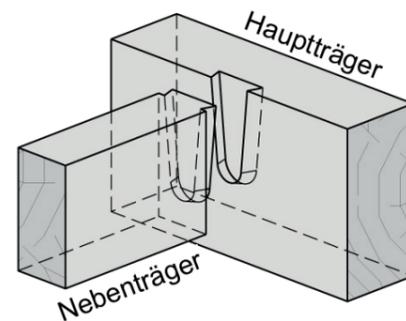
Die Hypothese der Forschung und Entwicklung ist, dass die form- und kraftschlüssigen Verbindungen einen Vorteil gegenüber metallischen Verbindungsmitteln im Hinblick auf den Brandschutz haben. Dafür gibt es folgende Anhaltspunkte:

- Die metallischen Verbindungsmittel haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit und transportieren im Brandfall viel Wärmeenergie von der Oberfläche in die Tiefe des Holzbauteils. Dieser Effekt unterläuft den natürlichen Brandschutz des Holzbauteils, der durch die stabile Kohleschicht entsteht und einen vergleichsweise langsamen und vorhersagbaren Brandverlauf sicherstellt. So kann also bei einer Vielzahl von metallischen Verbindern das Holzbauteil vergleichsweise kürzer dem Feuer Widerstand leisten. Durch den erhöhten Wärmetransport steigt die Temperatur insbesondere im Bereich, in dem die Metallteile in das Holz einbinden, wodurch der Verbund schlechter wird.
- Die metallischen Verbindungsmittel aus Stahl mit Formteilen, Schrauben oder Bolzen haben eine hohe Festigkeit im Kaltzustand. Bei erhöhten Temperaturen verlieren sie aber zunehmend an Festigkeit. Stahl verliert ab 300°C bereits an Festigkeit, die ab 400°C weiter rapide abnimmt. Bei einer Temperatur von 500-550°C versagt der Stahlkern, abhängig von Material und Struktur der Stahlbauteile. Grundsätzlich hat Edelstahl oder rostfreier Stahl eine bessere Festigkeit bei höheren Temperaturen. Deswegen müssen bei für den Brandfall bemessenen Verbindungen entsprechend mehr, größere und/oder andere Verbinder gewählt werden.

Die Betrachtung des Brandverhaltens von metallischen Holzverbindern oder der Vergleich von diesen Verbindungen mit den form- und kraftschlüssigen Verbindungen sind allerdings nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeit.

Bei den meisten der form- und kraftschlüssigen Verbindungen, die im vorliegenden Bausystem zum Einsatz kommen, können folgende Verbindungsarten unterschieden werden:

- Holz-Schwalbenschwanz-Verbinder mit denen zum Beispiel Nebenträger an Hauptträger angeschlossen werden, wie im folgendem Bild dargestellt:



- Druck- und/oder zugbelastete Holzschwerter, die mit Buchendübeln an die angrenzenden Bauteile angeschlossen werden.
- Lastverteilende Querhölzer in Stützen für Druck- oder Zuglasten.
- Buchendübel, die zur Lagesicherung und Schubverbindung beispielsweise zwischen BSP-Decken und Balken / Unterzügen eingebracht werden.
- Doppel-trapezförmige Holz-Verbinder (sogenannte X-Fix-Verbinder) für Zug- und Schubanschlüsse zwischen stabförmigen- und plattenförmigen Bauteilen.

Für die meisten dieser Verbindung kann davon ausgegangen werden, dass ein fugenloser Anschluss entsteht und die aus verschiedenen Bauteilen gefügte Konstruktion im Brandfall genauso abbrennt, wie ein homogenes Bauteil. Entsprechend wurde bei der Heißbemessung keine erhöhte Abbrandrate oder andere Kompensationen für die mehrteilige Konstruktion berücksichtigt. Diese Annahme hat sich für die meisten Bauteile und Anschlüsse auch in der Planung, Genehmigung und Ausführung der drei Modellvorhaben bestätigt.

Im Zuge des Genehmigungsprozesses für das Modellvorhaben in Heidelberg wurden eine umfassende Prüfung des Bauvorhabens mit dem Schwerpunkt der Prüfung des Brandschutzkonzepts, der planerischen Umsetzung und der Ausführung auf der Baustelle durch die oberste Baubehörde des Landes Baden-Württemberg angeordnet. Im Bereich Baurecht nehmen in Baden-Württemberg die Regierungspräsidien die Aufgaben der höheren Baurechtsbehörde wahr, in diesem Fall das Regierungspräsidium in Tübingen. Diese Prüfung oder Begutachtung wurde von dem Büro bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, Lauterbach durchgeführt. Im

Graphik 43:
Schwalbenschwanz,
Quelle: NR
Ingenieurgesellschaft
holztragwerke mbh;
Mönchenglöblich, <https://www.ing-tools.de/module/>

Zuge dieser Prüfung wurden drei Gutachten erarbeitet und mehrere Brandversuche durchgeführt. Die Gutachten beschäftigten sich teilweise mit für das Bauvorhaben spezifische Konstruktionen, die aber für die hier gegenständliche Forschung nicht relevant sind, weil sie keinen Bezug zu der form- und kraftschlüssigen Konstruktion besitzen (wie beispielsweise das Brandverhalten der Fassade).

Brandverhalten der den X-Fix-Verbinder

Relevant sind die Untersuchungen zu den X-Fix-Verbindern, weil dieser integrale Bestandteil des Tragwerks und seiner Fügung sind. Die Anforderung an die Bauteile ist in der Gebäudeklasse 4, dass sie ihre Tragfähigkeit über 60 Minuten behalten. Entsprechend müsste die Standsicherheit im Brandfall nachgewiesen werden. Experimentelle Daten, Prüfzeugnisse und eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das eingesetzte Produkt lagen nicht vor.



Aufgrund der Geometrie der eingesetzten X-Fix-Verbinder und der mit den eingesetzten Fräsköpfen herzustellenden Aufnahmen gab es beim Modellvorhaben in Heidelberg eine Fehlstelle oder Lücke an den Ecken zwischen den Verbindern und dem umgebenden BSP-Elementen. Durch diese Öffnung kann im Brandfall das Feuer in die Tiefe des Bauteils eindringen, was zu einem beschleunigten Abbrand führen kann.

Für die Begutachtung wurde ein Brandversuch bei der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA) durchgeführt, um das Brandverhalten der X-Fix-Verbinder zu untersuchen. Im Versuch wurde ein X-Fix-Verbinder in der typischen Einbausituation zwischen Wand und Stütze, beziehungsweise zwischen Wand und Unterzug untersucht. Der X-Fix-Verbinder mit einer Dicke von 90mm wurde dazu in eine Aufnahme von 92mm Tiefe eingebaut. Der Versuchskörper hatte eine Größe von 1,2m x 1,1m und enthielt insgesamt 6 X-Fix-Verbinder. Im Versuch bildete er den Raumabschluss des Ofens, in dem eine Temperatur-Zeit-Kurve entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) erzeugt wurde. Nach 60 Minuten war der X-Fix-Verbinder soweit abgebrannt, dass kein statisch ansetzbarer Restquerschnitt mehr vorhanden war.

Im Modellvorhaben sind die BSP-Wände teilweise (zum Beispiel an den Wohnungstrennwänden oder Außenwänden) mit Mineralwolle für den Brand-, Schall- und Wärmeschutz hinterbaut. Auch dieses Details, die Mineralwolle, wurde auf der Hälfte des Prüfkörpers nachgebaut, um zu prüfen, welchen Einfluss die nachströmende Luft auf den Abbrand hat. Für die Mineralwolle konnte aber kein Einfluss auf Nachströmung und Abbrand nachgewiesen werden. Im

Abbildung 21:
X-Fix Verbinder im
Modellprojekt „dgj223
Collegium Academicum“,
Heidelberg.

Test wurde auch ermittelt, dass die getestete Konstruktion erst nach 43 Minuten die raumabschließende Wirkung verliert (E-Kriterium, Wattebauschtest). Aufgrund der Testergebnisse wurden im Modellvorhaben in Heidelberg die X-Fix-Verbinder, die zuvor sichtbar verbaut waren, mit einer zusätzlichen Brandschutzverkleidung versehen. Mit einer zweilagigen Beplankung mit Gipsfaserplatten konnte Stand-sicherheit und Raumabschluss für mindestens 60 Minuten rechnerisch und experimentell nachgewiesen werden.

Als Folge der Brandversuche wurden verschiedene Anpassungen beim Einsatz der X-Fix-Verbinder vorgenommen, die vor allem Fugen zwischen dem Verbindungsmittel und der Aufnahme verhindern. Beim Projekt ‚dgj228 Gemeinsam Suffizient Leben‘ in Frankfurt am Main, Friedberger Landstraße, wurden die Fugen um die X-Fix-Verbinder mit einem Brandschutzspachtel verfüllt. Der Hersteller der X-Fix-Verbinder hat inzwischen die Geometrie der Verbinder so verändert, dass diese zu den größeren Fräsköpfen passen, die meist beim Zuschnitt von großformatigen BSP-Elementen zum Einsatz kommen (30mm Fräsköpfe), so dass auch ohne Verspachtelung die Herstellung von passgenauen Aufnahmen für die Verbindungsmittel vereinfacht wird. Der experimentelle Nachweis, dass diese verbesserten Ausführungen (Spachtelung, neue Geometrie) auch ohne eine brandschutztechnische Verkleidung die Anforderungen erfüllen, steht noch aus.

Anteil Sichtbare Holzoberflächen

Diese Veränderung der Konstruktion lief im Modellprojekt in Heidelberg, parallel zur Veränderung der Vorgaben der Planung. So ordnete das Regierungspräsidium Tübingen an, dass in der Fortschreibung des Brandschutzkonzepts nicht nur die zum Zeitpunkt des Bauantrags Dezember 2017 geltende Landesbauordnung umzusetzen ist, sondern auch die zum Zeitpunkt der Prüfung noch nicht eingeführte, aber als Entwurf verfügbare Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL:2020-10). In der neuen Fassung enthält die MHolzBauRL die Vorgabe, dass tragende, aussteifende und raumabschließende Bauteile mit einer brandschutztechnisch wirksamen Verkleidung entsprechend des Schutzzieles zu versehen sind, mit der Ausnahme, dass 25 % der Wände oder die Decken unverkleidet bleiben dürfen. Im Modellvorhaben wurde deswegen in der Fortschreibung des Brandschutzkonzepts entsprechend der Vorgaben der MHolzBauRL:2020 eine Verkleidung von Teilen der sichtbaren Holzoberflächen umgesetzt, die gleichzeitig genutzt wurde, um in diesem Zuge die geforderte Verkleidung der X-Fix-Verbinder vorzunehmen. Aufgrund der teilweise abweichenden Aufbauten der Außenwände im Modellvorhaben mit Ausfachungen aus Holzrahmenelementen, die mit Gipsfaserplatten bekleidet sind, musste nur ein kleiner Teil der Innenwände, vor allem im Bereich der Wohnungstrennwände und aussteifender Bauteile, mit X-Fix-Verbindern mit Verkleidungen ertüchtigt werden.

Raumabschluss (E)

Der Nachweise des Raumabschlusses mit den form- und kraftschlüssigen Verbindungen müsste in einem Brandversuch überprüft werden, der allerdings nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeiten war. Grundsätzlich ist aber die Anforderung an die Luftdichtheit, die sich nicht nur aus dem Brandschutz ergibt, sondern vor allem aus bauphysikalischen Notwendigkeiten (Vermeidung von Konvektion zur Vorbeugung von Kondensat im Bauteil, Wärmeverlust, Dampfdichtheit der Gebäudehülle, Schallschutz) so hoch, dass die form- und kraftschlüssigen Verbindungen alleine keinen ausreichend luftdichten Anschluss darstellen. Es ist also davon auszugehen, dass für die kritischen Bauteile (Trennwände, Außenwände, Geschossdecken, u.a.) ohnehin zusätzlichen konstruktive Maßnahmen zur Herstellung einer luftdichten Ebene möglichst auf der Raum-Innenseite zu ergreifen sind. Die gebräuchlichsten Mittel sind:

- Beplankungen und Verkleidung mit überlappenden Stößen und Abklebungen,
- Folien.

Davon abgesehen ist anzunehmen, dass die Anschlüsse unter Brandeinwirkung durch die Verformung des Materials und den Masseverlust beim Verkohlen in den vom Brandgeschehen erfassten Bauteilschichten die Passung verlieren und damit weder eine statisch wirksame Kraftübertragung noch ein luftdichter Anschluss gewährleistet ist. In Abhängigkeit von den Anforderung / Brandschutzklasse und dem Querschnitt der Bauteile, kann ein Restquerschnitt verbleiben, der für die Kraftübertragung wirksam ist und gegebenenfalls auch einen Raumabschluss darstellt. Dies wäre aber sowohl rechnerisch als auch experimentell nachzuweisen.

Für die jeweiligen Bauteile ergeben sich aus der Einbausituation unterschiedliche Möglichkeiten des Nachweises des Raumabschlusses:

Raumabschluss (E) Decken

Bei den Decken ist fast immer davon auszugehen, dass die Decken mit weiteren Schichten aufgebaut werden, die einen Raumabschluss gewährleisten. Schon im Montageprozess wird im Holzbau die fertige Decke mit einer durchgehenden Folie abgedichtet, die einen Feuchteschutz des Bauwerks für die Bauzeit darstellt. Diese Folien werden wasser-, dampf- und luftdicht verklebt und bilden einen Raumabschluss zwischen den Geschossebenen. Die Anschlüsse zu aufsteigenden Bauteilen sind entsprechend sorgfältig dicht zu konstruieren und auszuführen.

Auf die Folien werden im Allgemeinen Dämmschichten, Schüttungen und/oder Estriche aufgebaut, die den Tritt- und Luftschallschutz zwischen den Geschossen verbessern, lastverteilend wirken und auch technische Installationen

(Elektro, Fussbodenheizung) aufnehmen können, die wahlweise in getrennten Schichten abgebildet werden.

Es ist davon auszugehen, dass die form- und kraftschlüssigen Verbindungen alleine den Raumabschluss nicht leisten, aber in fast allen Einbausituationen andere Schichten aufgebaut werden, die diese Funktion übernehmen können und nur im Detail genau zu planen und umlaufend anzuschließen sind.

Raumabschluss (E) Wände

Bei Wänden bestehen die Anforderung an den Raumabschluss zwischen Einheiten und häufig auch an den Außenwänden.

Für die Außenwände lässt sich wie oben beschrieben feststellen, dass die form- und kraftschlüssigen Verbindungen alleine keinen ausreichend luft- und dampfdichten Anschluss leisten, um wirksam Infiltration, Konvektion und damit Wärmeverluste und Kondensat im Bauteil zu verhindern. Gerade die Konvektion stellt eine große Gefahr für Holzkonstruktionen dar, weil auch durch kleine Leckagen aufgrund des Temperatur- und Dampfdruckgefälles zwischen Innen und Außen große Mengen an Luft und damit Wasserdampf eingetragen werden können, die dann im Bauteil kondensieren, nicht abtrocknen und das Bauteil in einem nicht-sichtbaren Bereich schädigen (Fäulnis, Pilze). Es ist davon auszugehen, dass die Außenwände in allen Fällen mit zusätzlichen Maßnahmen möglichst an der Raum-Innenseite abzudichten sind. Infrage kommen luftdichte Verkleidungen (Stöße abgeklebt, mehrschichtig mit versetzten Stößen, verspachtelt, Folien mit luftdichtem Randanschluss).

Für die Trennwände ergeben sich die Anforderungen aus dem Brandschutz und Schallschutz. Für den Luftschallschutz ist die Luftdichtheit Voraussetzung. Im Brandfall entstehen aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen der Brandseite und der kalten Seite erhebliche Druckdifferenzen, die bei unzureichender Luftdichtheit zur Übertragung von Hitze und Rauch und ultimativ zum Brandüberschlag führen. In den meisten Holzgebäuden kann der Nachweis des Schallschutzes zwischen Wohneinheiten nur mit zweischaligen Konstruktionen geführt werden, weil eine einschalige Konstruktion, die Masse aufweist, meist unwirtschaftlich ist und in der Praxis nicht zur Ausführung kommt. Die Mehrschaligkeit ist hier auch die Chance, durch versetzte Stöße der unterschiedlichen Schichten und eine geeignete, luftdichte Konstruktion ohne Hohlräume einen ausreichend luftdichten Raumabschluss zu konstruieren. In der Praxis werden allerdings meist zusätzlich Klebebänder an den Fugen oder durchgehende Folien eingesetzt, weil Ungenauigkeiten innerhalb der Bauteile schwer zu erkennen sind und so die Qualität leichter zu prüfen ist.

Für das Modellvorhaben in Heidelberg kam eine mehrschichtige Trennwand als Wohnungstrenn- und Brandwand-Ersatzwand zwischen den zwei Brandabschnitten des Gebäudes zum Einsatz. Für diese Trennwand wurde im Zusammenhang mit der Prüfung der X-Verbinder Brandversuche unternommen, in denen gezeigt wurde, dass die doppelschalige Wand (zwei

Lagen BSP 120mm mit einer Dämmlage aus Mineralwolle 80mm) und die Anschlüsse den Feuerwiderstand und die Luftdichtheit leisten, aber die X-Verbinder ertüchtigt werden müssen.

Fazit: Umsetzung des konstruktiven Brandschutzes im Bausystem mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen

Die form- und kraftschlüssigen Verbindungen aus brandschutztechnisch gemäß der DIN EN 13501-2 definierten Leistungskriterien wie folgt zu bewerten sind:

R = Tragfähigkeit:

Lässt sich für die meisten verwendeten Verbindungen theoretisch und normativ nachweisen, auch wenn die experimentellen Nachweise nicht für alle Verbindungen geführt wurden. Einige Verbindungen (X-Fix Verbinder) erfüllen die Anforderung nur in Verbindung mit einer Bekleidung.

E = Raumabschluss:

Der Raumabschluss kann mit den form- und kraftschlüssigen Verbindungen alleine derzeit nicht angewiesen werden, weil die entsprechenden Brandversuche ausstehen. Im Hinblick auf andere bauphysikalische Anforderungen scheint aber beim derzeitigen Stand der Technik eine Kombination der relevanten Holzbauteile mit anderen Materialien wie Verkleidungen, Folien oder Klebebändern in fast allen Fällen geraten.

I = Wärmedämmung unter Brandeinwirkung

Diese Anforderung hängt weniger von dem Bausystem oder seinen Anschlüssen ab, sondern hauptsächlich von den flächigen Bauteilen zwischen den Nutzungseinheiten oder Brandabschnitten. Im Bausystem werden Decken und Wände (Gefachefüllung) entweder aus Massivholz / BSP konstruiert oder mit Holzrahmenbau. In beiden Fällen ist davon auszugehen, dass sich der Nachweis der Wärmedämmung unter Brandeinwirkung nachweisen lässt, wenn die Bauteilaufbauten entsprechend der Brandschutzanforderungen ausgewählt werden.

Zusätzlich nur in der europäischen Norm, gibt es noch weitere Feuerwiderstandsklassen:

W = Strahlungsdurchtritt

Bei geschlossenen Bauteilen ist der Strahlungsdurchtritt im Allgemeinen unproblematisch. Grundsätzlich hängt aber auch die Leistungsfähigkeit nicht von dem Bausystem und den Verbindungen, sondern der Gefachefüllung ab.

M = Stoßbeanspruchung

Auch diese Leistung hängt nicht vom Bausystem sondern der Gefachefüllung ab. Bei Massivholz lässt sich die Stoßbeanspruch direkt nachweisen. Bei Holzrahmenbau müssen gegebenenfalls mechanisch widerstandsfähige Schichten eingeplant werden aus Stahlblechen, OSB, Furnierschichtholz oder BSP / Dreischichtplatten.

Gesamtbetrachtung

Grundsätzlich wäre es im Sinne eines Bausystems mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen wünschenswert, wenn die Konstruktionen so einfach wie möglich wären und auf die Verkleidung und Ertüchtigungen der Holzbauteile verzichtet werden können. Nach aktuellem Stand der Forschung ist dies nur in Teilen der Konstruktion möglich. Gute Voraussetzungen bestehen für Massivholz-Bauweisen, weil die Anforderungen an Verkleidungen in der Gebäudeklassen 4 und 5 geringer sind.

Diese Bauweise, sowie der Nachweis des Brandwiderstands auf Abbrand ohne Verkleidungen ist nach der in 2023 geltenden Gesetzeslage und den anerkannten Regeln der Technik nur bis Gebäudeklasse 3, sowie über Ausnahmen und Befreiungen möglich, wenn entsprechende Kompensationen im Brandschutzkonzept nachgewiesen werden können.

Entsprechend der LBO Baden-Württemberg konnten die tragenden und aussteifenden Bauteile im Modellvorhaben in Heidelberg in reiner Holzbauweise ohne zusätzliche Verkleidung geplant werden. Die Brandschutzanforderung F60-B kann über eine Heißbemessung der Holzbauteile nachgewiesen werden.

Eine Ausnahme bildet der Laubengang als erster und zweiter Rettungsweg des Gebäudes. Hier ergab sich eine erhöhte Anforderung aus der Tatsache, dass die Evakuierung der BewohnerInnen in jedem Fall über den Laubengang gewährleistet werden sollte. Da die Trennwand zwischen den Wohnungen und dem Laubengang mit Fenstern und Türen ohne Brandschutzqualität ausgeführt wurden, bestand die hypothetische die Gefahr, dass ein Brand sich aus den Wohnungen auf den Laubengang ausbreitet. Hier sollte ein Brandüberschlag auf den Laubengang und angrenzende Wohneinheiten verhindert werden. Der Laubengang ist daher vom Bausystem losgelöst in Stahlbeton-Bauweise ausgeführt.

Voraussichtlich sind bei vielen Bauvorhaben in einzelnen Bereichen erhöhte Anforderungsfälle und entsprechende Sonderlösungen zu erwarten, die über die im Bausystem definierten Konstruktionen hinausgehen. Die folgende Betrachtung beschränkt sich an dieser Stelle nur auf einen Ausschnitt des Modellvorhabens, in dem für die Verallgemeinerung des Bausystems relevante Bauteilaufbauten zum Einsatz kommen, und lässt spezifische, projektabhängige Ausführungen weitestgehend außen vor.

Übersicht baulicher Brandschutz / Feuerwiderstand

Da das Modellvorhaben in Baden-Württemberg verwirklicht wird, lässt sich das Bausystem, wie zuvor dargestellt, in der Gebäudeklasse 4 weitestgehend ohne Abweichungen von der Bauordnung anwenden. Für die Bauteilanforderungen wird in den folgenden Aufstellungen demnach die LBO zugrunde gelegt. Darin werden die relevanten Anforderungen an die Ausführung der folgenden Bauteile gestellt:

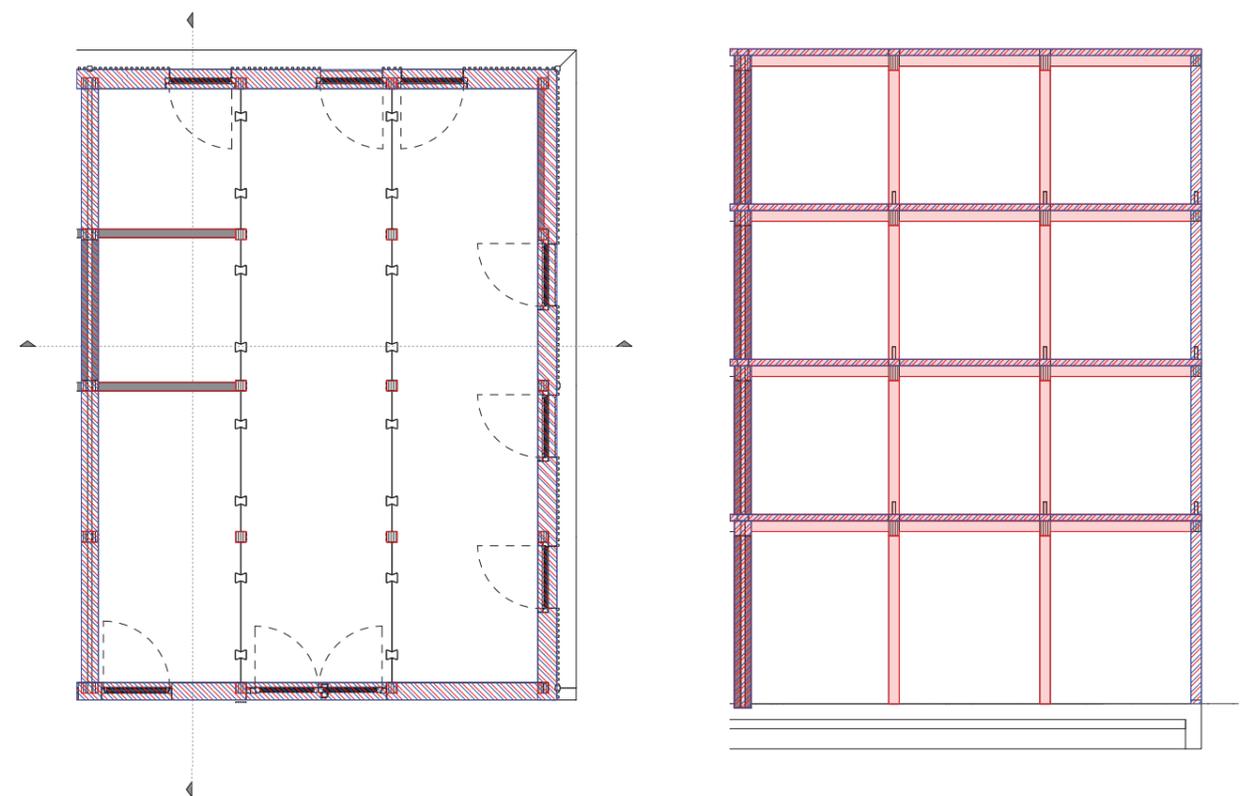
Bauteil	Baurechtliche Anforderung	Widerstandsklasse
Tragende Bauteile	§ 27 (1) LBO: tragende und aussteifende Bauteile müssen im Brandfall ausreichend lang standsicher sein § 4 (1) AVO-LBO: hochfeuerhemmend	R-60
Wohnungstrennwände	§ 27 (3) LBO: ausreichend lang widerstandsfähig gegen Brandausbreitung § 6 (2) AVO-LBO: raumabschließend hochfeuerhemmend	EI-60
Geschossdecken	§ 27 (5) LBO: ausreichend lange standsicher und widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung § 8 (1) AVO-LBO: raumabschließend hochfeuerhemmend	REI-60
Außenwände	§ 27 (2) LBO: ausreichend lange Begrenzung der Brandausbreitung § 5 (1) AVO-LBO: aus brennbaren Baustoffen, sofern rumabschließend und feuerhemmend	R-60 (tragend) EI-30 (nicht tragend)
Außenwandbekleidung	§ 5 (2) AVO-LBO: schwerentflammbar oder normalentflammbar, sofern ausreichend lange Begrenzung der Brandausbreitung gewährleistet § 5 (3) AVO-LBO: auskragende Verblechung am Geschossübergang mit geschossübergreifenden Hohlräumen	-
Brandwände	§ 27 (4) LBO: ausreichend lange Verhinderung der Brandausbreitung auf andere Gebäudeabschnitte § 7 (3-5) AVO-LBO unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung hoch feuerhemmend Führung durchgehend durch alle Geschosse 0,30m über Dachabschluss	REI-60-M K2-60

Tabelle 4:
Relevante Anforderungen an die Ausführung der Bauteile nach Landesbauordnung Baden-Württemberg.



Graphik 44:
Regelgeschoss des
Modellvorhabens in Heidelberg
Quelle: Meides & Schoop GbR.

- Legende
- Brandwandsatzwand (REI-M 60)
 - Trennwand (REI 60 wenn tragend und/oder aussteifend, sonst EI 60)
 - Für geschlossene Wandflächen gilt: Außenwand (REI 30 wenn tragend und/oder aussteifend, sonst EI 30)
 - Schachtwand EI 60 vor den Badzellen
 - notwendige Treppe
 - Laubengang



- Standicherheit R
- Raumabschluss E
- Wärmedurchgang I

Graphik 45:
Positionsplan der
Brandschutzanforderungen
für einen repräsentativen
Ausschnitt des
Modellvorhabens.

Wohnungstrennwände

An die Wohnungstrennwände werden die Brandschutzanforderungen EI-60 bzw. REI-60 für aussteifende Wandelemente gestellt. Als Aufbauten sind dafür zwei Wandaufbauten in Holztafel- und Holzmassivbauweise vorgesehen. Die massive aussteifende Wand besteht lediglich aus zwei 120mm starken BSP-Elementen, die durch eine nichtbrennbare Dämmschicht (Mineralwolle) getrennt sind. Auf eine raumseitige Bekleidung wird verzichtet. Nicht tragende Trennwände werden ebenfalls in zwei Schalen ausgeführt, die mit Mineralwolle ausgedämmt und voneinander getrennt sind. Als Beplankung kommen Gipskarton-Feuerschutzplatten und an den Oberflächen 3-Schicht-Platten zum Einsatz.

Für die Tafelbauwände wird der Bauteilabschluss zur Verhinderung von Hohlraumbränden durch die äußersten Rippen beziehungsweise Schwellen und Rähm gebildet, die als Füllholz eine Querschnittsbreite $\geq 60\text{mm}$ aufweisen müssen.⁴⁰ Bei den Vollquerschnitten der BSP-Elemente sind keine Maßnahmen zum Abschluss erforderlich.

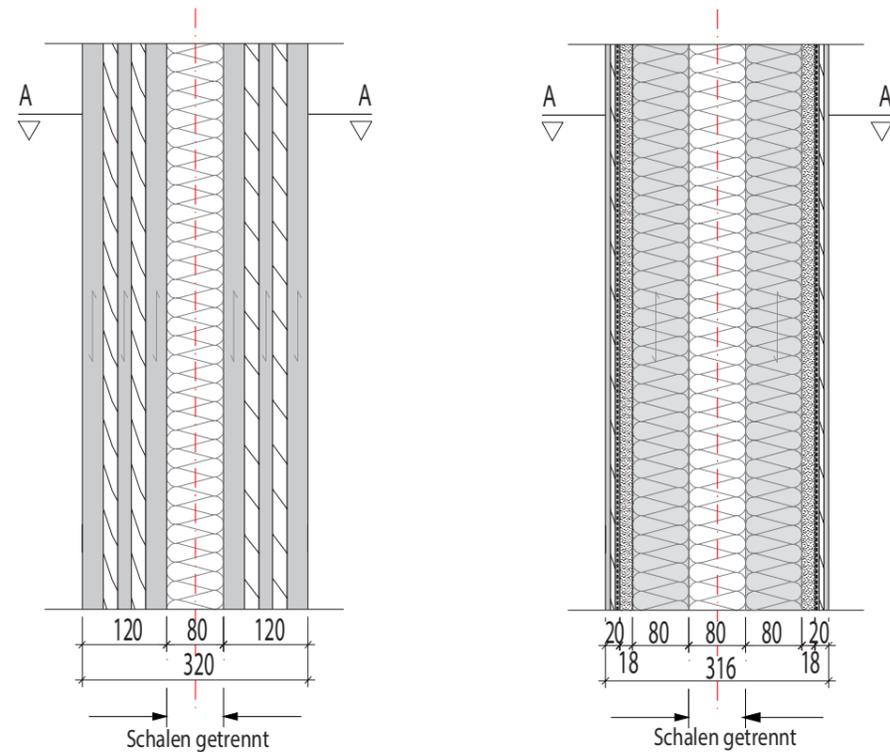
⁴⁰ vgl. Lignum-Dokumentation Brandschutz 4.2 Bauteile in Holz – Anschlüsse bei Bauteilen mit Feuerwiderstand, Zürich: Lignum, 2018.

Graphik 46: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand in Holzmassivbauweise.

- Brettsper Holz: 120mm, 30/20/20/20/30
- Dämmung Mineralwolle: 80mm
- Brettsper Holz: 120mm, 30/20/20/20/30

Graphik 47: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand in Tafelbauweise.

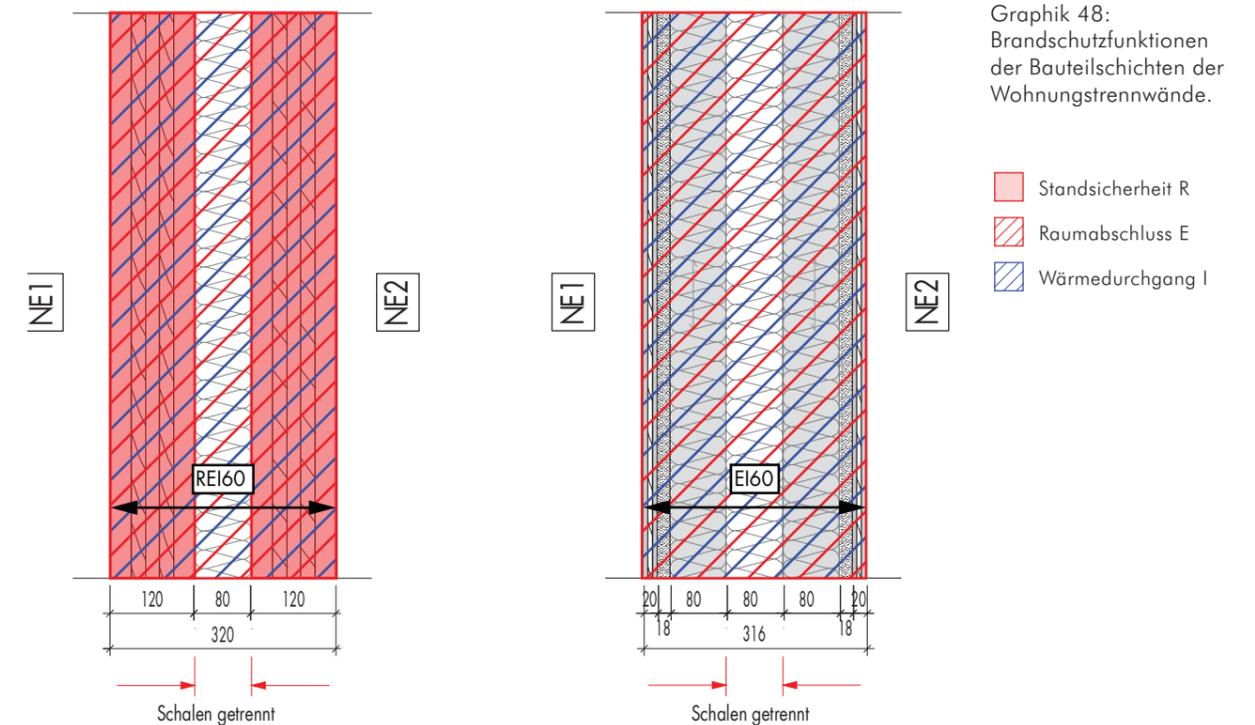
- Dreischichtplatte: 20mm
- Gipskarton-Feuerschutzplatte: 18mm
- Rippen: C24 60/80mm, $\alpha=625\text{mm}$
- Dämmung Mineralwolle: 80mm
- Dämmung Mineralwolle: 80mm
- Rippen: C24 60/80mm, $\alpha=625\text{mm}$
- Dämmung Mineralwolle: 80mm
- Gipskarton-Feuerschutzplatte: 18mm
- Dreischichtplatte: 20mm



An den Anschlüssen an die angrenzenden Bauteile ist zunächst zu beachten, dass die Unterzüge und Stützen Teile des Raumabschlusses bilden. Der Anschluss der Unterzüge an die Geschosstrenndecken ist somit als maßgeblich zu berücksichtigen. Als Vollquerschnitte sind sie ebenso zu behandeln wie die massiven Wandelemente. Die form- und kraftschlüssigen Verbindungen zwischen tragenden Bauteilen bilden geschlossene Bauteilfugen (Fugenbreite $f=0\text{mm}$) aus und es sind keine weiteren Maßnahmen notwendig.⁴¹

Der raumabschließende Anschluss der Tafelbauwände wird über eine (vor direkter Brandeinwirkung geschützte) Verschraubung der Ständerkonstruktion an die Tragelemente sowie eine umlaufende Abdichtung der äußeren Beplankungsstöße hergestellt. Zusätzlich wirkt bei beiden Trennwandaufbauten die auch über Geschossübergänge durchlaufende mineralische Dämmebene raumabschließend.

⁴¹ ebd.



Graphik 48: Brandschutzfunktionen der Bauteilschichten der Wohnungstrennwände.

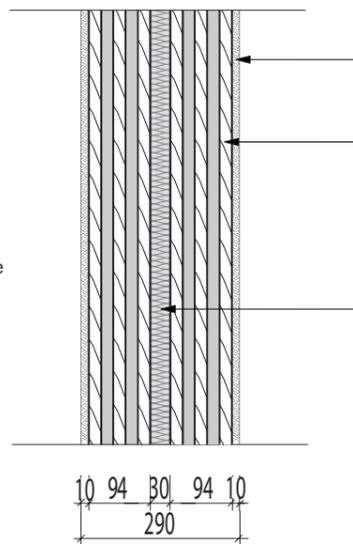
Die Standsicherheit R wird für die tragenden Wandelemente, Stützen und Unterzüge im Zuge der statischen Dimensionierung mit einer Heißbemessung der Bauteile nachgewiesen. Dadurch kann auf die im Referenzaufbau vorgesehene Oberflächenbekleidung verzichtet werden.

Der Nachweis über die Kriterien Raumabschluss E und Wärmedurchgang I erfolgt gemäß DIN EN 1995-1-2 Eurocode 5 Anhang E. Das Kriterium E gilt danach als erfüllt, wenn durch die Wärmedämmung I sichergestellt ist, dass sich die Bekleidung auf feuerabgewandter Seite nicht ablöst. Für verschiedene Wärmedurchgangswege wird die Dauer bis zu einer mittleren Temperaturerhöhung von 140K auf feuerabgewandter Seite des Bauteils ermittelt.

Graphik 49:
Zugelassener Bauteilaufbau
einer Trennwand in
Holzmassivbauweise (Quelle:
dataholz.eu).

Massivholz
(BSP, Brettstapel): $\geq 94\text{mm}$, mind.
3-lagig,
Decklage $\geq 30\text{mm}$

Dämmung
Mineralwolle: 30mm



Graphik 50:
Zugelassener Bauteilaufbau
einer Trennwand in Tafelbauweise
(Quelle: lignumdata.ch).

Gipsplatte: 15mm,
Fugen verspachtelt

Holzwerkstoffplatte:
15mm

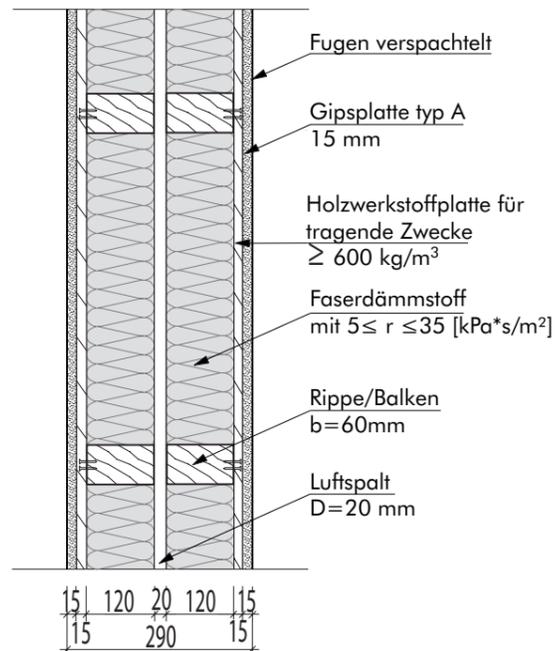
Rippen (Balken KVH):
60/120mm

Luftspalt:
20mm

Rippen (Balken KVH):
60/120mm

Holzwerkstoffplatte:
15mm

Gipsplatte:
15mm,
Fugen verspachtelt



Für die angegebenen Schichtaufbauten ergeben sich die folgenden Widerstandswerte:

Massivbauweise:

	Schichtstärke hp	$t_{ins,0,i}$	k_{pos}^*	k_i	t_{ins}	
Brettlage	20mm	10*	1	0,2	2,00	
Brettlage	20mm	10*	1	1	10,00	
Brettlage	20mm	10*	1	1	10,00	
Steinwolle	80mm	16**	1	1	16,00	
Brettlage	20mm	10*	1	1	10,00	
Brettlage	20mm	10*	1	1,5	15,00	
Brettlage	20mm	10*	1	1,5	15,00	t_{req}
					78,00	> 60

nach Anhang E zu DIN EN 1995-1-2

* Tabelle E.5

** Tabelle E.7

Tafelbauweise:

	Schichtstärke hp	$t_{ins,0,i}$	k_{pos}^*	k_i	t_{ins}	
3-Schichtplatte	19mm	9,5*	1	0,2	1,90	
Gipsfaser /GKF	18mm	25,2**	0,6	1	15,12	
Steinwolle	240mm	48***	1	1	48,00	
Gipsfaser /GKF	18mm	25,2**	1	1	25,20	
3-Schichtplatte	19mm	9,5*	1,5	0,2	2,85	t_{req}
					93,07	> 60

nach Anhang E zu DIN EN 1995-1-2

* Tabelle E.5

** Tabelle E.6

*** Tabelle E.7

$$t_{ins} = \sum t_{ins,0,i} * k_{pos} * k_i$$

Nachweis für raumabschließende Bauteile ist erbracht bei $t_{ins} \geq t_{req}$

t_{ins} = Dauer bis zur Temperaturerhöhung von max. 180K auf feuerabgewandter Seite

t_{req} = erforderlicher Feuerwiderstand (EI)

$t_{ins,0,i}$ = Grundwert der Wärmedämmung einer Lage/Schicht

k_{pos} = Positionsbeiwert

k_i = Fugenbeiwert

Wohnungstrenndecken

Als Trennung zwischen zwei Nutzungseinheiten gilt für die Geschosstrenndecken wie für die aussteifenden Wohnungstrennwände die Anforderung REI-60. Der Bauteilaufbau besteht aus den tragenden, unterseitig unbekleideten BSP-Elementen, auf der eine elastisch gebundene Splittschüttung zur schallschutztechnischen Beschwerung, mineralische Trittschalldämmung und ein Nassestrich aufgebracht werden.

Die Vollquerschnitte mit mineralischem Schichtaufbau erfordern keine zusätzlichen Maßnahmen zum inneren Bauteilabschluss. An der form- und kraftschlüssigen Fügung der Deckenelemente kann von geschlossenen Bauteilfugen ausgegangen werden, die ohnehin durch die folgenden Schichten oder unterseitig durch die Unterzüge überdeckt werden.

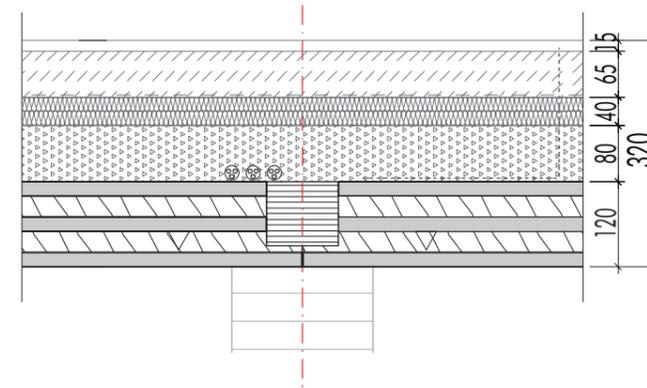
Die Deckenkonstruktion entspricht prinzipiell dem Aufbau eines zugelassenen Bauteils (Abbildung 12) – es wird lediglich eine höhere Stärke der BSP-Elemente von 140mm gegenüber den geplanten 120mm gefordert. Die Tragfähigkeit des geringeren Querschnitts wurde durch die statische Bemessung nachgewiesen. Da durch die Anforderung der Gebrauchstauglichkeit und Eigenschwingung des Bauteils bereits ein Zuschlag auf den Bauteilquerschnitt angesetzt wurde, mussten keine zusätzlichen Schichten für eine Heißbemessung hinzugefügt werden.

Als zusätzlicher Verwendbarkeitsnachweis konnte ein bestehendes allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis für raumabschließende Brettsperrholzdecken herangezogen werden, nach dem auch Querschnitte von 120mm ohne unterseitige Bekleidung zulässig sind.⁴²

Tabelle 5: Übersicht der konstruktiven Ausführungsvarianten der Brettsperrholzelemente entsprechend dem AbP P-SAC02/III-705.

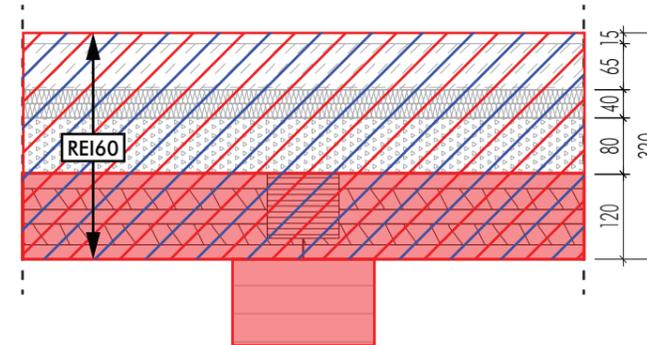
Konstruktion	I	II	III	IV
Feuerwiderstandsklasse	F60	F60	F90	F90
BBS Typ	100-5s	120-5s	130-5s	130-5s
Dicke der einzelnen Bretteinlagen (1/2/3/4/5)	20/20/20/20/20	21/26/26/26/21	20/26/38/26/20	20/26/38/26/20
unterseitige Bekleidung	15mm GKF/DF direkt bekleidet Abschnitt 4.2.2.	–	15mm GKF/DF direkt bekleidet Abschnitt 4.2.2.	15mm GKF/DF + zusätzlich mit Abhängsystem (Justierschwingbügel, Holzlattung) und Mineralwolldämmung (Glaswolle) Abschnitt 4.2.2.

42 vgl. Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis Nr. P-SAC02/III-705: Bauart zur Errichtung von tragenden, raumabschließenden Deckenkonstruktionen, aus Binderholz BBS Brettsperrholzelementen in Verbindung mit bzw. ohne eine deckenunterseitige Bekleidung mit Rigips Feuerschutzplatten RF, der Feuerwiderstandsklasse F 60-B bzw. F 90-B (in Abhängigkeit der konstruktiven Ausführung) gemäß DIN 4102-2: 1977-09 [1] bei einseitiger Brandbeanspruchung von der Deckenunterseite. , MFPA Leipzig GmbH, 8 Januar 2020

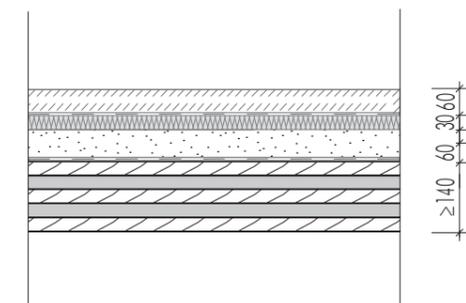


Graphik 51: Bauteilaufbau der Geschosstrenndecken

- (von oben)
- Bodenbelag: var.
 - Zementestrich: 65mm
 - Trittschalldämmung Mineralwolle: 40mm
 - Splittschüttung, elastisch gebunden: 80mm, mind. 1600kg/m³
 - Brettsschichtholz: 120mm, 20/30/20/30/20



Graphik 52: Brandschutzfunktionen der Bauteilschichten der Wohnungstrennwände.



Graphik 53: Zugelassener Bauteilaufbau einer Geschosstrenndecke (Quelle: dataholz.eu).

- (von oben)
- Zementestrich: 60mm
 - Trittschalldämmung Mineralwolle: 30mm
 - Schüttung, elastisch gebunden: 60mm, ca. 90kg/m²
 - Brettsperrholz: ≥140mm

- Standsicherheit R
- Raumabschluss E
- Wärmedurchgang I

Dach

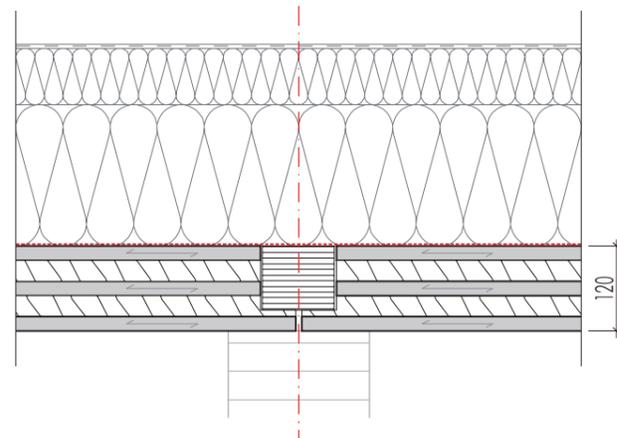
Bei innenseitiger Brandeinwirkung wird an die Dachkonstruktion nur eine Gewährleistung der Standsicherheit mit einem Feuerwiderstand R60 gefordert. Analog zu den Geschosstrenndecken wird der Nachweis dazu über eine Heißbemessung der tragenden BSP-Elemente erbracht.

Auf den BSP-Decken wird ein Schichtaufbau bestehend aus Dampfbremse, einer Dämmschicht aus Mineralwolle und einer EPS-Gefälledämmung mit Folienabdichtung (EPDM) vorgesehen. Für diesen Schichtaufbau muss die Anforderung an eine „harte Bedachung“ nach DIN 4102-4 erfüllt werden, d.h. ein gegen äußere Brandeinwirkung durch Flugfeuer oder strahlende Wärme widerstandsfähig sein.

Dies lässt sich für die eingesetzten Baustoffe- und produkte auf Grundlage der jeweiligen Herstellerangaben sicherstellen. Grundsätzlich ist dabei auch der Einsatz außenliegender brennbarer Baustoffe – hier EPDM und EPS – möglich, sofern die Dachneigung 20° nicht übersteigt und der darunterliegende Baustoff nicht brennbar ist.

Graphik 54:
Bauteilaufbau des Daches:

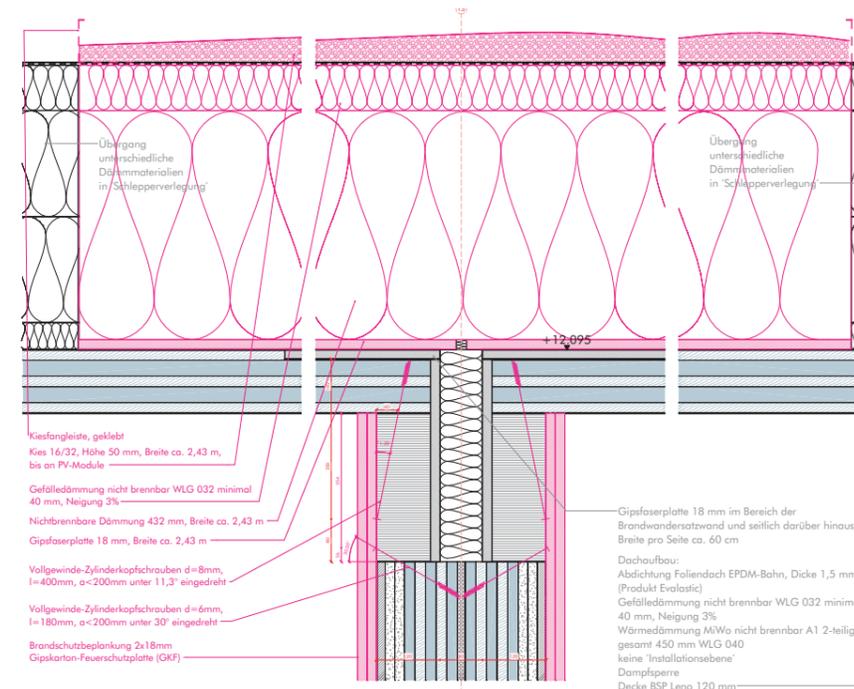
- (von außen)
- Foliendach
- Gefälledämmung: var.
- Dämmung Mineralwolle: ca. 400mm
- Dampfbremse/ Abdichtungsbahn: 120mm,
- Brettsperrholz: 20/30/20/30/20



Anschluss der Brandwand an das Dach

Gemäß LBOAVO [14] § 7 (5) sind Brandwände 0,30 m über die Bedachung zu führen oder in Höhe der Dachhaut mit einer beiderseits 0,50 m auskragenden feuerbeständigen Platte aus nichtbrennbaren Baustoffen abzuschließen; darüber dürfen brennbare Teile des Daches nicht hinweggeführt werden. Da es sich bei der Brandwand um eine Brandwandersatzwand in einer Gebäudeklasse 4 handelt, ist der § 7 (3) Nr. 1 der LBOAVO in Anspruch genommen worden. Somit müssen die auskragenden, deckengleichen Platten ‚nur‘ hochfeuerhemmend sein. Nach §26 LBO sind hochfeuerhemmende raumabschließende Bauteile aus brennbaren Baustoffen zulässig, wenn die hinsichtlich der Standsicherheit und des Raumabschlusses geforderte Feuerwiderstandsdauer nachgewiesen und die Bauteile und ihre Anschlüsse ausreichend lang widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sind.

Die Dachdecke besteht aus 120 mm dickem BSP, welches raumseitig unbelkleidet ist. Der Raumabschluss ist nachgewiesen worden. Weiter ist positiv zu bemerken ist, dass die Fuge zwischen Dachdecke und dem Unterzug auf der Brandwandersatzwand rückseitig (im Wandzwischenraum) mit einer 18 mm GKF Platte überdeckt ist. In Abschnitt 3.2.7 wird auch die raumseitige Bekleidung der Brandwandersatzwand mit einer 2 x 15mm GKF oder GF Plattenbeplankung gefordert.



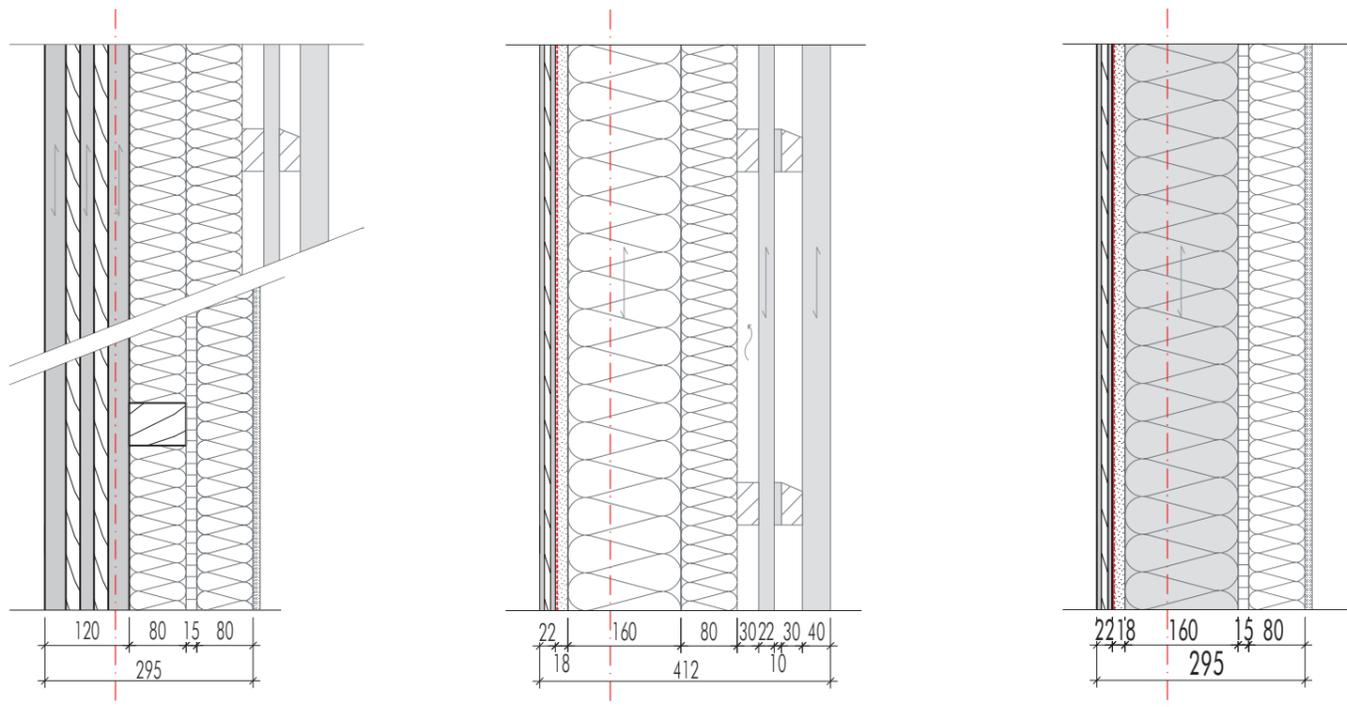
Graphik 55:
Detail Anschluss der Brandwand an das Dach zeigt die ausgeführte deckengleiche Brandwandersatzwand.

Graphik 56:
Bauteilaufbauten
aussteifender Außenwände
mit Holzfassade (oben) und
WDVS (unten).

Graphik 57:
Bauteilaufbauten
nichttragender Außenwände
mit Holzfassade (links) und
WDVS (rechts).

Außenwand

Vergleichbar zu den Wohnungstrennwänden werden die Außenwände vor allem in Tafelbauweise und teilweise als aussteifende Massivbauwände ausgeführt. An letztere werden dementsprechend höhere Brandschutzanforderungen hinsichtlich der Standsicherheit von R-60 gefordert. Ansonsten gilt für Außenwände lediglich die Anforderung EI-30. Die inneren Bauteilabschlüsse und die Anschlüsse an angrenzende Bauteile erfolgen nach den gleichen Prinzipien, die auch für die Wohnungstrennwände angewandt werden. Die Bauteile entsprechen weitestgehend den konstruktiven Prinzipien zugelasener Bauteilaufbauten.



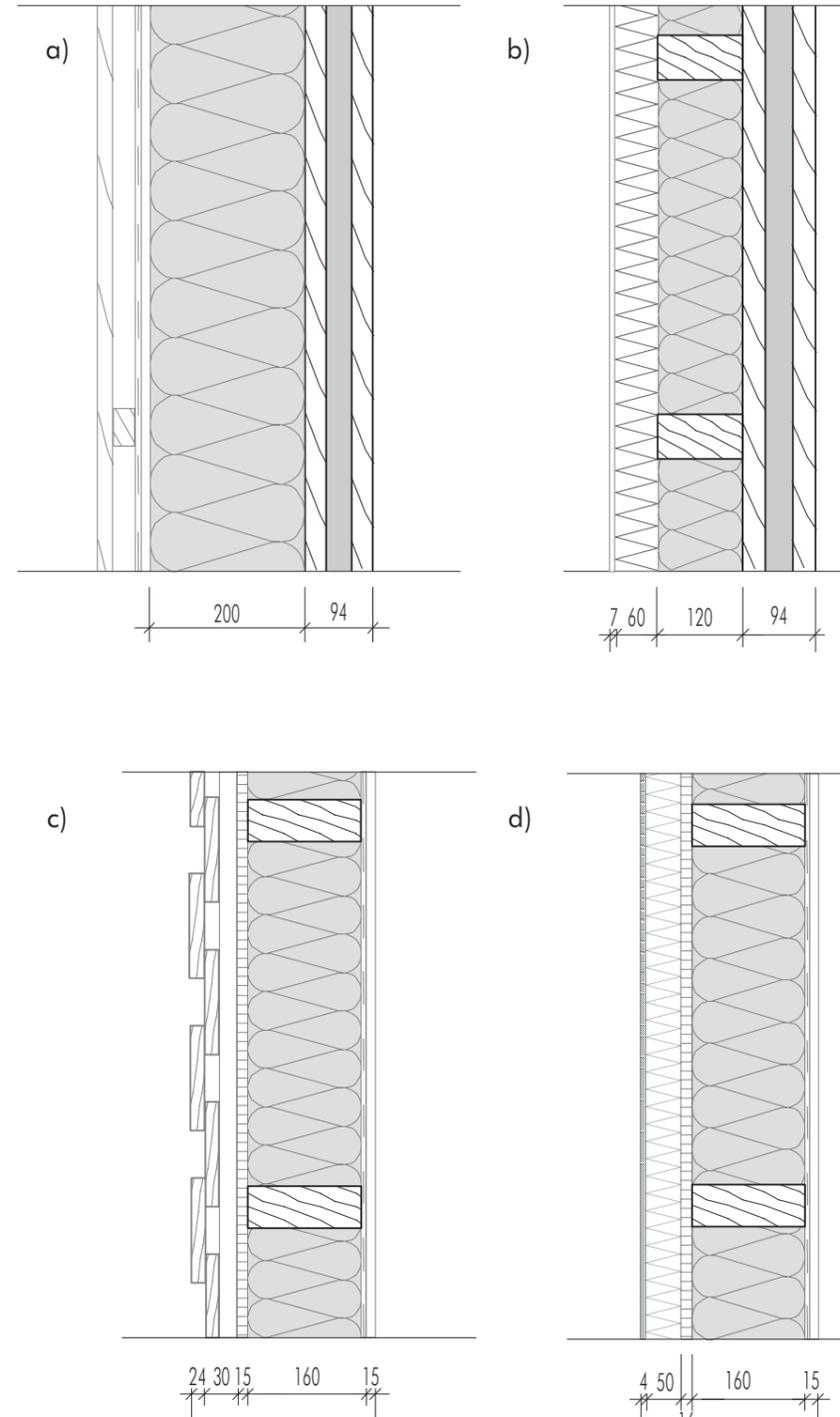
- (von innen)
- Brettspertholz: 120mm, 30/20/20/20/30
- Druckbelastbare Steinwollämmplatten: 160mm
- Traglattung horizontal: 30/50mm
- Holzschalung vertikal: 100/24mm
- Traglattung horizontal: 30/50mm
- Fassadenbekleidung Holzleisten vertikal: 40/40mm

- (von innen)
- Brettspertholz: 120mm, 30/20/20/20/30

- Dämmung Mineralwolle: 80mm
- Holzwerkstoffplatte OSB: 15mm
- Minerallwolle-dämmplatte: 80mm
- WDVS-Putz: var.

- (von innen)
- Dreischichtplatte: 22mm
- Feuchtevariable
- Dampfbremse: -
- Gipsfaserplatte: 18mm
- Rippen: C24 60/160mm, a=625mm
- Dämmung Mineralwolle: 160mm
- Druckbelastbare Steinwollämmplatte: 80mm
- Traglattung horizontal: 30/50mm
- Holzschalung vertikal: 100/24mm
- Traglattung horizontal: 30/50mm
- Fassadenbekleidung Holzleisten vertikal: 40/40mm

- (von innen)
- Dreischichtplatte: 22mm
- Feuchtevariable
- Dampfbremse: -
- Gipsfaserplatte: 18mm
- Rippen: C24 60/160mm, a=625mm
- Dämmung Mineralwolle: 160mm
- Holzwerkstoffplatte OSB: 15mm
- Minerallwolle-dämmplatte: 80mm
- WDVS-Putz: var.



Graphik 58:
Vergleichbare zugelasene
Außenwandaufbauten:
a) Massivholzkonstruktion mit
Holzfassade,
b) Massivholzkonstruktion mit
WDVS,
c) Tafelbaukonstruktion mit
Holzfassade,
d) Tafelbaukonstruktion mit
WDVS

- a) Massivholzkonstruktion mit Holzfassade
- (von innen)
 - Brettspertholz: 100mm
 - Holzfaserdämmplatte: 200mm
 - Konstruktionsholz: 200mm
 - Gipsfaserplatte: 15mm
 - Diffusionsoffene Folie: -
 - Holzlattung vertikal: 30mm
 - Holzschalung/Verkleidung: 24mm

- b) Massivholzkonstruktion mit WDVS
- (von innen)
 - Brettspertholz: 90mm (REI 30)
 - Holzfaserdämmung: 120mm
 - Konstruktionsholz: 120mm
 - Holzfaserdämmplatte: 60mm
 - Putzsystem: 7mm

- c) Tafelbaukonstruktion mit Holzfassade,
- (von innen)
 - Gipsfaserplatte: 15mm
 - Dampfbremse: -
 - Minerallwollämmung: 160mm
 - Konstruktionsholz (Rippen): 160mm
 - MDF-Platte: 15mm
 - Holzlattung vertikal: 30mm
 - Holzschalung/Verkleidung: 24mm

- d) Tafelbaukonstruktion mit WDVS
- (von innen)
 - Gipsfaserplatte: 15mm
 - Dampfbremse: -
 - Minerallwollämmung: 160mm
 - Konstruktionsholz (Rippen): 160mm
 - Spanplatte: 16mm
 - Polystyrol EPS-F: 50mm
 - Putzsystem: 4mm

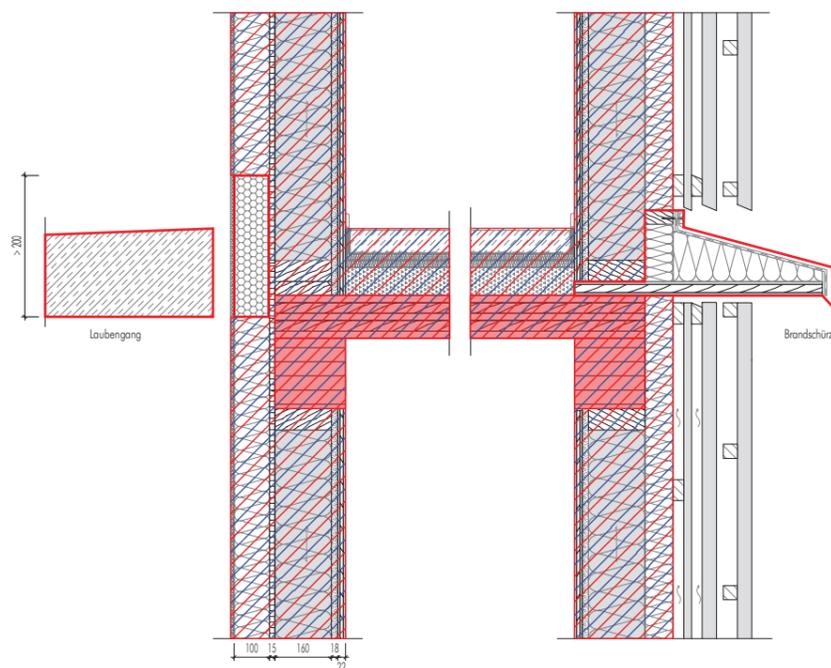
(Quelle: dataholz.eu)

Im Modellvorhaben kommen sowohl brennbare als auch nicht brennbare Fassadenbekleidungen zum Einsatz. Hofseitig zur Laubengangerschließung gerichtet ist eine WDVS-Fassade in der Baustoffklasse A (nicht brennbar) geplant. Ein vertikaler Brandüberschlag ist somit vor allem im Bereich von Fassadenöffnungen zu berücksichtigen und wird durch einen Dämmstreifen der Baustoffklasse A1 und den in Stahlbeton ausgeführten Laubengang verhindert.

Die nach außen gerichteten beziehungsweise dem Laubengang abgewandten Fassaden sind als belüftete Holzfassaden geplant und somit brennbar. Da dies nicht den bauordnungsrechtlichen Vorschriften entspricht, musste eine Erleichterung durch den Nachweis einer wirksamen Verhinderung der Brandausbreitung über Geschosse und Brandabschnitte hinweg erwirkt werden. Dies erfolgt durch die Ausbildung einer durchgängigen auskragenden Brandschürze am Geschossübergang (Graphik 57).

Graphik 59: Brandschutzfunktionen der Außenwandkonstruktionen mit WDVS (links) und vorgelagertem Laubengang und Holzfassade (rechts) mit Ausbildung einer Brandschürze.

- Standsicherheit R
- Raumabschluss E
- Wärmedurchgang I

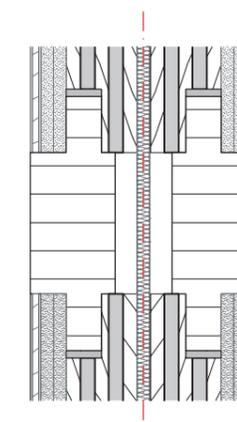
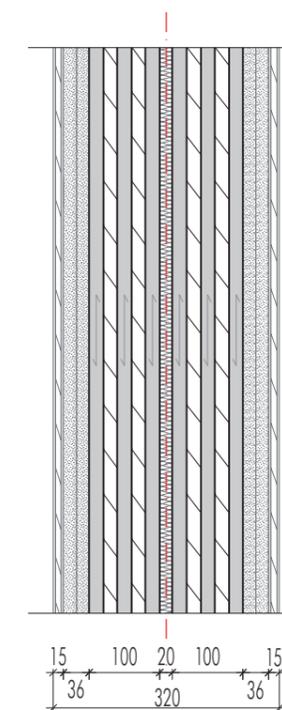


Brandwandersatzwand

Die Dimensionen des Modellvorhabens erfordern die Ausbildung getrennter Brandabschnitte. Dafür ist eine Brandwand vorzusehen, die nach §30 (3) Satz 1 in Gebäudeklasse 4 anstelle von ausschließlich nicht brennbaren Konstruktionen als Brandwandersatzwand ausgeführt werden kann, solange sie hochfeuerhemmend unter zusätzlicher mechanischer Einwirkung eingestuft. Dies schließt auch den Einsatz tragender Holzbauteile mit ein. Daraus ergibt sich als Anforderung ein Feuerwiderstand von REI-60-M mit der zusätzlichen Kapselanforderung K2-60, um eine Brandausbreitung auf die tragenden Bauteile zu verhindern.

Der zweischalige Wandaufbau setzt sich aus aussteifenden Massivholzelementen zusammen, die jeweils mit einer doppelten Schicht Gipskarton-Feuerschutzplatten gekapselt werden. Zur Herstellung einer holzsichtigen Oberfläche wird raumseitig eine 3-Schicht-Platte aufgebracht. Die Schalen werden durch eine über alle Geschosse durchlaufende mineralische Dämmschicht voneinander getrennt.

Die in den Raumabschluss der Brandwandersatzwand eingebundenen Stützen werden mit einem Sonderquerschnitt ausgebildet, um am Anschluss zwischen Wänden und Stützen eine Verschränkung herzustellen und durchgängige Fugen zu vermeiden.



Graphik 60: Bauteilaufbau der Brandwandersatzwand mit Integration der Stützen:

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Dreischichtplatte: | 15mm |
| Gipskarton-Feuerschutzplatte: | 2 x 18mm |
| Brettsperrholz: | 100mm, 20/20/20/20/20 |
| Dämmung Mineralfaser: | 20mm, Schmelzpunkt > 1000°C |
| Brettsperrholz: | 100mm, 20/20/20/20/20 |
| Gipskarton-Feuerschutzplatte: | 2 x 18mm |
| Dreischichtplatte: | 15mm |

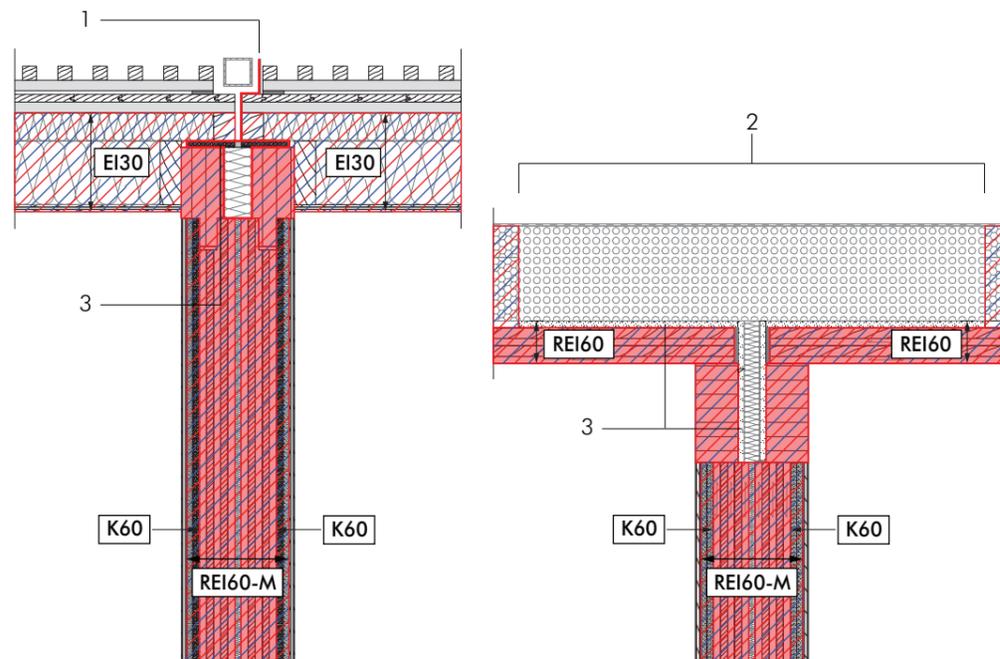
Am Dachanschluss müssen Brandwände gemäß MBO § 30 (5) mindestens 30cm über die Bedachung geführt werden und mit einem beiderseits mindestens 50 cm auskragenden, nicht brennbaren Baustoff abgedeckt werden. Im Modellvorhaben wird dazu eine entsprechende Dämmplatte in den Dachaufbau integriert. Die Verhinderung einer horizontalen Brandausbreitung an Außenwänden ist im Bereich der Brandwände ebenfalls zu gewährleisten. Dies wird durch die Ausbildung einer Verblechung als vertikale Brandschürze erreicht, wie obenstehend bereits erläutert.

Zum Verwendbarkeitsnachweis für den Aufbau der geplanten Brandwandersatzwand in Brettsperrholzbauweise mit Feuerschutzbekleidung liegt ein entsprechendes allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis vor.

Graphik 61:
Brandschutzfunktionen der
Brandwandersatzwand,
Horizontalschnitt des
Außenwandanschlusses
Dachanschlusdetail.

- Standsicherheit R
- Raumabschluss E
- Wärmedurchgang l

- 1.) Vertikale Brandschürze,
Überstand >20mm.
- 2.) A1-Dämmung,
druckfest,
z.B. Schaumglas.
- 3.) Zusätzliche Verkleidung
mit Gipsfaserplatten.



6.3. SCHALLSCHUTZ

Grundsätzlich wird im Bezug auf den Schallschutz zwischen den Begriffen der Bauakustik und der Raumakustik unterschieden. Die Bauakustik beschäftigt sich mit allen Anforderungen, die die Eindämmung oder Reduktion von Schall-/Geräuschemissionen erfordern. Im Gebäudeinneren geht es hierbei um die Eindämmung der Schallübertragung von einer Nutzungseinheit zur nächsten. Als maßgebliche Bauteile werden dazu insbesondere die Geschossdecken und die Wohnungstrennwände betrachtet. Gleichzeitig beschäftigt sich die Bauakustik auch mit der Eindämmung äußerer Lärmpegel, die beispielsweise durch Verkehrslärm erzeugt werden. Hier liegt der Fokus dann auf der Außenwand und deren schalldämmenden Eigenschaften.

Die Raumakustik beschreibt, wie sich Sprache und andere Geräuschquellen innerhalb eines Raumes ausbreiten und wie diese optimal im Raum gedämpft oder geführt werden können. Allerdings spielt die Raumakustik im Wohnungsbau aufgrund der vergleichsweise geringen Raumgrößen eine eher untergeordnete Rolle und soll hier nicht weiterführend behandelt werden. Es werden auch keine baurechtlichen Anforderungen an Wohngebäude hinsichtlich der Raumakustik gestellt. Der Schwerpunkt der weiteren Betrachtung liegt daher auf der Bauakustik.

Im Hinblick auf die Bauakustik sind zwei Übertragungsarten zu untersuchen. Einerseits der Luftschall – die Ausbreitung von Schallwellen im Raum – und andererseits der Körperschall, der die Weiterleitung der Schallausbreitung durch physische Körper, das heißt Baustoffe und Bauteile, beschreibt. Als Sonderform des Körperschalls ist bei der schalltechnischen Bewertung von Bauwerken der Trittschall relevant. Der Trittschall stellt aufgrund der Anregung der Deckenbauteile vor allem im Holzbau eine besondere Herausforderung dar.

In der Bauakustik wird zwischen bewerteten und nicht bewerteten Schalldämmmaßen von Bauteilen unterschieden. Im Labor werden Wand- oder Deckenaufbauten rein in der Fläche auf ihre schalldämmenden Eigenschaften geprüft. Daraus kann ein Laborwert als Schalldämmmaß ermittelt werden, der mit dem praktischen Einsatz im Bauwerk selbst aber nicht in Korrelation steht. Der vielfältige Einsatz der Bauteile in unterschiedlichen Einbausituationen mit variablen flankierenden Bauteilen lässt eine technische Bewertung des Bauteils und somit eine finale Angabe eines bewerteten Schalldämmmaßes erst nach abschließender Definition aller flankierenden Bauteile und aller Schallnebenwege zu.

Schallschutzanforderungen im Wohnungsbau

Zur Reduktion der Lärmquellen und zum Schutz der Bewohner werden im Bauwesen Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung der einzelnen Bauteile gestellt. In Deutschland gibt es hierzu verschiedene Grundlagen zur Definition dieser Schallschutzanforderungen. Es wird im Wesentlichen auf drei Anforderungsdefinitionen zurückgegriffen, die für verschiedene Bauteile unterschiedliche Berechnungs- und Bewertungsverfahren definiert haben.

Baurechtlich sind die Mindestanforderungen in der DIN 4109 festgelegt. Zentraler Ausgangspunkt ist darin die Gewährleistung der Schutzziele des Gesundheitsschutzes, der Sicherstellung von Vertraulichkeit bei normaler Sprechweise sowie des Schutzes vor unzumutbarer Lärmbelastung, insbesondere vor Außenlärm. Als Maßstab wird dazu für die Bewertung des Schalldämmmaßes ein in Wohnräumen zu erwartender Grundgeräuschpegel von 25 dB angesetzt. Um die Eignung für eine Wohnnutzung nachzuweisen, müssen alle maßgeblichen Bauteile und Bauteilanschlüsse diese Mindestanforderungen für den Wohnungsbau erfüllen, die für den Holzbau wie für alle anderen Bauweisen gleichermaßen gelten.

Zwischen Nutzungseinheiten gelten nach DIN 4109 allgemein ein Mindestschalldämmmaß von $R'_{w} \geq 54$ dB und ein einzuhaltender Trittschallpegel von $L'_{n,w} \leq 50$ dB. Die Norm schreibt dabei ein Bewertungsspektrum im Frequenzbereich von 100-3150 Hz vor. Tieffrequente, aber oft stark wahrnehmbare Schalleinwirkungen werden somit nicht berücksichtigt. Daher wird die Bewertung in der Regel zusätzlich durch den Anpassungswert CI für das Frequenzspektrum 50-2500 Hz erweitert. Für Außenbauteile wird in Abhängigkeit vom erwartbaren Außenlärmpegel ein R'_{w} -Wert zwischen 30-50 dB gefordert.

Die Anforderungen an für das Bausystem relevante Bauteile nach DIN 4109 sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Bauteil	Anforderung DIN 4109- 1:2018-01
Wohnungstrennwand	$R'_{w} \geq 53$ dB
Gebäudetrennwand	Zu Aufenthaltsräumen im untersten Geschoss $R'_{w} \geq 59$ dB Zu Aufenthaltsräumen mit mind. einem Geschoss darunter $R'_{w} \geq 62$ dB
Wohnungstrenndecke	Luftschall $R'_{w} \geq 54$ dB Trittschallpegel $L'_{n,w} \leq 50$ dB Trittschallpegel für Decken nach DIN 4109-33:2016 $L'_{n,w} \leq 53$ dB

Tabelle 6: Anforderungen an Bauteile laut DIN 4109. Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN).

Im Kontext des Wohnungsbaus ist zu beachten, dass diese Mindestanforderungen in der gängigen Baupraxis häufig übererfüllt werden. Die dadurch etablierten, sogenannten „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ bilden einen zusätzlichen Maßstab, der zwar nicht baurechtlich einzuhalten ist, aber oft den Nutzererwartungen entspricht.

Dadurch erhöhte Anforderungen an den Schallschutz, die im modernen Wohnungsbau eigentlich nicht mehr wegzudenken sind, werden im Beiblatt 2 der DIN 4109 von 1989 geregelt, welches im Gegensatz zum Hauptteil der Norm von 1989 nicht zurückgezogen wurde. Für den modernen Wohnungsbau wird deswegen bei Wahl der DIN fast immer auf ebendieses Beiblatt 2 zurückgegriffen. Weitere Richtwerte ergeben sich zum Beispiel aus der VDI-Richtlinie 4100 aus dem Jahr 2012 und aus der DEGA-Empfehlung 103. Alle drei Anforderungskataloge sind aber nicht direkt vergleichbar, da sich die Berechnungsverfahren unterscheiden oder die Anforderungen anders abgestuft sind.

Allgemeine konstruktive Maßnahmen zum Schallschutz im Holzbau

Für den Holzbau sind einige spezifische Herausforderungen bezüglich des Schallschutzes zu beachten. Vor allem besitzt Holz im Vergleich zu Mauerwerk oder Beton ein weitaus geringeres Eigenwicht und lässt sich somit sehr viel leichter durch Schalldruckwellen oder mechanisch anregen. Um diese Einschränkungen zu kompensieren und einen im Vergleich zu anderen Bauweisen gleichwertigen Schallschutz zu erzielen, können verschiedene konstruktive Ansätze angewandt werden, die im Folgenden anhand der gängigen Konstruktionsweisen des Holzbaus und verschiedenen Bauteilgruppen aufgezeigt werden.

Holztafelbauweise

Für den verbreitet eingesetzten Holztafelbau können verschiedene konstruktive Ansätze für eine Verbesserung des Schallschutzes verfolgt werden. Zunächst wirken sich die flächenbezogene Masse sowie die Biegesteifigkeit der gewählten Beplankung des Ständerwerks maßgeblich auf die Schalldämmung des Bauteils aus. Bei höherer Masse und Biegeweichheit der eingesetzten Plattenwerkstoffe können grundsätzlich bessere Werte erzielt werden. Zusätzlich besteht zur weiteren Optimierung die Möglichkeit, die Beplankung als entkoppelte Vorsatzschale vor der Grundkonstruktion zu montieren.

Ebenso trägt die Wahl einer Hohlraumdämmung im Bauteil zum Schallschutz bei. Um eine möglichst hohe schallabsorbierende und – dämpfende Wirkung zu erzielen kommen vor allem Faserdämmstoffe, aber auch druckfeste Dämmstoffe oder Einblasdämmstoffe zum Einsatz. Gegebenenfalls kann sich auch die durch Dämmstoffe erhöhte Bauteilmasse positiv auswirken.

Konstruktiv besteht die Möglichkeit, Anpassungen des Ständerwerks vorzunehmen. Eine Trennung der inneren Struktur in zwei entkoppelte Ständerlagen führt zur Vermeidung direkter Schallbrücken. Durch einen möglichst großen Abstand im Ständerraster können die Schwingungseigenschaften der Beplankungen verbessert werden.

Massivholzkonstruktion

Massive Bauelemente aus Brettschicht-, Brettsperr- oder Brettstapelholz wirken zunächst als einschalige Bauteile und erreichen jeweilige Schalldämmwerte in Abhängigkeit von ihrer flächenbezogenen Masse und Biegefestigkeit. Direkt aufgebrachte Beplankungen fließen in diese Parameter mit ein.

Optimierungen erfolgen auch im Massivbau entweder durch einen zweischaligen Aufbau und somit der Entkopplung der Tragelemente oder zusätzliche Bekleidungsschichten aus Dämmstoffen und Beplankungen, die als Vorsatzschalen ausgeführt werden können. Diese Konstruktionen gehen häufig mit den Anforderungen an den Brandschutz einher.

Deckenkonstruktionen

Im Holzbau werden mehrere verschiedene Deckenkonstruktionen eingesetzt. Die gängigen Konstruktionsvarianten sind Holzbalkendecken, Massivholzdecken, die alternativ auch als Rippendecken oder aus Kastenelementen aufgebaut sein können, sowie Holz-Beton-Verbunddecken. Letztere können neben der Kombination der statischen Vorteile der Baustoffe auch Schallschutzanforderungen durch den Betonanteil auffangen. Den reinen Holzkonstruktionen fehlt hingegen der entsprechende Gewichtsanteil, der durch zusätzliche Schichtaufbauten in das Bauteil eingebracht werden muss. Dies erfolgt in der Regel auf der Rohdeckenkonstruktion durch eine Schüttung (Splitt), auf der wiederum Trittschalldämmung und Estrich aufgebracht werden.

Bei Kasten- und Rippendecken oder Balkendecken mit Unterdeckenbeplankung können zusätzlich die Hohlräume zur schalltechnischen Ertüchtigung genutzt werden, indem sie beispielsweise mit Schüttung befüllt werden (Rippenelemente), mineralische Platten als Schwingungstilger (Hohlkastendecken) oder eine Dämmung (Balkendecken) eingebracht werden.

Gebäudetrennwände

Die Konstruktionsweise von Gebäudetrennwänden ist primär durch Anforderungen an die Statik und den Brandschutz bestimmt. Es werden zweischalige Aufbauten eingesetzt, bei denen die Konstruktion weitestgehend getrennt ausgeführt wird. Durch diese Trennung ist auch eine schalltechnische Entkopplung gewährleistet, die eine Schallübertragung über Nebenwege (konstruktive Schallbrücken) minimiert.

Die Schallschutzanforderungen nach DIN 4109 werden durch diese Konstruktionen grundsätzlich erfüllt. Einzige Einschränkungen bestehen gege-

benenfalls im Niederfrequenzbereich. Optimierungen können dazu durch Anpassungen in der Bauteilgeometrie und eine Vergrößerung der mittleren Trennfuge erzielt werden.

Neben der Umsetzung allgemein bestehender Prinzipien, ergeben sich in der Anwendung des Bausystems projektspezifische Herausforderungen, die gesonderte Lösungswege erfordern. Anhand der Planungen des Modellvorhabens ‚Collegium Academicum‘ und des Projekts ‚Wohngruppe Gemeinsam Suffizient Leben, Frankfurt am Main‘ werden im Folgenden verschiedene konstruktive Maßnahmen erläutert, die im Rahmen des Bausystems möglich sind.

Als Herausforderungen, die sich einerseits in jedem Wohnungsbau stellen und sich andererseits aus der Konstruktionsweise des Bausystems ergeben, werden die folgenden Aspekte betrachtet:

- Körperschallübertragung durch massive, form- und kraftschlüssig gefügte Tragelemente.
- Schallschutz zwischen angrenzenden Wohneinheiten.
- Vertikale Trittschallübertragung.
- Schallschutz innerhalb von Wohneinheiten.

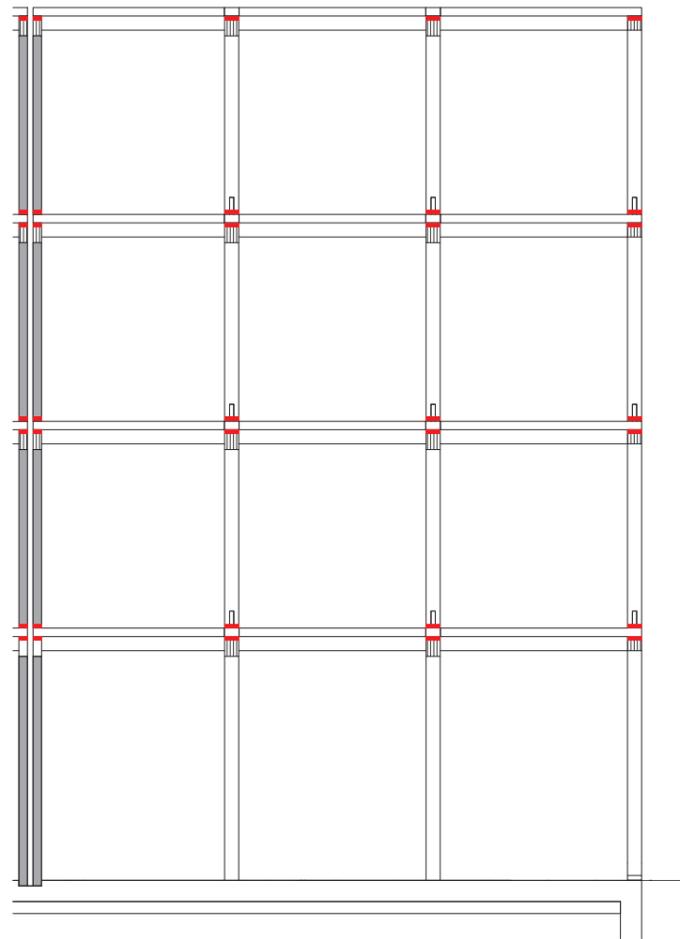
Konstruktive Umsetzung des Schallschutzes im Modellvorhaben 'Collegium Academicum'

Körperschallübertragung durch die Tragstruktur

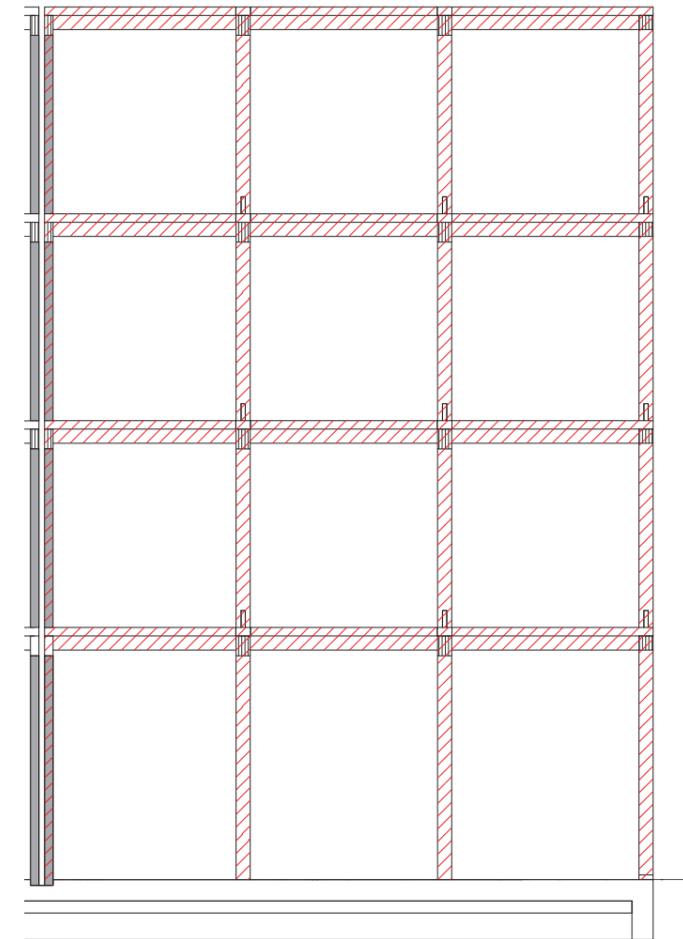
Erhöhte Steifigkeit der Tragkonstruktion

Die form- und kraftschlüssigen Verbindungen der tragenden Elemente stellen unweigerlich Schallbrücken dar, da sie die raumabschließenden Bauteile zwischen Wohneinheiten durchstoßen und als homogen wirkende Bauteile eine direkte Schallübertragung zulassen. Eine Entkopplung der Tragelemente – beispielsweise durch elastische Lagerungen – widerspricht hingegen der Kraftschlüssigkeit der Verbindung und würde die Tragfähigkeit

Graphik 62:
Schematische Darstellung der
Entkopplung der Tragelemente
(links) und der erhöhten
Steifigkeit der Tragstruktur
durch kraftschlüssige
Verbindungen (rechts).



des Gesamtsystems entscheidend schwächen. Die daher unvermeidbare Schallübertragung lässt sich jedoch gleichzeitig durch die form- und kraftschlüssigen Fügungen selbst eingrenzen, indem diese als möglichst steife Verbindungen ausgeführt werden. Somit kann die Eigenschwingung der Tragelemente reduziert werden, da anstelle des einzelnen Bauteils eine größere Masse angeregt werden muss.

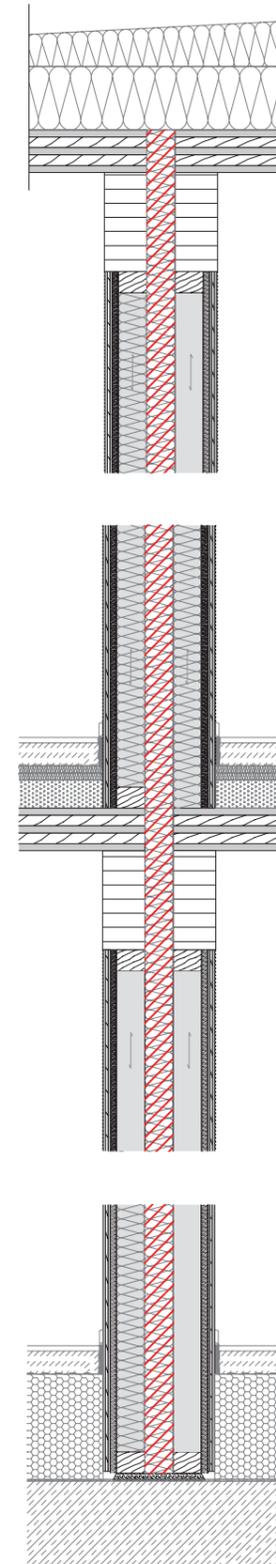
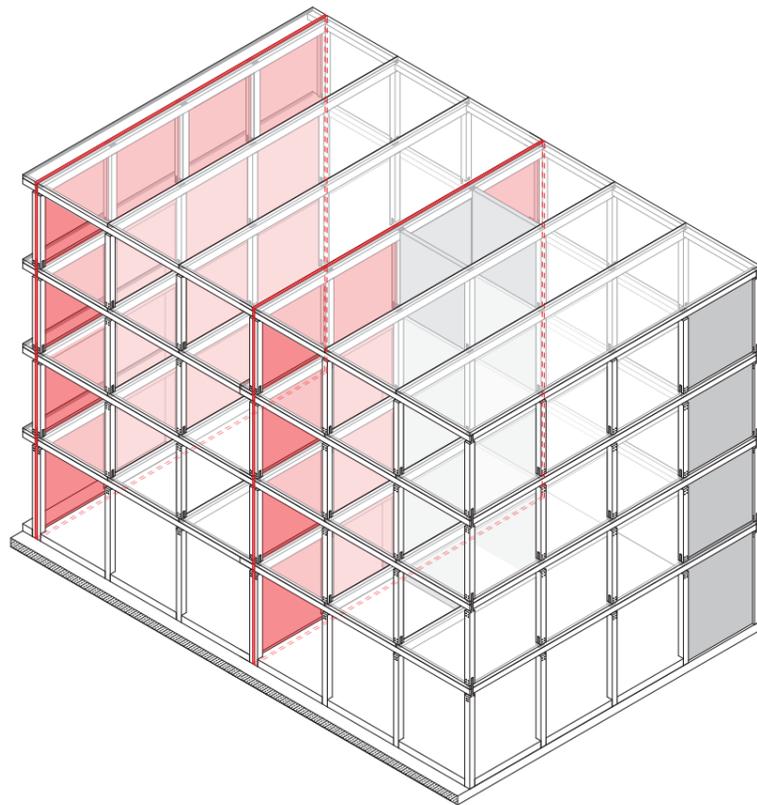


Schallschutz zwischen angrenzenden Wohneinheiten

Durchgängige Entkopplung der Konstruktion

Die vertikale Trennung der Konstruktion im Bereich zwischen zwei Wohneinheiten wird im Modellvorhaben ‚Collegium Academicum‘ konsequent durchgeführt und betrifft sowohl alle tragenden Bauteile als auch nichttragende Trenwandelemente. Stützen und Unterzüge mit verringerten Querschnitten werden doppelt und mit einem Abstand von 8 cm ausgeführt, die Deckenscheiben werden nicht miteinander verbunden. Der entstehende Zwischenraum wird durchgängig ausgedämmt. Somit bilden die Abschnitte einzelner Nutzungseinheiten statisch voneinander unabhängige Strukturen, wodurch auch die direkte Schallübertragung über konstruktive Schallbrücken ausgeschlossen wird.

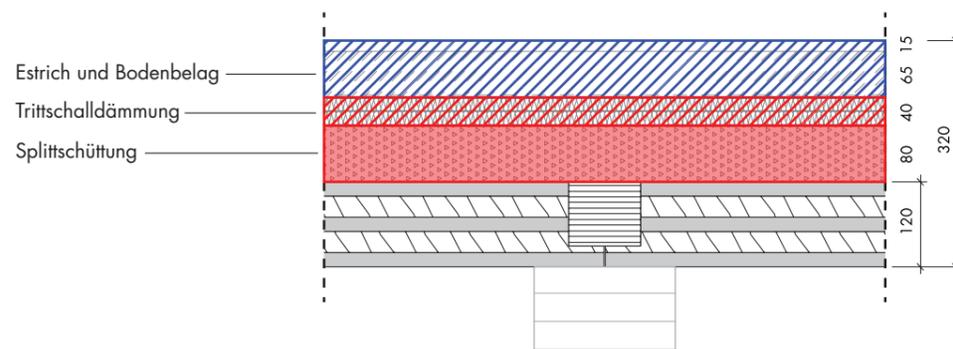
Graphik 63:
Axonometrie Trennwand.



Graphik 64:
Schalltechnische Trennung der
Konstruktion im Bereich der
Wohnungstrennwände.

Trittschallübertragung

Die Deckenaufbauten des Modellvorhabens ‚Collegium Academicum‘ entsprechen grundsätzlich der gängigen Praxis im Holzbau. Die verwendeten BSP-Deckenelemente müssen zur Erhöhung des Eigengewichts mit einer zusätzlichen Splittschüttung beschwert werden, um die Schwingungsanregung zu reduzieren. Auf einer zweilagigen Trittschalldämmung wird ein schwimmender Estrich aufgebracht. Da durch die kraftschlüssigen Holzkonstruktionen mit einem erheblichen Einfluss durch Flankenschallübertragung zu rechnen ist, gilt dabei besonderer Fokus der fachgerechten Trennung des Estrichs und Belags von den angrenzenden Wandbauteilen und den in diesen integrierten Stützen. Da im Modellvorhaben lediglich die Mindestanforderungen nach DIN 4109 angesetzt werden, können Schallbrücken an dieser Stelle zu maßgeblicher Verschlechterung des Schallschutzes der Decken führen.



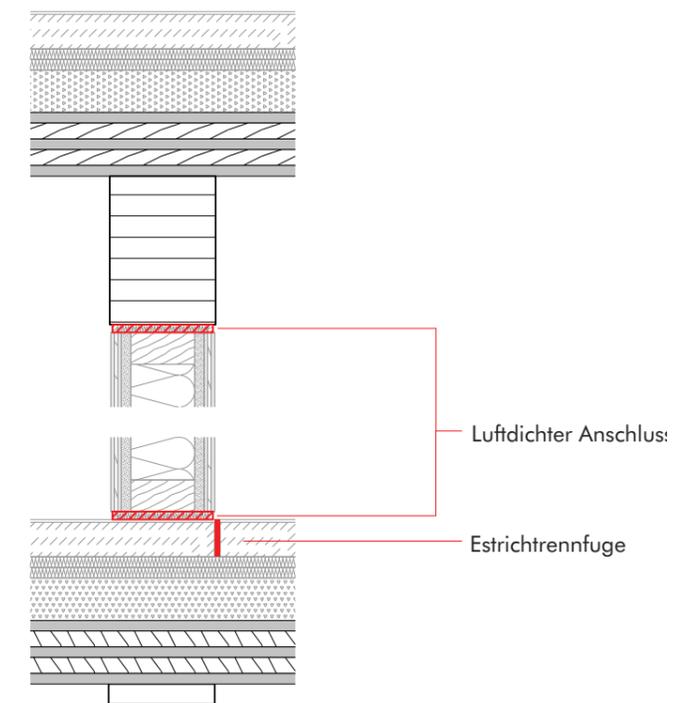
Graphik 65:
Schallschutztechnisch
wirksame Schichten der
Geschosstrenndecken.

Schallschutz innerhalb von Wohneinheiten

Im Modellvorhaben ist eine möglichst freie Grundrissgestaltung innerhalb der Wohneinheiten vorgesehen. Daher ist es das Ziel, Innenwandkonstruktionen zu entwickeln, die weitestgehend flexibel in der Skelettstruktur des Bausystems platzierbar sind. Diese Flexibilität erfordert sowohl leicht auf- und rückbaubare Wandaufbauten als auch ebenso leicht herstellbare und wieder lösbare Anschlussverbindungen an das Tragwerk.

Als allgemeines Prinzip zur Herstellung der Innenwandanschlüsse wird eine das Bauteil umlaufende, nicht-brennbar ausgedämmte Fuge vorgesehen. Punktuell wird die Wandkonstruktion zur Lagesicherung an den angrenzenden Stützen und Unterzügen fixiert. Durch die Fuge sollen auch mögliche Einbautoleranzen aufgenommen werden. Sie wird mit einem eingepassten Abdeckprofil verschlossen und abgedichtet. Dadurch wird auch die Luftschallübertragung durch die Fugen eingedämmt.

Die Wohnungsinnenwände werden lediglich auf den Rohestrich aufgestellt und nicht fixiert, um zum einen den zerstörungsfreien Ausbau zu sichern und Schallbrücken zu vermeiden. Um die horizontale Trittschallübertragung durch den Estrich zu verringern, wird eine Trennfuge ausgeführt. Diese liegt vor der Innenwand, wodurch eine Flankenschallübertragung durch das Wandbauteil vermieden wird.



Graphik 66:
Anschluss der
Wohnungsinnenwände an
Unterzüge und auf dem
Fußbodenaufbau.

Innerhalb der Wohneinheiten werden baurechtlich keine Anforderungen an den Schallschutz gestellt. Um dennoch ein vertretbares Maß der Trennung zwischen gemeinschaftlichen und individuell genutzten Räumen in den Wohneinheiten zu gewährleisten, werden zwei Trenwandtypen eingesetzt. Zum einen sollen weniger flexible, für einen längerfristigen Einbau konzipierte Trennwände eingesetzt werden, die ähnlich den Wohnungstrennwänden aus getrennten Wandschalen konstruiert sind. Daneben wurden flexiblere Wandaufbauten konzipiert, die grundsätzlich einen geringeren Schallschutz aufweisen. Die maßgeblichen seitlichen und oberen Anschlüsse werden entsprechend des Regelfalls ausgeführt; am Bodenanschluss wurde allerdings eine Sonderlösung mit einer in den Bodenaufbau eingelassenen Schwelle entwickelt.

Auf einem druckfesten Dämmstreifen und einer doppelten Trockenestrichlage wird die Schwelle der Innenwand bodengleich – auch hinsichtlich der Barrierefreiheit – eingesetzt. Im Randbereich lassen sich auch Installationen (insbesondere Fußbodenheizschlaufen) durch eine Aussparung unter der Schwelle hindurchführen. Falls in der Einbauposition keine Innenwand vorgesehen ist, wird anstelle dessen ein Füllholz in die Aussparung im Bodenaufbau eingelegt.

Graphik 67:
Bodenanschluss für flexible
Wohnungsinnenwände
(Schiebewand).

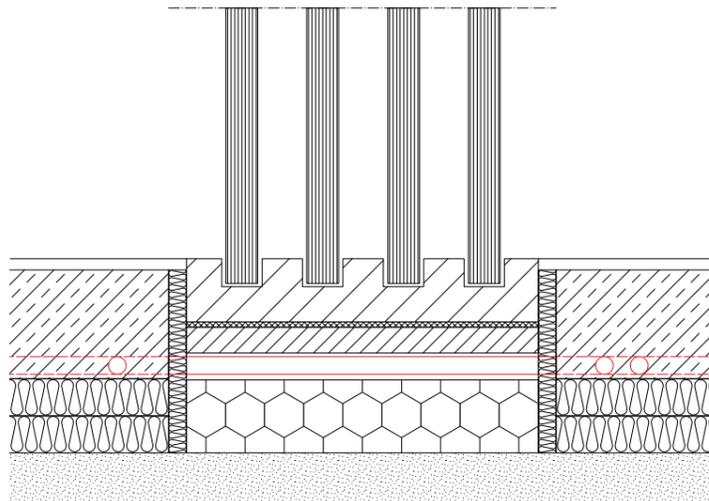


Abbildung 22:
Schiebewände als Trennwand
in der Wohnung beim
Modellvorhaben des
Studierendenwohnheims
Collegium Academicum.
Foto: Thilo Ross.

Teststand zur Prüfung des Schallschutzes

Auf Grundlage der Planungen des Modellvorhabens ‚Collegium Academicum‘ wurde ein Teststand errichtet, in dem verschiedene messtechnische Untersuchungen durchgeführt wurden, deren Fokus auf der Überprüfung verschiedener Innenwandaufbauten sowie der Trittschallübertragung lag.

Es wurden für unterschiedliche Einbausituationen verschiedener Wohnungsinnenwände Luftschallmessungen zwischen zwei angrenzenden Räumen durchgeführt. Zusätzlich wurde die vertikale Schallübertragung zwischen übereinanderliegenden Wohneinheiten durch Trittschallmessungen überprüft. Bei Betrachtung der Ergebnisse müssen ebenso auftretende Flanken- bzw. Körperschallübertragungen durch die Tragstruktur selbst berücksichtigt werden. Als Ergänzung wurden in diesem Zuge auch erschiedene Bodenbeläge getestet.

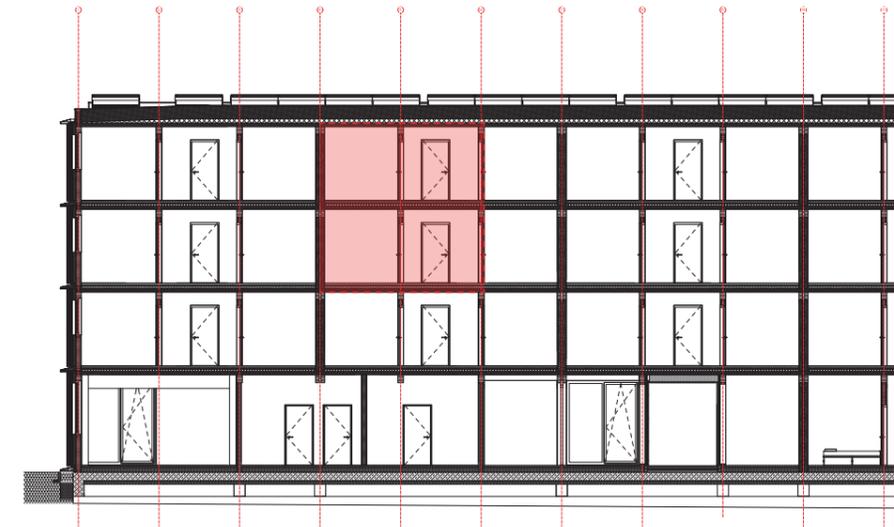
Ziele des Teststands

Grundsätzlich sollen die messtechnischen Untersuchungen den Nachweis erbringen, dass die schalltechnische Leistungsfähigkeit des Bausystems den Anforderungen an den Wohnungsbau genügen kann, wie sie in der DIN 4109 festgelegt sind. Diese kommt vor allem bei den Messungen der vertikalen Schallübertragung zwischen zwei Wohneinheiten durch Trittschall und Körperschall der Tragkonstruktion zum Tragen.

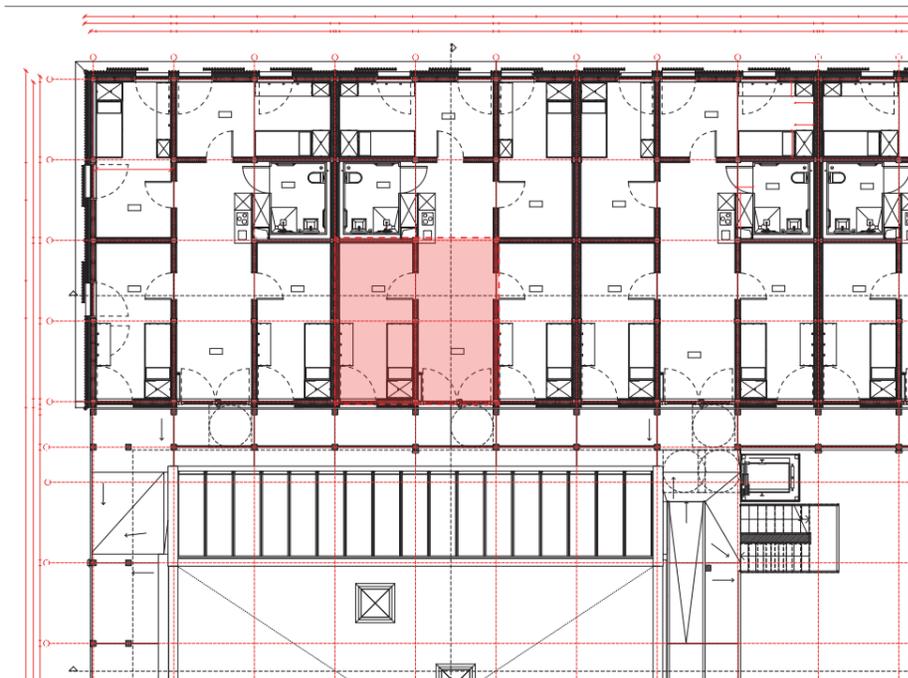
Der Schwerpunkt der Messungen liegt allerdings auf Zimmertrennwänden innerhalb einer Wohneinheit, an die nach DIN keine besonderen Anforderungen gestellt werden. Es wurden demnach die Schalldämmmaße der einzelnen Trennwandaufbauten im Einbauzustand ermittelt, die für die Eignung der Wände für die Anwendung im Modellprojekt einen Bewertungsfaktor bilden. Diese Ergebnisse wurden zusätzlich durch subjektive Wahrnehmungstests ergänzt, um die Werte in einem realen Kontext nachvollziehbar zu machen und gegebenenfalls eine von Normempfehlungen unabhängige Bewertung zu ermöglichen.

Versuchsaufbau

Die Planung des Modellvorhabens ‚Collegium Academicum‘ wendet das Bausystem in einem ungerichteten Konstruktionsraster mit einem Rastermaß von 2,85m und mit einer Gebäudehöhe von vier Geschossen an. Der Teststand entspricht einem Ausschnitt des Gebäudes, der vier Rasterfelder auf den zwei oberen Wohngeschossen umfasst.



Graphik 68:
Ausschnitt aus der Planung
des Studierendenwohnheims
Collegium Academicum.



Der Raumabschluss des Teststands wurde dahingehend angepasst ausgeführt, dass zu zwei Seiten die geplanten Außenwände mit je einer Türöffnung ausgeführt (AW001/101; AW002/102) und von der zweischaligen Wohnungstrennwand mit Doppelstützen nur eine Schale errichtet wurde (AW003/103). Die verbleidenden Wandflächen wurden mit aussteifenden massiven Brettsperrholzwänden (AW004/104), wie sie um Installationskerne im Gebäude zum Einsatz kommen sollen, und mit einschaligen, einseitig beplankten Trennwänden (AW005/105) verschlossen.

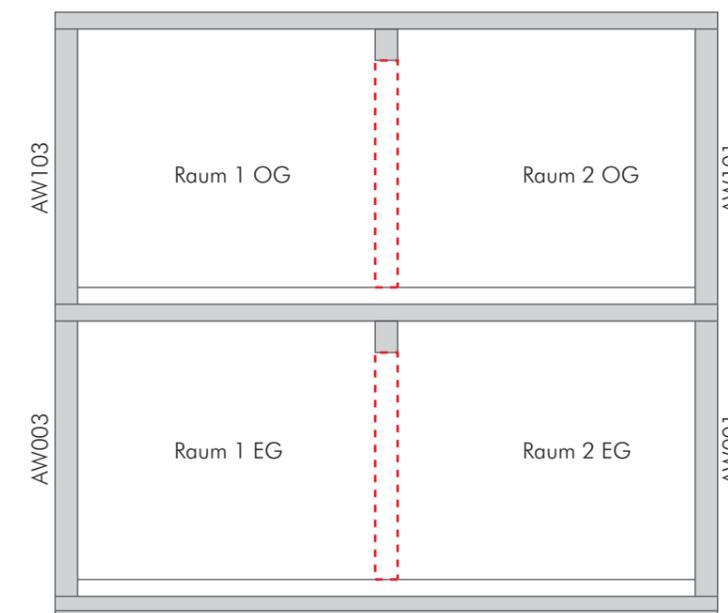
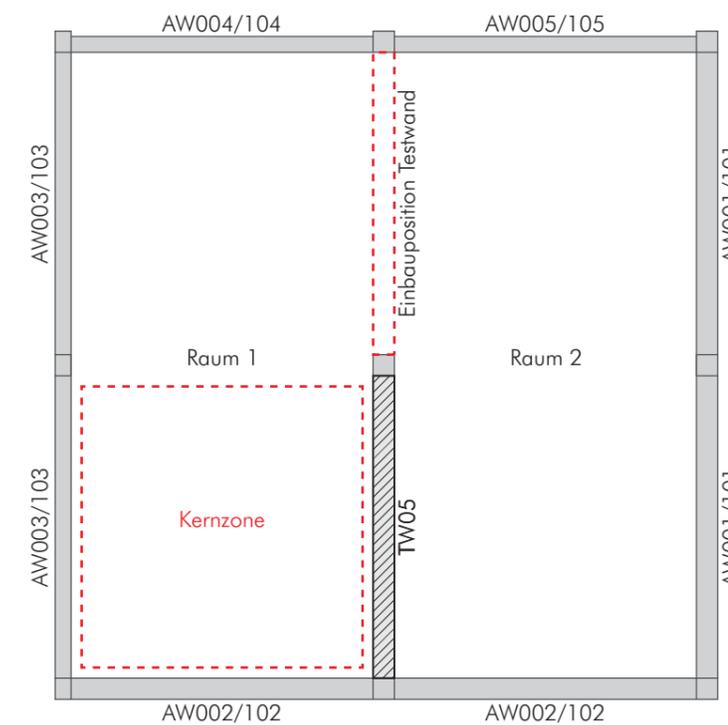
Die Bodenaufbauten wurden im Obergeschoss und auch im Erdgeschoss gemäß der Planung für Geschosstrenndecken ausgeführt. Der obere Abschluss des Teststands wurde mit einer Brettsperrholzdecke ohne zusätzlichen Dachaufbau hergestellt.

Die für die akustischen Messungen relevanten Trennwandaufbauten werden in der parallel zur Außenwand AW001/101 und Wohnungstrennwand AW003/103 verlaufenden Wandebene eingebaut. Für die wechselnden Testwände ist die in der Abbildung markierte Einbauposition vorgesehen, während an der zweiten Position eine zweischalige Trennwand für die gesamte Testreihe eingebaut bleibt. Die beiden auf diese Weise abgetrennten Rasterfelder entsprechen einem Privatraum, der aus einer Kernzone und einem flexibel abtrennbaren Bereich besteht.

Abbildung 23:
Im Teststand realisierter
Beispielausschnitt aus der
Planung,
Foto: DGJ Architektur.



Graphik 69:
Schematischer Aufbau des
Teststands.
Einbauposition der Testwände.



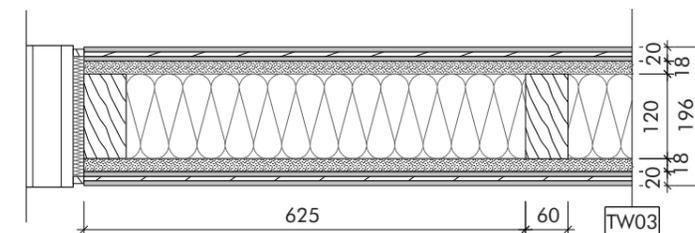
Innenwandaufbauten

Für unterschiedliche aus der Wohnnutzung resultierenden funktionalen Anforderungen wurden verschiedene Wandtypen entwickelt. Dies spiegelt sich beispielsweise in einem unterschiedlichen Grad der Flexibilität oder in größerer beziehungsweise geringerer Komplexität des Bauteilaufbaus wider. Ziel ist es, je nach Nutzerwünschen eine geeignete Konfiguration der Trennwände anzubieten. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Abwägung oder Priorisierung unterschiedlicher Faktoren wie Schalldämmung oder Flexibilität erfolgt.

Im Folgenden werden die in der Systementwicklung betrachteten Innenwandaufbauten vorgestellt. Für diese wurden auch Berechnungen zum Schalldämmmaß durchgeführt, die später in akustischen Testmessungen als Vergleichswert herangezogen werden.

Zweischalige Ständerwand mit einfachem Ständerwerk

Bei diesem Wandtyp handelt es sich um eine konventionelle einfache Holzständerwand, die beidseitig mit GKF- und Dreischichtplatten beplankt wird. Für einen verbesserten Schallschutz können alternativ zu GKF auch schwerere Plattenwerkstoffe wie Gipsfaserplatten oder spezielle sandgefüllte Schallschutzplatten verwendet werden. Um die Flankenschallübertragung in angrenzende tragende Bauteile zu verringern werden die Beplankungslagen durch ein umlaufendes dauerelastisches Dichtband schalltechnisch entkoppelt (Abbildung 26).



Graphik 70:
Bauteilaufbau der
zweischaligen Ständerwand
mit einfachem Ständerwerk.



Abbildung 24:
Umlaufender elastischer
Dichtungstreifen
zur Entkopplung der
Beplankungslagen bei
Tafelbauwänden.
Foto: Carina Bauer.

Als bewertetes Schalldämmmaß wurde für diesen Wandaufbau ein Wert von $R'_{w}=39$ dB ermittelt.

Für einen flexiblen Einsatz innerhalb einer Wohneinheit ist dieser Wandtyp nur bedingt geeignet, da ein Umbau nur in Verbindung mit einem Teilrückbau der Beplankung möglich ist. Dennoch ließe sie sich in einer ersten Ausbauphase beliebig einsetzen und bietet sich bei der Priorisierung eines höheren Schallschutzes an.

Zweischalige Ständerwand mit getrenntem Ständerwerk

Durch die Trennung des Ständerwerks und eine durchgängigen Hohlraumdämmung aus Mineralwolle werden die Wandschalen voneinander entkoppelt um einen verbesserten Schallschutz zu erzielen.

Graphik 71:
Bauteilaufbau der
zweischaligen Ständerwand
mit doppeltem Ständerwerk.

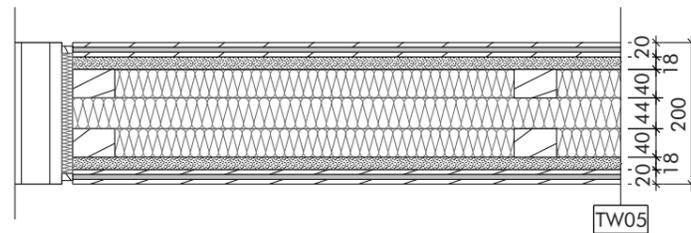


Abbildung 25:
Montage des Ständerwerks im
Teststand.
Foto: Carina Bauer.



Als bewertetes Schalldämmmaß wurde für diesen Wandaufbau ein Wert von $R'w=42$ dB ermittelt.

Die entkoppelte Ständerwand ist nicht als flexible Wand vorgesehen und ist primär als dauerhafte Trennwand zwischen Privat- und Gemeinschaftsräumen geplant, da sie die besten Schallschutzeigenschaften aufweist. Der Aufbau erlaubt zudem nicht, die Wand in einem Stück zu versetzen.

Regalwand

Als flexibel einsetzbare Trennwand wurde ein Wandsystem entwickelt, das einseitig auch als Regal genutzt werden kann. Die Konstruktion beruht auf einem Stecksystem aus Holz-Plattenwerkstoffen – die Planung sieht zunächst Dreischichtplatten vor. Die Wandkonstruktion lässt sich in einem Stück bewegen und bietet somit ein hohes Maß an Flexibilität im Umbau. Durch den einschaligen, sehr leichten Aufbau kann jedoch nur mit einem sehr geringen Schallschutz gerechnet werden.

Graphik 72:
Bauteilaufbau der offenen
Regalwand.

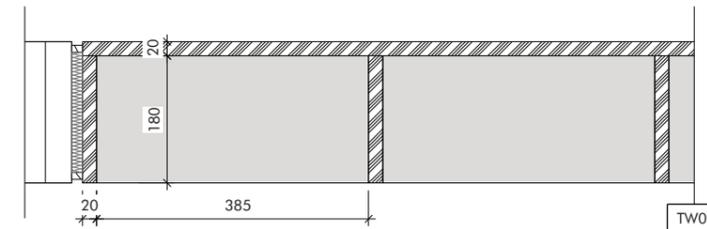


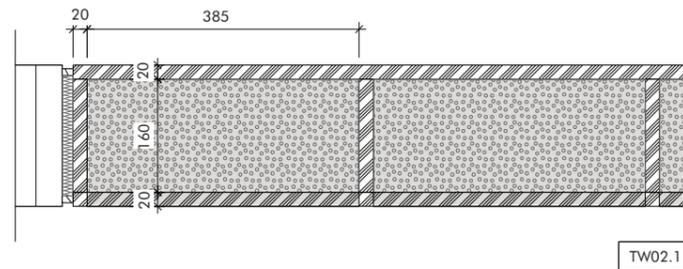
Abbildung 26:
Fertig eingebaute Regalwand
im Teststand.
Foto: Carina Bauer.



Als bewertetes Schalldämmmaß wurde für diesen Wandaufbau ein Wert von $R'w=25$ dB ermittelt.

In einer Ertüchtigungsvariante kann die Regalwand mit Sandsäcken befüllt und die zweite Seite der Wand mit Dreischichtplatten verschlossen werden. Dadurch wird die Eigenschwingung der Wand durch das erhöhte Gewicht minimiert und der Schallschutz verbessert. Durch das Gewicht wird die Wandkonstruktion jedoch in der Flexibilität erheblich eingeschränkt und verliert die zusätzliche Funktion als Aufbewahrungsfläche.

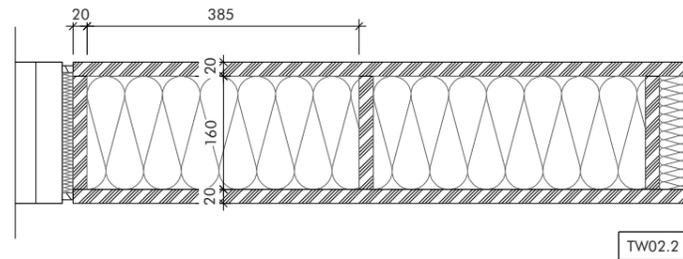
Graphik 73:
Bauteilaufbau der sandbefüllten Regalwand.



Als bewertetes Schalldämmmaß wurde für diesen Wandaufbau ein Wert von $R'w=40$ dB ermittelt.

Eine weitere Ertüchtigungsvariante sieht die Füllung der Hohlräume mit Mineralwolle zur Verbesserung des Schallschutzes vor. Das geringere Gewicht des Dämmstoffes erlaubt weiterhin einen flexibleren Einsatz der Wand, die Zusatzfunktion als Regal geht aber auch hier verloren.

Graphik 74:
Bauteilaufbau der ausgedämmten Regalwand.

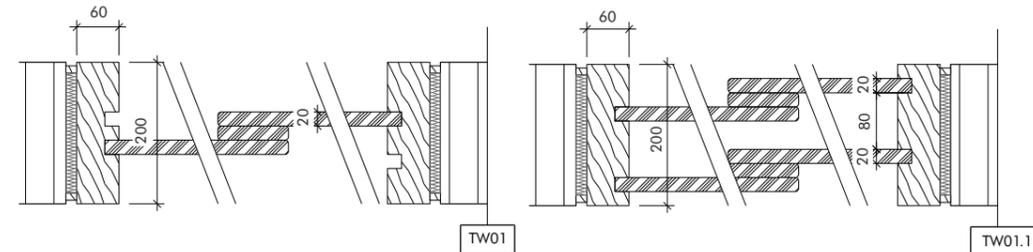


Als bewertetes Schalldämmmaß wurde für diesen Wandaufbau ein Wert von $R'w=37$ dB ermittelt.

Schiebewand

In Anlehnung an die in der traditionellen japanischen Architektur üblichen Schiebewände wurde eine raumtrennende Schiebewandkonstruktion entworfen. Diese sieht einen umlaufenden Rahmen mit eingefrästen Fugen vor, in denen die Schiebeelemente aus Dreischichtplatte geführt werden. Zum Umbau lassen sich die Platten einzeln aus dem Rahmen entnehmen – dieser kann wiederum als Ganzes in eine andere Einbauposition versetzt werden. Die Schiebewand kann entweder mit zwei oder mit vier Schiebeelementen ausgeführt werden.

Um die Luftdurchlässigkeit der Fugen und somit die Schallausbreitung zu verringern, wurden die Fugen seitlich mit Filzstreifen ausgekleidet. In die vertikalen Fugen an den Ständern der Schiebewandrahmen wurden zusätzliche Dichtprofile eingelassen.



Graphik 75:
Bauteilaufbauten der einfachen und doppelten Schiebewand.



Abbildung 27:
Links und rechts:
Auskleidung der Fugen mit Filz und Dichtungsprofilen.
Foto: Carina Bauer.



Abbildung 28:
Eingebaute Schiebewand im Teststand.
Foto: Carina Bauer.

Als bewertetes Schalldämmmaß wurde für die einfache Schiebewand ein Wert von $R'w=25$ dB und für die doppelte Schiebewand von $R'w=28$ dB ermittelt.

Tabelle 7:
Übersicht über die für das Collegium Academicum untersuchten Varianten der Innenwandkonstruktionen.

Übersicht der untersuchten Innenwandkonstruktionen

		Berechnungswerte Schalldämmmaß	Einbauvarianten/ Ertüchtigungen
Zweischalige Ständerwand mit getrenntem Ständerwerk	TW05	R _w = 60 dB R'w = 42 dB	a) Ohne Tür b) Mit Tür c) Mit Tür und Überströmelement
Schiebewand	TW01 (einfach)	R _w = 25 dB R'w = 25 dB	
	TW01.1 (doppelt)	R _w = 28 dB R'w = 28 dB	
Offene Regalwand	TW02	R _w = 25 dB R'w = 25 dB	Mit Tür
Regalwand mit Sandfüllung	TW02.1	R _w = 48 dB R'w = 40 dB	Mit Tür
Regalwand mit Mineralwolle	TW02.2	R _w = 39 dB R'w = 37 dB	a) Mit Tür b) Mit Tür und Überströmelement
Zweischalige Ständerwand mit einfachem Ständerwerk	TW03	R _w = 44 dB R'w = 39 dB	a) Mit Tür b) Mit Tür und Überströmelement c) mit Schalldämm-Beplankung

Messtechnische Untersuchungen des Schallschutzes

Bei den messtechnischen Untersuchungen ist zu beachten, dass sich diese immer auf die gesamte Trennwandfläche beziehen und die Einbausituation im Gesamtsystem abbilden. Die kraftschlüssig verbundene und demnach nicht entkoppelte Tragstruktur bildet durch Stützen, Unterzüge und Decken Teil des Raumabschlusses, wodurch Flanken- und Körperschallübertragungen nicht unerheblich mit in die Messwerte einfließen.

Luft- und Trittschallübertragung durch Geschosstrenndecken

Da die Geschosstrenndecken als Wohnungstrenndecken geplant werden, sind die Anforderungen nach DIN 4109 für die Bewertung maßgeblich. Durch die messtechnischen Untersuchungen soll ermittelt werden, ob Deckenaufbauten im Einbau die Grenzwerte für die Luft- und Trittschallübertragung erfüllen. Die Mindestanforderungen an Wohnungstrenndecken liegen für den Luftschall bei einem Schalldämmmaß von 54dB, für den Trittschallpegel bei 50dB (DIN 4109: 2016).

Luftschallmessungen

Luftschallmessung Trenndecke

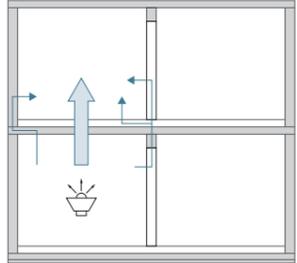
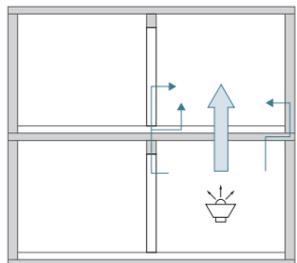
Messung	Messwert R' _w	Bewertung
Raum 1 EG - Raum 1 OG 	52dB	Die Anforderung nach DIN 4109 wird nicht erfüllt. Es wurde eine verstärkte Flankenschallübertragung festgestellt, die auf die kraftschlüssige Kopplung der Geschosse und die massive Außenwand AW104 zurückgeführt werden kann.
Raum 2 EG - Raum 2 OG 	54dB	Im Gegensatz zum Nachbarraum wird die Mindestanforderung erfüllt. Im Frequenzbereich zwischen 200 und 250Hz wurde ein resonanzbedingter Einbruch in der Dämmkurve festgestellt.

Tabelle 8:
Ergebnisse der Luftschallmessungen der Trenndecke im Pilotprojekt Collegium Academicum.

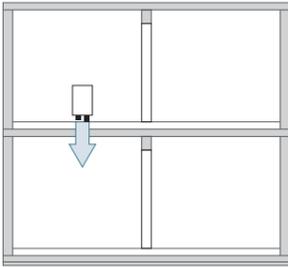
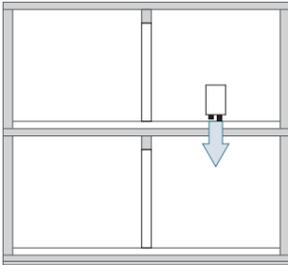
Beurteilung

Die trotz gleichem Deckenaufbau abweichenden Messwerte deuten darauf hin, dass auch andere Übertragungswege maßgeblich in die Ergebnisse einfließen. Da zwischen den Geschossen keine Entkopplung der Tragstruktur besteht, ist dies wahrscheinlich auf die Körperschallübertragung durch tragende Bauteile zurückzuführen. Eine Entkopplung steht allerdings im Konflikt mit dem Ziel eines Systems kraftschlüssiger Holzverbindungen.

Tabelle 9: Ergebnisse der Trittschallmessungen (vertikal) auf Rohestrich; Pilotprojekt Collegium Academicum.

Trittschallmessungen

Trittschallmessungen (vertikal) auf Rohestrich

Messung	Messwert $L'_{n,w}$	Bewertung
Raum 1 OG - Raum 1 EG 	50dB	Die Mindestanforderungen nach DIN 4109 wird erfüllt.
Raum 2 OG - Raum 2 EG 	50dB	Die Mindestanforderungen nach DIN 4109 wird erfüllt.

Im Anschluss an die Messungen des Rohestrichs wurden die Trittschallmessungen auf Musterfeldern verschiedener Bodenbeläge wiederholt. Drei Produkte des Herstellers Nora wurden auf je drei Positionen angebracht:

Trittschallmessungen (vertikal) auf Bodenbelagsmustern

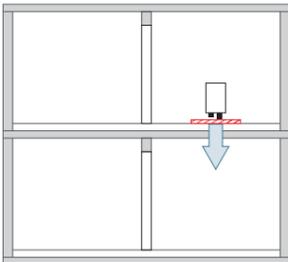
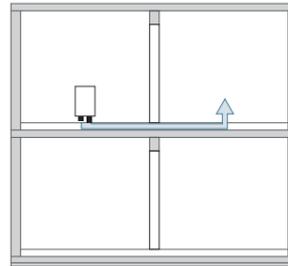
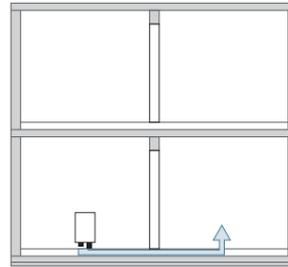
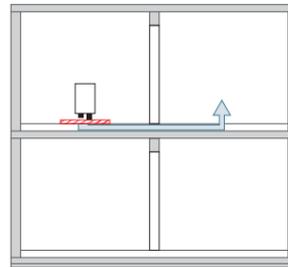
Messung	Messwert $L'_{n,w}$	Bewertung
(in beiden Räumen) 	Pos.1) 48 dB Pos.2) 48 dB Pos.3) 48 dB Pos.4) 47dB Pos.5) 47dB Pos.6) 47dB Pos.7) 48dB Pos.8) 49dB Pos.9) 45dB	Die Verbesserung des Trittschallpegels bewegt sich in einem Bereich von 1-3dB, mit einer Ausnahme von 5dB und bestätigt erfahrungsgemäß übliche Verbesserungen beim Einsatz weicher Bodenbeläge auf einem schwimmenden Estrich.

Tabelle 10: Ergebnisse der Trittschallmessungen (vertikal) auf Bodenbelagsmuster; Pilotprojekt Collegium Academicum.

Tabelle 11: Ergebnisse der Trittschallmessungen (horizontal); Pilotprojekt Collegium Academicum.

Trittschallmessungen (horizontal)

Messung	Messwert $L'_{n,w}$	Bewertung
Raum 1 OG - Raum 2 OG 	84dB	Das Ergebnis deutet auf eine starre Verbindung des Estrichs zwischen beiden Räumen hin, die durch einen Ausführungsmangel an der Estrichtrennfuge zustande kommt. An den Trittschall innerhalb einer Wohneinheit werden zwar keine Anforderungen gestellt, der Wert von 53dB aber empfohlen.
Raum 1 EG - Raum 2 EG 	87dB	Im Erdgeschoss wurden die gleichen Mängel festgestellt..
(auf Bodenbelagsmuster) 	66dB	Die Verbesserung kommt vor allem bei hohen Frequenzen zum Tragen. Im Bereich bis 500Hz bleiben die Werte fast unverändert.

Beurteilung

Nach den Tests wurde die vermutete starre Verbindung des Estrichs zwischen den Räumen überprüft und eindeutige Körperschallbrücken festgestellt. Die Ergebnisse sind für den Schallschutz daher nicht aussagekräftig. Da in der DIN 4109 keine Anforderungen an den Trittschallschutz innerhalb einer Wohneinheit gestellt werden, wäre auch eine nicht getrennte Ausführung des Estrichs möglich. Der für den Trittschall zwischen verschiedenen Wohneinheiten geforderte Wert von 50dB wird aber empfohlen.

Außerdem lässt sich nicht ausschließen, dass der Übertragungsweg über den Estrich auch entscheidende Auswirkungen auf die Messergebnisse der getesteten Trennwände hat. Einige Messungen wurden daher nach der Nachrüstung einer sachgerechten Estrichtrennung wiederholt.

Abbildung 29: Montagefehler beim Bau des Teststandes: Schallbrücken durch nicht durchgängige Trennung der Estrichlagen zwischen den Räumen. Foto: Carina Bauer.



Die Wiederholungsmessungen ergaben deutliche Verbesserungen der Werte zur Trittschallübertragung. Eine nennenswerte Auswirkung auf die vertikale Trittschallübertragung konnte nicht nachgewiesen werden. Der Wert verbesserte sich um 1 dB und liegt somit knapp unterhalb der Anforderungen.

Tabelle 12: Trittschallmessung: Ergebnisse der Wiederholungsmessungen im Vergleich zur Erstmessung.

Messung	L _{n,w} Erstmessung	L _{n,w} Wiederholung
Trittschallmessung horizontal auf Rohestrich (OG)	84dB	59dB
Trittschallmessung horizontal auf Rohestrich (EG)	87dB	64dB
Trittschallmessung Decke vertikal auf Rohestrich (Raum 1)	50dB	49dB

Luftschallübertragung bei verschiedenen Trennwandaufbauten

Die Prüffläche setzt sich immer aus den verschiedenen Aufbauten der zweischaligen Trennwand TW05 und der jeweiligen Testwand zusammen. Diese Einbausituation entspricht letztendlich auch der geplanten Umsetzung im Modellprojekt. Unter diesen Voraussetzungen soll der Einfluss des Trennwandaufbaus auf die schalltechnische Leistungsfähigkeit des gesamten Raumabschlusses ermittelt werden.

An Zimmertrennwände innerhalb einer Wohneinheit werden keine besonderen Schallschutzanforderungen gestellt. Die Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA) gibt in ihrer Empfehlung zum Schallschutz im Wohnungsbau Werte für die Einordnung in Schallschutzklassen EW1 und EW2 an:

	EW1	EW2
Wände ohne Türen zwischen lauten und leisen Räumen oder Räumen unterschiedlicher Nutzung, z.B. zwischen Wohn- und Kinderzimmer [R' _w]	> 42dB	> 47dB
Zimmertüren von schützenswerten Räumen, z.B. Schlaf- oder Kinderzimmer [R _w]	> 22dB	> 27dB

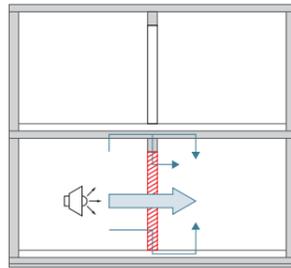
Tabelle 13: Luftschallübertragung bei verschiedenen Trennwandaufbauten, Messergebnisse.

Die Messreihen dienen daher vor allem der Orientierung, welche Wände sich diesbezüglich eignen. Da die meisten Aufbauten mit eingebauten Türen getestet und in der Realisierung alle mit Türen ausgeführt werden, kann dabei nicht von einer Erfüllung der empfohlenen Werte ausgegangen werden. Für das Modellprojekt liegt die Bewertung und Entscheidung für oder gegen eine Trennwand zudem in erster Linie im Ermessen der NutzerInnen.

Im Zuge der Wiederholungsmessungen nach der Nachbesserung des Estrichs, wurden auch einige der Innenwände erneut eingebaut und Luftschallmessungen durchgeführt, um einen möglichen Einfluss der Estrichausführung auf die Schalldämmung zu ermitteln.

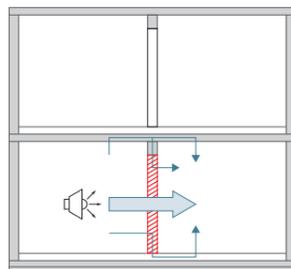
Tabelle 14:
Luftschallübertragung
bei verschiedenen
Trennwandaufbauten,
Messergebnisse.

Messungen im EG



	R'_w Erstmessung	R'_w Wiederholung
Einfache Schiebewand TW01	24dB	-
Doppelte Schiebewand TW01.1	33dB	31dB
Regalwand TW02 mit Tür	28dB	27dB
Regalwand mit Sandfüllung TW02.1 mit Tür	38dB	-
Ertüchtigung mit Überströmelement	37dB	-
Regalwand mit Mineralwollefüllung TW02.2 mit Tür	38dB	38dB

Messungen im OG



	R'_w Erstmessung	R'_w Wiederholung
Zweischalige Ständerwand TW05 ohne Tür, vollflächig beplankt	37dB	38dB
zusätzliche Fugenabdichtung	-	40dB
Zweischalige Ständerwand TW05 mit Tür	37dB	-
Zweischalige Ständerwand TW05 mit Tür und Überströmelement	36dB	-
Zweischalige Ständerwand TW03	36dB (mit Tür)	37dB
mit Schallschutzplatten (Phone-Star)	-	37dB



Abbildung 30:
(links) Durchbruch für
Nachströmung der Lüftung.
Fotos: Carina Bauer.

Abbildung 31:
(mittig) Ertüchtigung der
Lüftungsöffnung mit einem
Überströmelement mit
Schallschutz.
Fotos: Carina Bauer.

Abbildung 32:
(rechts) Überströmelement mit
Schallschutz.
Fotos: Carina Bauer.

Beurteilung

Abgesehen von den Schiebewänden und der offenen Regalwand bewegen sich die Messergebnisse alle im Bereich zwischen 36-38dB und erreichen somit nicht die allgemein empfohlenen Werte. Zwar ist dabei auch der Einfluss der eingebauten Türen zu berücksichtigen, doch selbst bei der Messung der vollflächig verschlossenen Trennwand TW05 wurde kein höherer Wert erreicht.

Bei der offenen Regalwand war keine hohe Qualität des Schallschutzes zu erwarten, da lediglich eine Plattenlage als Dämmschicht wirkt. Dasselbe gilt auch für die Schiebewände, die jedoch in ihrer Doppelfunktion als Zugang zum Zimmer einen Sonderfall bilden. Im Vergleich mit den Empfehlungen für Zimmertüren erreichen die Schiebewände ausreichende oder sogar sehr gute Werte.

Die Wiederholungsmessung weisen trotz der Nachbesserung des Estrichs zum Teil schlechtere Werte auf. Ein Zusammenhang konnte dahingehend demnach nicht hergestellt werden – vielmehr wurde deutlich, dass die Sorgfalt bei der Ausführung der Anschlüsse vor allem bei einem wiederholten Einbau, wie er beim flexiblen Versetzen der Wände im Selbstbau angedacht ist, entscheidende Auswirkungen auf die Schalldämmwirkung haben kann.

Die Ergebnisse lassen im Allgemeinen darauf schließen, dass das erreichbare Schalldämmmaß der Trennwände auf etwa 40dB beschränkt ist. Ab diesem Schwellenwert werden die Übertragungswege im Gesamtsystem durch Flanken- und Körperschall anderer Bauteile maßgeblich. Durch eine weitere Verbesserung der Trennwandaufbauten, beispielsweise schalltechnische Ertüchtigungen mit speziellen Materialien, würde demnach kein verbesserter Schallschutz erzielt werden.

Subjektive Wahrnehmung des Schallschutzes

Im Modellprojekt ‚Collegium Academicum‘ steht den NutzerInnen die Wahl offen, welche Zimmertrennwand sie in ihren Privaträumen einbauen wollen. Dies wird immer eine Abwägung zwischen Qualitäten des Schallschutzes und der Flexibilität erfordern. Dabei ist nicht allein ausschlaggebend, welchen Messwert eine Wand in Berechnungen und Tests erreicht, sondern auch, ob der gegebene Schallschutz nach persönlichem Empfinden ausreichend ist. Die am Teststand beteiligten Studierenden haben daher für mehrere Wandaufbauten subjektive Wahrnehmungstests durchgeführt, um zu ermitteln, welche Wände ihren Wünschen entsprechen und den Anforderungen an das gemeinschaftliche Leben in den Wohnungen genügen können.

Als Orientierung für die Wahrnehmungstests dient die Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA) zum Schallschutz im Wohnungsbau. Daraus abgeleitet wurden die im Umfeld der Wohngemeinschaften zu erwarteten Geräuschquellen in die Kategorien Sprache, Musik und Nutzergeräusche eingeteilt. Ebenso wurden die verbalen Beschreibungen der Geräuschwahrnehmung der DEGA übernommen.

Tabelle 15:
Muster zur verbalen Einordnung akustischer Phänomene.
Quelle: Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA).

Allgemeine Beschreibung	Beschreibung der Sprachwahrnehmung
Sehr deutlich hörbar	Einwandfrei zu verstehen
Deutlich hörbar	Zu verstehen
Im Allgemeinen hörbar	Teilweise zu verstehen
Teilweise hörbar	Im Allgemeinen nicht verstehbar
Noch hörbar	Nicht verstehbar
Nicht hörbar	-

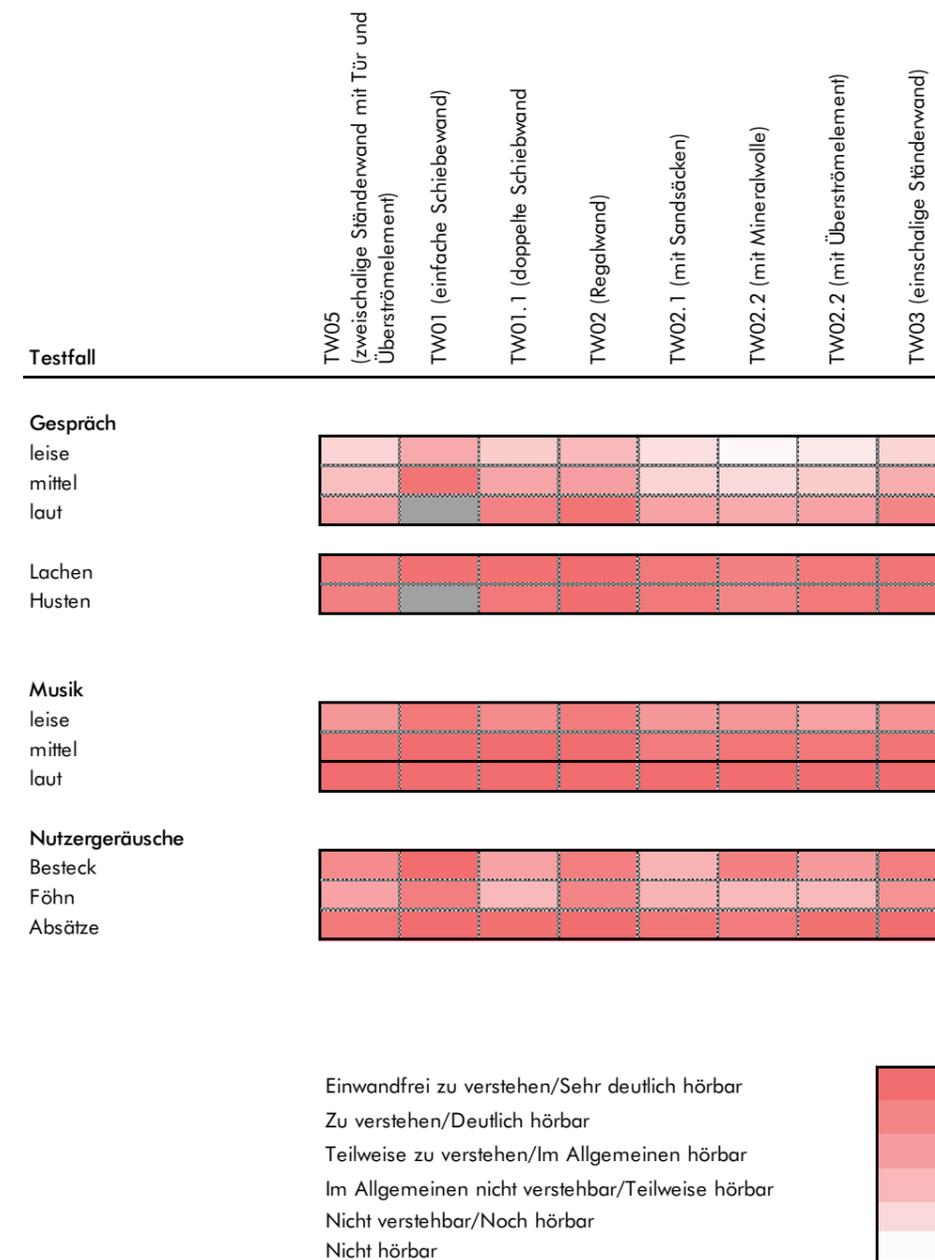
Testfälle

Nach der Aufteilung der TeilnehmerInnen auf zwei benachbarte Räume, wurde der folgende Testablauf bei mehreren Wandaufbauten jeweils im Wechsel durchgeführt:

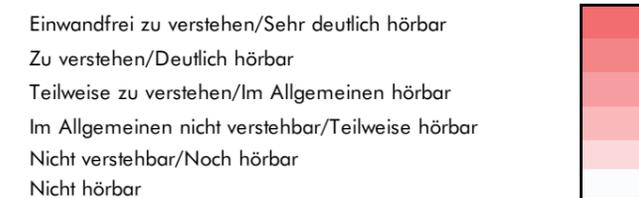
- Gespräch in Pegelabstufungen leise <55dB, mittel <65db und laut <75dB.
- Als Sonderfälle mit Lautstärkespitzen >85dB Lachen und Husten.
- Musikwiedergabe in Pegelabstufungen >70dB, >80db und >90dB.
- (Die hohen Lautstärken wurden als Ausnahme- und Extremfälle betrachtet).
- Nachempfinden von alltäglichen Nutzergeräuschen.
- Klappern mit Besteck und Geschirr.
- Betrieb eines Föhns.
- Gehen auf Absätzen.

Bewertung

Die individuelle Wahrnehmung der Testfälle wurde für jede der verschiedenen getesteten Trennwandaufbauten auf Fragebögen festgehalten. Die zusammengetragenen Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle dargestellt:



Graphik 76: Bewertungstabelle zu den subjektiven Wahrnehmungstests.



Dem Empfinden der TeilnehmerInnen nach zeigt sich, dass die meisten Wände gerade für den Sprachbereich gute schalldämmende Eigenschaften besitzen. Bei höheren Geräuschpegeln sowie tiefen oder hohen Frequenzen ist die Dämmfähigkeit jedoch begrenzt. Besonders die Musikwiedergabe war in der Regel auch bei der niedrigsten getesteten Lautstärke deutlich zu Hören. Diese entsprach jedoch bereits einer vergleichsweise hohen Geräuschbelastung und hatte zudem einen hohen Anteil sehr tiefer Frequenzen. Die Schallübertragung wurde daher auch durch die Schallbrücken im Estrich begünstigt. Dies gilt zum Teil auch für die meist deutlich wahrnehmbaren Nutzergeräusche.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die subjektive Wahrnehmung besonders im Kontext der Testsituation nicht als exakter Bewertungsmaßstab angesehen werden kann. Zwischen den Tests lagen größere Zeitabstände, die den Vergleich der Hörwahrnehmung verzerren können. Die subjektiven Wahrnehmungstests dienen daher in erster Linie dazu, ein Gespür dafür zu bekommen, mit welchen Einschränkungen oder Qualitäten im Schallschutz grundsätzlich bei unterschiedlichen Wandaufbauten zu rechnen ist. Für die individuelle Auswahl einer Trennwand wird in diesem Zusammenhang die Priorisierung oder der Verzicht auf Privatsphäre entscheidend.

Wie auch anhand der Berechnungs- und Messwerte zu erwarten war, konnten die Aufbauten der einfachen Schiebewand und der offenen Regalwand die Privatsphäre am wenigsten gewährleisten. Nach den Ertüchtigungen mit verschiedenen Dämmstoffen wurde die Regalwand hingegen am besten bewertet.

Es bestätigte sich auch die Erkenntnis aus den messtechnischen Untersuchungen, dass die schalltechnische Leistungsfähigkeit der Trennwände begrenzt zum Tragen kommt. Besonders bei den Testfällen der Musikwiedergabe und einiger Nutzergeräusche konnten die Wände unabhängig von der Qualität des Aufbaus keinen besseren Schallschutz gewähren.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Für das Modellvorhaben ‚Collegium Academicum‘ ergab sich aus den Untersuchungen im Teststand an mehreren Punkten weiterer Planungsbedarf. Bei den messtechnischen Untersuchungen zum Schallschutz erreichten die Trennwände im Allgemeinen gute Schalldämmwerte. Die Ausführung der Anschlussdetails entsprach jedoch noch nicht einer in der Realisierung anwendbaren Lösung. Hierbei sind vor allem der Anspruch an Flexibilität und die Möglichkeit des Selbstbaus entscheidende Kriterien, die im Rahmen der messtechnischen Untersuchungen nicht ausreichend berücksichtigt werden konnten.

Außerdem zeigten sich auch bei den Anschlüssen der Außenwandkonstruktionen Probleme bei der Abdichtung zwischen Wänden und Stützen. Auch wenn diese nicht im Mittelpunkt der Betrachtungen am Teststand lagen, kam die Frage nach den Auswirkungen für die Realisierung des Projekts auf.

Allgemeine Erkenntnisse für das Bausystem liegen darin, dass die schalltechnische Leistungsfähigkeit ihm Ausbau teilweise beschränkt sein wird. Bei den Testaufbauten der Innenwände konnte maximal ein Schalldämmmaß von etwa 40dB erreicht werden. Ab diesem Wert werden die Übertragungswege durch die tragenden Bauteile maßgeblich. Diese Einschränkung tritt auch bei der vertikalen Schallübertragung auf, allerdings lässt sich diesbezüglich anhand der Messergebnisse festhalten, dass das Bausystem die Anforderungen an Tritt- und Luftschallübertragung durch Geschosstrenndecken grundsätzlich erfüllen kann.

6.4. THERMISCHE BAUPHYSIK UND KLIMABEDINGTER FEUCHTESCHUTZ

Ziel des entwickelten Bausystems und des Modellvorhabens ist eine zukunftsweisende nachhaltige Gebäudehülle. Hierzu wird ein hoher Dämmstandard in Anlehnung an den KfW-Effizienzhaus 40 Standard und an den Passivhausstandard zur Minimierung der Transmissionswärmeverluste sowie eine hohe Luftdichtheit entsprechend dem Passivhausstandard ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$) zur Minimierung der Lüftungswärmeverluste angestrebt.

Um eine lange Lebensdauer zu gewährleisten, soll ein besonderes Augenmerk auf eine bauphysikalisch zuverlässige, fehlertolerante Konstruktion sowie eine einfache Ausführbarkeit gelegt werden.

Zudem werden Konstruktionen gewählt, die hinsichtlich des Energieaufwandes zur Herstellung und hinsichtlich der Rückbaubarkeit positiv zu bewerten sind.

Allgemeine Anforderung

Die Schutzziele hinsichtlich der thermischen Bauphysik und des klimabedingten Feuchteschutzes ergeben sich einerseits aus der Bauordnung mit dem Ziel, ein gesundes Raumklima zu gewährleisten und die Baukonstruktion vor schädlichen Einflüssen zu schützen, sowie andererseits aus der Energieeinsparverordnung mit dem Ziel, den Energiebedarf für die Klimatisierung des Gebäudes unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zu minimieren.

So fordert die Musterbauordnung (MBO), dass „durch Wasser, Feuchtigkeit, pflanzliche und tierische Schädlinge Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen“ dürfen und die Gebäude „einer ihrer Nutzung und den klimatischen Verhältnissen entsprechenden Wärmeschutz haben“. Im Weiteren wird auf technische Baubestimmungen verwiesen – bezüglich der thermischen Bauphysik und des klimabedingten Feuchteschutzes maßgeblich auf folgende Normen:

Anforderungen an Planung, Bemessung und Ausführung gem. § 85a Abs. 2 MBO	Technische Regel
Mindestanforderungen an den Wärmeschutz	DIN 4108-2:2013-02
Klimabedingter Feuchteschutz	DIN 4108-3:2014-11
Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte	DIN 4108-4:2017-03
Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe	DIN 4108-10:2015-12

Tabelle 16:
Für die vorliegende Studie maßgebliche DIN-Normen im Bereich Bauphysik, beziehungsweise den Wärmeschutz betreffende technische Baubestimmungen gemäß MBO 2016.
Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN).

Zudem stellt die Energieeinsparverordnung (EnEV) unter anderem Anforderungen an den Wärmeschutz und den Feuchteschutz eines Gebäudes mit dem Ziel der Einsparung von Energie in Gebäuden um die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung, insbesondere ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis zum Jahr 2050, zu erreichen. Für neuere Gebäude gilt das GEG GebäudeEnergieGesetz das am 1. Nov. 2020 in Kraft getreten ist, das aber an die Gebäudehülle die gleichen Anforderungen definiert wie die EnEV, die für die Modellvorhaben relevant war.

Maßgebende Anforderung der EnEV hinsichtlich des baulichen Wärmeschutzes ist die Begrenzung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes, welcher durch eine entsprechende Wärmedämmung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche einzuhalten ist.

Daneben gelten weitere Hauptanforderungen an die Begrenzung des Primärenergiebedarfs des Gebäudes und an den sommerlichen Wärmeschutz, also die Vermeidung einer solaren Überhitzung des Gebäudes ohne Einsatz von Anlagen zur aktiven Kühlung, welche mittelbar durch den baulichen Wärmeschutz und die Konstruktion beeinflusst werden.

Hinzu kommen Nebenanforderungen, ohne bestimmte Grenz- oder Zielwerte zu nennen. So ist nach anerkannten Regeln der Technik die wärmedämmende Gebäudehülle dauerhaft luftundurchlässig auszuführen, der zum Zwecke der Gesundheit erforderliche Mindestluftwechsel zu gewährleisten, der Mindestwärmeschutz zu gewährleisten und der Einfluss von Wärmebrücken zu minimieren.

Maßgeblich für die bauphysikalischen Anforderungen bei dem Modellvorhaben in Heidelberg waren nicht die gesetzlichen Anforderungen, sondern die strengerer Grenzwerte, die sich aus der Inanspruchnahme von Fördermitteln zum energiesparenden Bauen ergeben. Hierunter fallen insbesondere die Förderprogramme der Kreditanstalt für Wiederaufbau, deren Förderquote je nach prozentualer Unterschreitung der gesetzlichen Anfeuerung durch die Energieeinsparverordnung ausfällt. So unterschreitet der mit dem Bausystem avisierten KfW-Effizienzhaus-40-Plus-Standard den Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes nach EnEV um 60 % und die Anforderungen an die Dämmung der Gebäudehülle um 45%.

Aus den gesetzlichen Bestimmungen und den angestrebten Standards lassen sich folgende allgemeine Anforderungen ableiten:

Reduzierung der Transmissionswärmeverluste, Mindestwärmeschutz und Vermeidung von kritischer Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

Mindestwärmeschutz

Zur Vermeidung von Schimmelbildung und Tauwasserausfall an der Innenseite der wärmeübertragenden Umfassungsfläche im Sinne der Gewährleistung eines hygienischen Raumklimas und des dauerhaften Schutzes der Baukonstruktion gegen klimabedingte Feuchteinwirkungen und deren Folgeschäden stellt die bauaufsichtlich eingeführte DIN 4108-2:2013-02 Anforderungen an den Mindestwärmeschutz flächiger Bauteile und im Bereich von Wärmebrücken.

Das Potential der Luft, Wasser in Form von Wasserdampf zu binden, sinkt mit der Temperatur der Luft. Kühlt sich die Raumlufttemperatur an kalten Oberflächen ab, erhöht sich somit die dort vorherrschende relative Luftfeuchte. Eine relative Luftfeuchte von über 80% über einen längeren Zeitraum begünstigt das Wachstum von Schimmelpilz. Bei einem mittleren Raumklima von 20°C und 50% relativer Feuchte tritt diese relative Luftfeuchte an Oberflächen ein, wenn diese eine Temperatur von 12,6 °C unterschreitet.

Daher fordert die DIN 4108-2:2013-02, dass die Temperatur an jeder Stelle der Innenseite der wärmeübertragenden Umfassungsfläche diese Temperatur nicht unterschreitet. Für flächige Bauteile schreibt die Norm dazu Mindest-Wärmedurchgangswiderstände in Abhängigkeit des Bauteils vor.

Tabelle 17:
Mindestwerte für
Wärmedurchlasswiderstände
von flächigen Bauteilen gem.
DIN 4108-2, Nr. 5 (Auszug).
Quelle: Deutsche Institut für
Normung (DIN).

Bauteile	Beschreibung	Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils R in m²K/W
Homogene Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse m' ≥ 100 kg/m²		
Wände beheizter Räume	gegen Außenluft, Erdreich, Tiefgaragen, nicht beheizte Räume (auch nicht beheizte Dachräume oder nicht beheizte Kellerräume außerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche)	1,2 c
Decken beheizter Räume nach oben und Flachdächer	gegen Außenluft	1,2
Decken beheizter Räume nach unten	gegen Außenluft, gegen Tiefgarage, gegen Garagen (auch beheizte), Durchfahrten (auch verschließbare) und belüftete Kriechkeller	1,75
	gegen nicht beheizten Kellerraum	0,9
	unterer Abschluss (z. B. Sohlplatte) von Aufenthaltsräumen unmittelbar an das Erdreich grenzend bis zu einer Raumtiefe von 5 m	0,9
Homogene Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse m' < 100 kg/m²		
Allgemein		1,75
Inhomogene Bauteile		
Gefach		1,75
Gesamtbauteil		1,00
Rollladenkasten		1,00
Transparente und teiltransparente Bauteile		
Opake Ausfachungen		1,20
Rahmen		U < 2,9 W/(m²K)
Verglasung		Mind. 2-Scheiben bzw. Isolierglas

Auch im Bereich von Wärmebrücken als linienförmige und punktuelle Schwächungen der wärmedämmenden Gebäudehülle ist die Grenztemperatur von 12,6 °C bzw. ein minimaler Temperaturfaktor f_{Rsi} von 0,7 einzuhalten. Die Einhaltung ist detailliert mittels Rechenverfahren nach DIN EN ISO 10211 unter Annahme definierter Randbedingungen nachzuweisen.

Tabelle 18:
Randbedingungen zur Wärmebrückenberechnung gemäß DIN 4108-2:2012-02 Nr. 6.

Randbedingungen zur Wärmebrückenberechnung	
Innentemperatur θ_i	20 °C
Relative Raumlufffeuchte ϕ_i	50 %
Außentemperatur θ_e bei Außenraum, Tiefgarage, unbeheiztem Dachraum	-5 °C
Außentemperatur θ_e bei unbeheiztem Keller, Erdreich, unbeheizter Pufferzone	10 °C
Wärmeübergangswiderstand, raumseitig R_{si}	0,25 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand, außenseitig R_{se}	gem. nach DIN EN ISO 6946
Minimal zulässige Oberflächentemperatur ϕ_{si}	12,6 °C

Ausführungen von Wärmebrücken entsprechend oder gleichwertig zu den Ausführungsbeispielen des Beiblattes 2 der DIN 4108 erfüllen bereits diese Anforderung und bedürfen daher keines weiteren Nachweises.

Im hocheffizienten Bauen (KfW-Effizienzhaus 55/40, Passivhaus) sind die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz in der Fläche und im Bereich von Wärmebrücken in der Regel aufgrund der hohen Anforderungen an den Baulichen Wärmeschutz zur Energieeinsparung ohnehin erfüllt.

Baulicher Wärmeschutz zur Energieeinsparung

Neben der Vermeidung von Tauwasserausfall und eines erhöhten Schimmelpilzrisikos an der Bauteiloberfläche bestehen Anforderungen an die Gebäudedämmung zur Reduktion der Transmissionswärmeverluste. So besteht die gesetzliche Anforderung an neu zu errichtende Wohngebäude, dass der spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust HT' mindestens dem des Referenzgebäudes nach EnEV als Stand der Technik 2009 entspricht.

Berücksichtigt werden neben den Transmissionswärmekoeffizienten U der Bauteile auch der Einfluss der Wärmebrücken in Form des auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Wärmebrückenzuschlags ΔU_{WB} .

Werden Fördermittel der KfW in Anspruch genommen, sind diese Werte prozentual je nach KfW-Effizienzhaus-Standard zu unterschreiten. Daneben bestehen Empfehlungen des Passivhaus Instituts (PHI) zu U-Werten für die Realisierung eines Passivhauses.

U-Werte	Referenzgebäude	KfW55	KfW40	Passivhaus	Modellvorhaben (Ist-Werte der Planung)			
					Holzfassade	Metallfassade		
Außenwand	W/(m ² K)	0,28	0,196	0,154	0,15	allgemein	0,16	0,14
						aussteifend	0,19	0,18
Dachflächen	W/(m ² K)	0,20	0,14	0,110	0,150	0,06		
Bodenplatten	W/(m ² K)	0,35	0,245	0,1925	0,150	0,12		
Fenster	W/(m ² K)	1,30	0,91	0,715	0,800	0,83		
Wärmebrückenzuschlag								
Wärmebrücken	W/(m ² K)	0,05	0,035	0,0275	0,010	0,01		

Tabelle 19:
Maximale Transmissionswärmekoeffizienten U und Wärmebrückenzuschläge verschiedener Gebäudestandards im Vergleich zum Modellvorhaben.

Vermeidung von Tauwasserausfall im Bauteil durch Diffusion

Zur Vermeidung von Materialschädigungen und Beeinträchtigungen der Funktionssicherheit der Baukonstruktion stellt die bauaufsichtlich eingeführte DIN 4108-3:2014-11 Anforderungen an die maximal zulässige Feuchtezunahme in Konstruktionen durch Wasserdampfdiffusion.

Durch das im Winter vorherrschende Dampfdruckgefälle zwischen beheizten Innenräumen und der Außenluft kann es in dampfdurchlässigen Bauteilen zur Feuchteerhöhung bis hin zur Tauwasserbildung kommen. Dies findet jedoch in der Regel nur dann statt, wenn die ankommende Feuchte weder aufgrund äußerer dampfdiffusionsdichterer Schichten weiter nach außen abgegeben wird noch durch Sorption oder durch kapillares Saugen aufgenommen werden kann.

Der Nachweis der Schadensfreiheit erfolgt dreistufig. Zunächst ist die Übereinstimmung mit den in der Norm beschriebenen nachweisfreien Konstruktionen zu prüfen. Besteht keine Übereinstimmung, ist zu prüfen, ob das in der Norm beschriebene stationäre Verfahren (Glaser-Verfahren) anwendbar ist und ob die Bedingungen für eine Schadensfreiheit erfüllt sind. Das stationäre Verfahren betrachtet dabei die hygrothermischen Vorgänge nur sehr vereinfacht mit lediglich zwei stationären Randbedingungen – die Tauperiode und die Verdunstungsperiode. Unberücksichtigt bleiben neben sich ändernden äußeren Randbedingungen unter anderem auch feuchte- und wärmeabhängige Änderungen der Materialparameter, Sorptions- und Kapillarprozesse im Bauteil sowie die solare Einstrahlung und Niederschlag.

Im Hinblick auf das Modellvorhaben gelten insbesondere folgende allgemeine Anforderungen bei Anwendung des stationären Verfahrens:

- Das während der Tauperiode im Innern des Bauteils anfallende Wasser muss während der Verdunstungsperiode wieder an die Umgebung abgegeben werden können (Wasseraufnahme während der Tauperiode $M_c \leq$ Wasserverdunstungspotential während der Verdunstungsperiode M_{ev})
- Bei Dächern und Wänden gegen Außenluft sowie bei Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen darf im Bauteilquerschnitt eine maximale Tauwassermasse M_c von insgesamt $1,0 \text{ kg/m}^2$ (allgemein) bzw. $0,5 \text{ kg/m}^2$ (an Berührungsflächen von nicht kapillar wasseraufnahmefähigen Schichten) nicht überschritten werden.
- Bei Holz ist eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes um mehr als 5 %, bei Holzwerkstoffen um mehr als 3 % unzulässig. Diese Grenzen gelten nicht für Holzwolle-Leichtbauplatten und Mehrschicht-Leichtbauplatten nach DIN EN 13168.

Ist das stationäre Verfahren nicht anwendbar oder die Anforderungen nicht eingehalten, kann zudem eine instationäre hygrothermische Berechnung durchgeführt werden, um die Schadensfreiheit nachzuweisen.

Reduzierung von Lüftungswärmeverlusten durch Infiltration kalter Außenluft und Vermeidung von Tauwasserausfall im Bauteil infolge von Konvektion und Exfiltration feuchtwarmer Raumluft

In der DIN 4108-2:2013 wird die Problematik wie folgt beschrieben: „Durch undichte Anschlussfugen von Fenstern und Außentüren sowie durch sonstige Undichtheiten, z. B. Konstruktionsfugen, insbesondere von Außenbauteilen und Rollladenkästen, treten infolge des Luftaustauschs Wärmeverluste auf.“ Zudem führt die Exfiltration feuchtwarmer Raumluft in die Konstruktion zu einem Feuchteeintrag, der deutlich höher liegen kann als jener durch Wasserdampfdiffusion. Diese Feuchtezunahme kann zu einer unzulässig hohen Bauteilfeuchte und zu Materialschädigungen und Beeinträchtigungen der Funktionssicherheit der Baukonstruktion führen. Daher ist auch der konvektive Feuchteeintrag in die Baukonstruktion durch eine dauerhaft luftdichte Bauweise der wärmeübertragenden Umfassungsfläche zu vermeiden.

Auch der Mindestwärmeschutz und die Vermeidung einer unzulässig hohen Feuchte im Bauteil durch Diffusion setzt eine luftdichte Bauweise voraus.

Mit dem Ziel der Energieeinsparung stellt die EnEV die Anforderung einer dauerhaft luftdichten Bauweise nach anerkannten Regeln der Technik. Soll diese bilanziell angesetzt werden, sind Grenzwerte für den In- bzw. Exfiltrationsluftwechsel bei einem definierten Luftdruckunterschied von 50 Pascal einzuhalten (Differenzdruckmessung bzw. Blower-Door-Messung). Zudem darf bei mechani-

schen Lüftungsanlagen in Wohngebäuden der Einfluss einer Wärmerückgewinnung oder einer regelungstechnisch verminderten Luftwechselrate nur dann in der Gebäudeenergiebilanz berücksichtigt werden, wenn diese Grenzwerte eingehalten sind. Das Passivhaus fordert für zertifizierte Passivhäuser eine noch höhere Luftdichtheit.

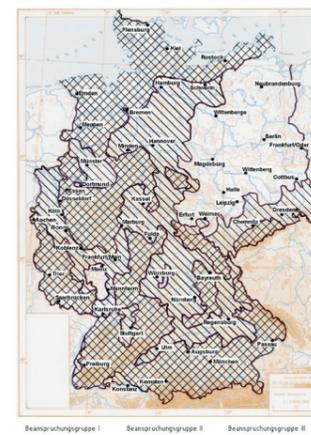
	Raumvolumenbezogene Luftwechselrate n_{50} -Wert in $\text{m}^3/(\text{m}^3\text{h})$	Hüllflächenbezogene Luftwechselrate q_{50} -Wert in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$
ohne raumluftechnischen Anlagen	3,0	4,5
mit raumluftechnischen Anlagen	1,5	2,5
Passivhaus	0,6	-

Insbesondere DIN 4108-7 beinhaltet beispielhafte Konstruktionen zur luftdichten Bauweise in der Fläche sowie im Bereich von Bauteilanschlüssen, Durchdringungen, Installationen und Einbauten. Die Norm gilt somit als Teil der anerkannten Regeln der Technik.

Vermeidung von Feuchte infolge Niederschlags

Um eine übermäßige Feuchteaufnahme der Baukonstruktion durch äußere Schlagregenbeanspruchung zu begrenzen, ist nach DIN 4108-3 die kapillare Wasseraufnahme zu begrenzen und die Abgabe des aufkommenden Wassers durch Verdunstung in ausreichender Weise zu gewährleisten.

Dies kann sowohl in Abhängigkeit der Schlagregenbeanspruchung des jeweiligen Standortes durch konstruktive Maßnahmen (zum Beispiel Außenwandbekleidung, Verblendmauerwerk, Schutzschichten im Inneren der Konstruktion) als auch durch Putze beziehungsweise Beschichtungen erzielt werden.



Beanspruchungsgruppe	Niederschlag in $\text{mm/m}^2\text{a}$	Bemerkung
I – geringe Beanspruchung	< 600	sowie besonders windgeschützte Lagen der Gruppe II + III
II – mittlere Beanspruchung	600 – 800	Sowie windgeschützte der Gruppe III, Hochhäuser und exponierte der Gebäude der Gruppe I
III – starke Beanspruchung	> 800	Sowie windreiche Gebiete der Gruppen I + II, Hochhäuser und exponierte der Gebäude der Gruppe II

Tabelle 20: Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden gemäß EnEV 2014 Anlage 4.

Tabelle 21: Schlagregenbeanspruchungsgruppen nach DIN 4108-3.

Grundprinzipien im Bausystem

Aus den Anforderungen ergeben sich für das Modellvorhaben folgende zentrale Ziele:

- Effiziente und durchgehende Dämmung der Bauteile.
- Minimierung des Einflusses von Wärmebrücken.
- Hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle.
- Schutz vor unzuträglicher Feuchte in die Konstruktion durch Diffusion.
- Schlagregenschutz.

Effiziente Dämmung der Bauteile

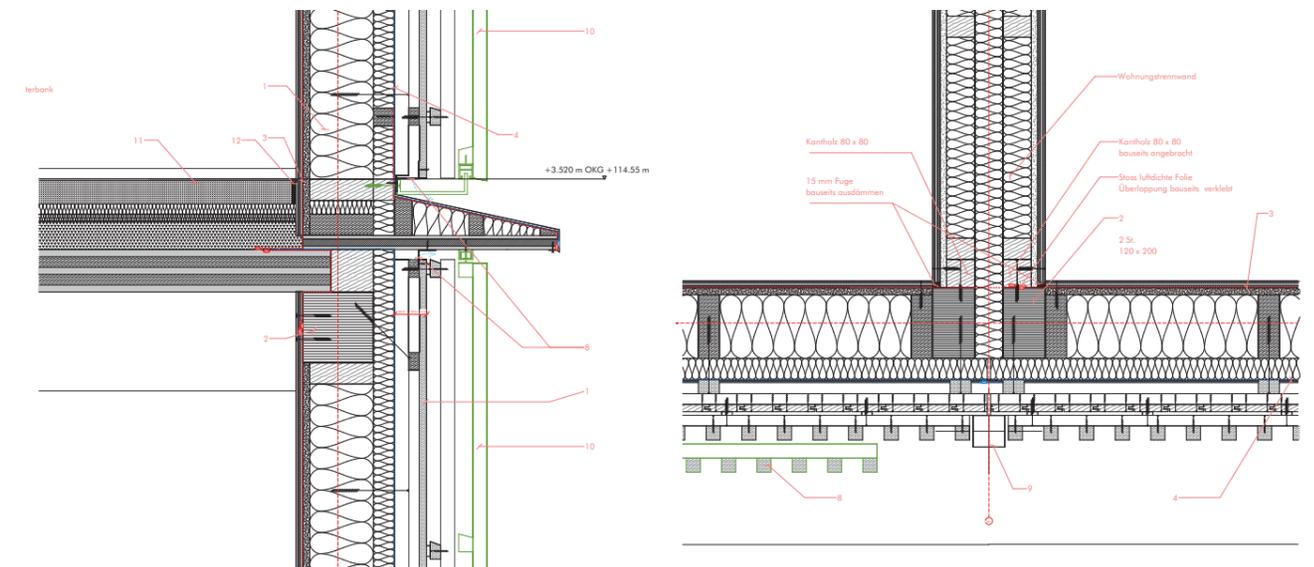
Standard-Wandaufbau

Das Bausystem, das auf den mehrgeschossigen Holzskelettbau ausgelegt ist, weist aufgrund der statisch und brandschutztechnisch erforderlichen Querschnitte der Tragstützen in der Regel eine Gefachtiefe von 180 mm bis 200 mm auf. Der Holzanteil kann abseits der Tragstützen auf das konstruktiv notwendige Minimum reduziert werden, sodass sich bei einem Achsmaß von 2,85 m ein Holzanteil von <15% ergibt. Da an die Steifigkeit und Druckfestigkeit der Gefachdämmung keine besonderen Anforderungen gestellt werden, kann diese mit geringen Wärmeleitfähigkeiten von 0,032 W/(mK) in Mineralwolle ausgeführt werden. Bereits mit dieser Gefachdämmung wird ein Transmissionswärmekoeffizient von 0,222 bis 0,246 W/(m²K) erreicht und die gesetzlichen Anforderungen an den Mindestwärmeschutz und an die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Wandbereich erfüllt.

Durch eine zusätzliche Außendämmung erhöht sich der Dämmstandard weiter. Dabei minimiert die äußere Dämmschicht durch Überdämmung der Tragstützen und Ständer zudem den Einfluss konstruktiver Wärmebrücken. Wird die Dämmschicht mit mindestens 60mm der Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m²K) ausgeführt, entsprechen die Anschlussdetails in der Regel den Ausführungsbeispielen des Beiblattes 2 der DIN 4108 von 2019 Kategorie B, sodass ein verminderter Wärmebrückenzuschlag von 0,03 W/(m²K) angesetzt werden kann.

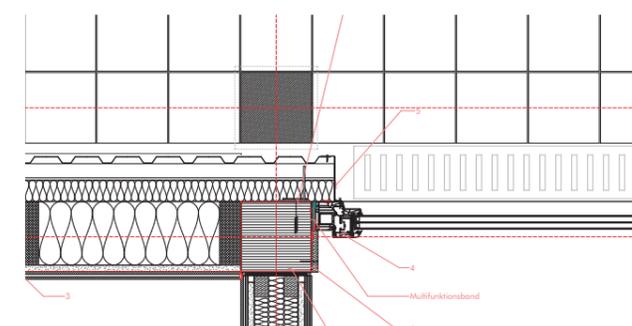
Mit diesem Wandaufbau kann auf einem relativ geringen Querschnitt von 240 mm – 260 mm zzgl. Raumabschluss und Witterungsschutz ein Transmissionswärmekoeffizient von 0,155 bis 0,166 W/(m²K) erreicht werden. Eine weitere Verbesserung des Dämmstandards auf Passivhaus- und KfW-Effizienzhaus-40-Standard ist durch Erhöhung der Dämmstärke der Außendämmung um 20 mm einfach möglich. Ebenso kann der Dämmstandard durch eine 60 mm starke raumseitige Dämmung auf einen U-Wert von 0,125 bis 0,132 W/(m²K) erhöht werden. Die Ebene kann dabei als Installationsebene Raum für haustechnische Installationen bieten und schützt so die Luftdichtheitsebene vor Perforation. Eine solche Konstruktion wurde bei dem zweiten Anwendungsfall

des Bausystem in Frankfurt am Main gewählt. Zu berücksichtigen ist, dass in diesem Fall die Tragkonstruktion durch die Installationsebene und eine raumabschließende Schicht verdeckt wird und nicht mehr als gestalterisches Element in Erscheinung tritt.



Im Modellvorhaben erreicht der Regelaufbau mit 180mm Gefachdämmung WL 032 und 60mm Außendämmung WL 036 bei einer Wandstärke von 277 mm zzgl. vorgehängter hinterlüfteter Fassade einen U-Wert von 0,155 W/(m²K).

Zum Laubengang hin wurde aufgrund von Brandschutzanforderungen die ursprünglich geplante Unterkonstruktion mittels Fassadenankern aufgrund der hohen Wärmebrückeneinflüsse konventioneller Fassadenanker verworfen und zugunsten einer Außendämmung mit ausgedämmter Lattung- und Konterlattungsebene mit je 50mm WL 035 ausgeführt. Der U-Wert verbessert sich hierdurch auf 0,142 W/m²K bei einer Wandstärke von 317 mm zzgl. Trapezblech.



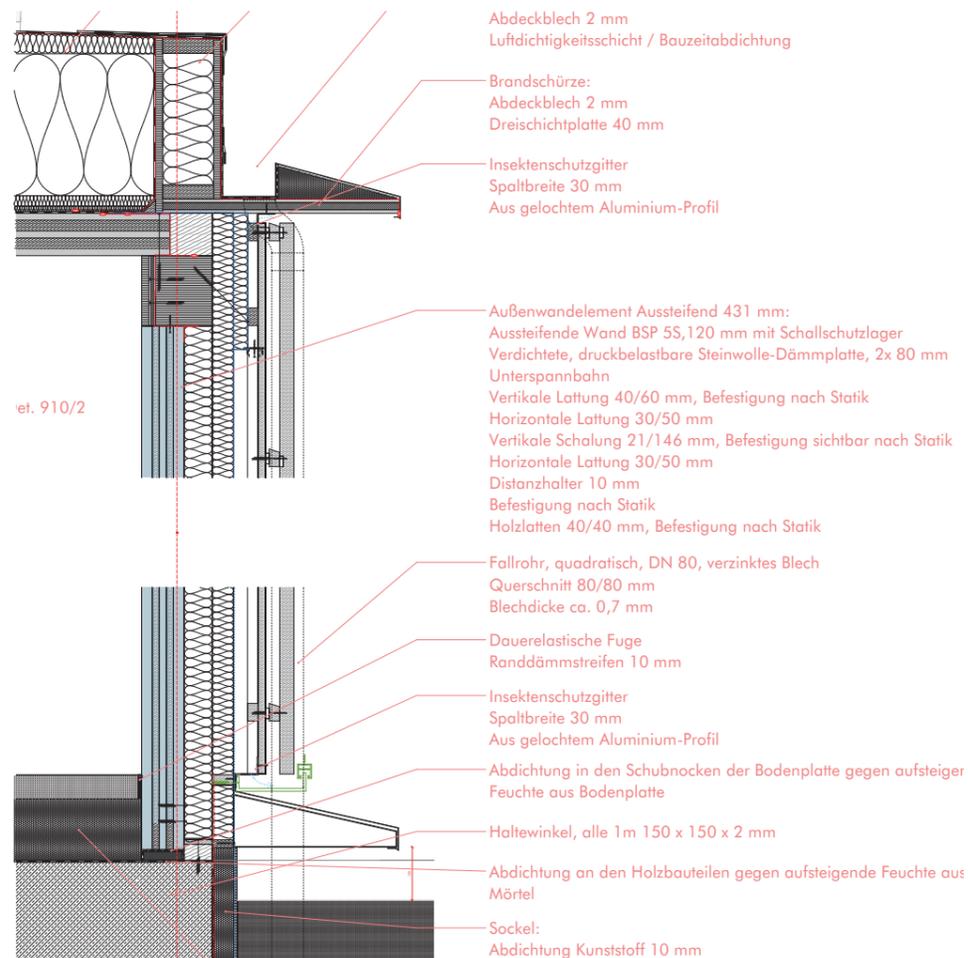
Graphik 77:
Regeldetails Fassade beim
Modellvorhaben Collegium
Heidelberg
Quelle: DGJ Architektur
GmbH

Graphik 78:
Regeldetails Fassade
Fensteranschluss beim
Modellvorhaben Collegium
Heidelberg
Quelle: DGJ Architektur
GmbH

Aussteifende Wandelemente

Das System sieht neben dem Standardaufbau Segmente zur Aussteifung vor, die als Mehrschichtplatten mit außenliegender Dämmung ausgebildet werden. Der statisch erforderliche Querschnitt von 120 mm Mehrschichtplatte bietet Bauteildicken entsprechend dem Regelaufbau Raum für 120 bis 140 mm Dämmung. Aufgrund der Anforderungen an Druckfestigkeit und Steifigkeit der Dämmung ist hier eine Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(mK) üblich. Mit einem U-Wert von 0,206 bis 0,230 W/m²K erreicht dieser Bauteilaufbau die Anforderungen an Passivhäuser und KfW-40 Häuser nicht. Auch mit innenseitiger gedämmter Installationsebene erreicht das Bauteil nur einen U-Wert von 0,168 - 0,172 W/(m²K). Vor diesem Hintergrund ist es wünschenswert, die aussteifenden Elemente maßgeblich im Innenraum zu lokalisieren. Ein geringer Anteil von aussteifenden Fassadenelementen ist jedoch durch Übererfüllung der Dämmanforderung an anderer Stelle kompensierbar.

Graphik 79:
Regeldetails Fassade
und Dachanschluss beim
Modellvorhaben Collegium
Heidelberg
Quelle: DGJ Architektur
GmbH



Im Modellvorhaben erreicht der Aufbau der aussteifenden Wände mit 80mm + 60mm Außendämmung WLG 036 bei einer Wandstärke von 279 mm zzgl. vorgehängter hinterlüfteter Fassade einen U-Wert von 0,192 W/(m²K). Im Laubengangbereich ergibt sich durch die ausgedämmte Lattungs- und Konterlattungsbene anstelle der Außendämmung ein U-Wert von 0,176 W/(m²K) bei einer Bauteildicke von 319 mm zzgl. Trapezblech. Grundsätzlich kann das Bausystem sowohl mit einer hinterlüfteten Holz- oder Metallfassade ausgeführt werden, als auch mit einem Wärmedämmverbundsystem.

Im Falle der vorgehängten hinterlüfteten Fassade ist die Art der Unterkonstruktion der Fassade bei der Berechnung des Transmissionswärmekoeffizienten zu berücksichtigen. Hochgedämmte passivhaustaugliche Fassadenanker mit geringer Wärmeleitfähigkeit (z.B. Glasfaser) führen zu geringen, vernachlässigbaren Zuschlägen auf den U-Wert. Sie sind jedoch in der Regel mit hohen Investitionskosten und entsprechend langen Amortisationszeiten verbunden. Standard-Fassadenanker erhöhen hingegen den Transmissionswärmekoeffizienten deutlich, sodass hohe Dämmstandards, wie der Passivhaus- und der KfW-Effizienzhaus 40-Standard, nur mit starken zusätzlichen Dämmschichten oder durch Kompensation an anderen Bauteilen erreicht werden können. Die Unterkonstruktion mit ausgedämmter Lattung und Konterlattung aus Holz bietet einen moderaten Einfluss auf den Transmissionswärmekoeffizienten bei verhältnismäßig geringen Investitionskosten. Insbesondere, wenn auch die Außenbeplankung aus Holz besteht, bleibt die gesamte Konstruktion dem nachwachsendem, kohlenstoffspeicherndem Material Holz treu und kann vom Holzbau-Gewerk mit übernommen werden. Bestehen jedoch Anforderungen an den Brandschutz, sind gegebenenfalls weitere Maßnahmen erforderlich. Bei der Außenwandbekleidung sind zudem die Anforderungen an die Diffusionsoffenheit der Außenbekleidung zur Vermeidung von unzulässiger Feuchte im Bauteil und die Anforderungen an die Begrenzung der kapillaren Wasseraufnahme und an die Sicherstellung der Verdunstungsmöglichkeiten im Sinne des Schlagregenschutzes nach DIN 4108-3 zu berücksichtigen.

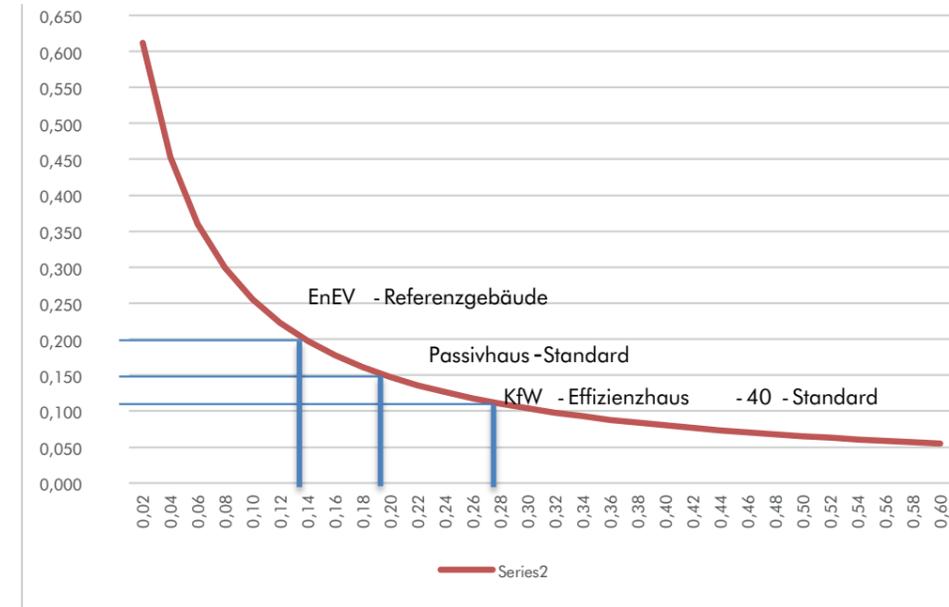
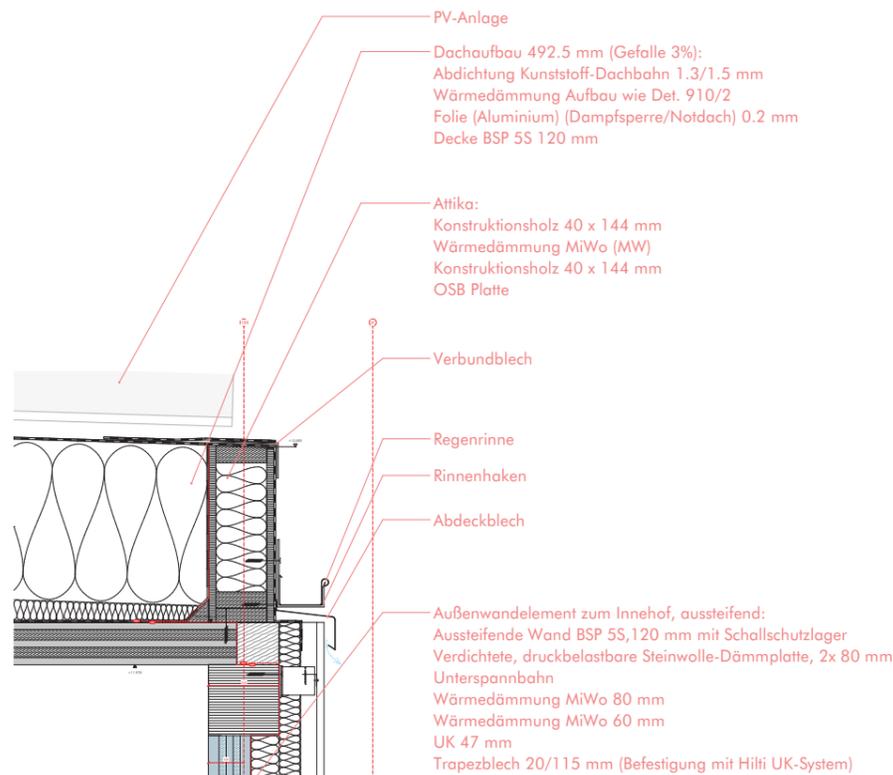
Zudem kann die Außenwandbekleidung als Wärmedämmverbundsystem ausgebildet werden. In der Regel kann die äußere Dämmschicht bereits in putzfähiger Ausführung realisiert werden, sodass kein zusätzlicher Putzträger erforderlich ist. Im Modellvorhaben wurde auf eine vorgehängte hinterlüftete Holzfassade mit Holzlattung als Unterkonstruktion zurückgegriffen. Im Falle der Laubengänge muss aus Brandschutzgründen die äußere Schicht aus nicht brennbarem Material bestehen. Das zunächst geplante WDVS wurde zugunsten einer Bekleidung mit Trapezblech verworfen. Die Unterkonstruktion wurde als mit Mineralwolle ausgedämmte Lattung und Konterlattung umgesetzt. Die offenen Stirnseiten der Lattung wurden mit Brandschutzmitteln behandelt.

Dachaufbau

Das Bausystem sieht eine 120 mm starke Massivholzdecke als tragende Deckenebene im Dach vor. Die darüber liegende Auf-Dach-Dämmung kann frei nach den Erfordernissen durch den Dämmstandard dimensioniert werden. So kann bei einer Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m²K) mit einer Dämmung von 20 cm der Passivhausstandard (U = 0,148 W/(m²K)) und mit 28 cm der KfW-Effizienzhaus-40-Standard (U = 0,110 W/(m²K)) erreicht werden. Durch Verwendung von Dämmstoffen geringerer Wärmeleitfähigkeiten kann die Stärke der Dämmebene reduziert werden, z.B. bei PUR-Dämmstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,020 W/(mK) auf Dämmstoffdicken von 12cm bzw. 16 cm.

Der Dachaufbau kann dazu genutzt werden, die Überschreitung der Dämmanforderungen anderer Bauteile auszugleichen (zum Beispiel aussteifende Wandelemente, Einfluss von Fassadenankern einer hinterlüfteten Fassade). Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Dachbauteile in der Energieeinsparverordnung (0,20 W/m²K, 140mm WLГ 035) und somit auch für den KfW40-Standard (0,11 W/m²K, 280mm WLГ 035) geringere Transmissionswärmekoeffizienten und somit höhere Dämmstoffdicken gefordert sind. Um den Dämmwert weiter zu optimieren, ist aufgrund der degressiven Dämmwirkung zusätzlicher Dämmstoffdicken ungleich mehr Materialstärke erforderlich.

Graphik 80:
Regeldetails Dachaufbau
und Dachrand beim
Modellvorhaben Collegium
Heidelberg
Quelle: DGJ Architektur
GmbH



Graphik 81:
Degressiver Einfluss der Dicke
des Dämmstoffs mit Lambda
= 0,035 W/(m²K) auf den
U-Wert des Dachaufbaus,
die einen U-Wert im
ungedämmten Zustand von
0,94 W/(m²K) besitzt.
Quelle: ina
Planungsgesellschaft mbH.

Im Modellvorhaben dient eine zusätzliche Dämmung der Dachflächen der Kompensation von Einschränkungen hinsichtlich des Wärmeschutzes an anderen Bauteilen, maßgeblich den Aussteifenden Außenwänden und der Fenster. Der Dachaufbau weist daher ein Dämmpaket mit 450 mm Grunddämmung WLГ 040 und 40 – 210 mm Gefälledämmung WLГ 032 auf. Der Aufbau erreicht so bei einer Bauteilstärke von 610 – 780 mm zzgl. Bekiesung einen U-Wert von 0,062 W/(m²K).

Standard-Bodenaufbau

Die Gründung des Bausystems erfolgt in der Regel konventionell auf einer Stahlbetonbodenplatte.

Um die Anforderungen an den Passivhaus- und KfW-Effizienzhaus 40 Standard zu erfüllen, sind Dämmstärken von 26cm der Wärmeleitfähigkeit $0,040 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erforderlich ($U = 0,148 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Eine weitere Erhöhung der Dämmwirkung zur Kompensation anderer Bauteile bietet sich die Dämmung erdberührter Bauteile aufgrund des geringen Temperaturkorrekturfaktors nur bedingt an.

Um die Dämmebene nicht durch einbindende Innenbauteile zu durchstoßen und somit den Wärmebrückeneffekt zu minimieren, ist die Lokalisierung der Dämmebene unter der Bodenplatte wünschenswert. Auch im Hinblick auf die Bauteiltemperatur und der resultierenden Feuchte am Fußpunkt einbindender Holzelemente ist die Lage der Dämmebene unterhalb der Bodenplatte zu favorisieren. Ist dies aufgrund anderer Planungsrandbedingungen nicht möglich, sollte zumindest ein Teil der Dämmung unterhalb der Bodenplatte angeordnet werden.

Im Modellvorhaben aufgrund der hohen Kosten für eine druckbelastbare und feuchtebeständige Dämmung unter der Bodenplatte konnte diese nicht in vollem Umfang realisiert werden. Um die Dämmebene durch einbindende Innenbauteile nicht komplett zu durchstoßen, wird trotz der erhöhten Kosten einer zweiten Dämmebene sowohl eine Dämmung auf als auch unter der Bodenplatte vorgesehen. Im Zuge der Planung des Modellvorhabens durchgeführte hygrothermische Simulationen [Querverweis] zeigten, dass bei einer oberseitigen EPS-Dämmung WLG 035 von 180 mm zumindest 120 mm unterseitige XPS-Dämmung WLG 040 vorzusehen sind, um eine unzulässige Feuchte an den Fußpunkten der Tragenden Holzelementen zu vermeiden. Weitere untersuchte Varianten wurden nach hygrothermischer Simulation aufgrund der zu erwartenden Feuchteakkumulation am Stützenfuß verworfen. Der Bauteilaufbau erreicht mit einer Bauteilstärke von 665mm zzgl. Bodenbelag einen U-Wert von $0,118 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Standard-Fenster

Auch wenn die Qualität der Fenster nicht zentrales Element des Bausystems ist, sind die erreichbaren Dämmwerte der Fenster bei der Planung der Fensterflächenanteile und der Dämmqualitäten der opaken Bauteile zu berücksichtigen. Übliche Transmissionswärmekoeffizienten hochgedämmter Fenster erreichen derzeit Werte von $0,75$ bis $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und liegen somit über den Anforderungen des KfW-Effizienzhaus-40-Standards. Es sind daher durch bessere Dämmwerte der opaken Bauteile Reserven zu schaffen, um die höheren Transmissionswärmeverluste der Fenster auszugleichen. Diese können umso kleiner ausfallen, je geringer der Fensterflächenanteil an der Fassadenfläche ist. Eine bedarfsgerechte Planung der Fensterflächen ist in diesem Zusammenhang wichtig. Im Falle des Passivhaus-Standards ist zudem der Einfluss der solaren Gewinne im Hinblick auf den Grenzwert des Heizwärmebedarfs zu berücksichtigen.

Für das Modellvorhaben wurden Fenster mit einer Dreischeibenverglasung (mittlerer $U_g = 0,537 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) in gedämmten Rahmen (mittlerer $U_f = 1,075 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und einem gedämmten Glasrandverbund (mittlerer $g = 0,038 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) verbaut. Hieraus ergibt sich ein mittlerer Gesamt-Transmissionswärmekoeffizient U_W von $0,827 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Wärmebrückenzuschlag

Um den Einfluss der Wärmebrücken zu minimieren, sieht das Bausystem eine zusätzliche Außendämmung von mindestens 60 mm der Wärmeleitfähigkeit $0,035 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, die vor Primärkonstruktion der durchgeht. Dies entspricht der Planungs- und Ausführungsbeispielen des Beiblattes 2 der DIN 4108 von 2019. Diese Ausführung folgt den Ausführungsbeispielen der Kategorie B, sodass ein verminderter pauschaler Wärmebrückenzuschlag von $0,03 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ angesetzt werden kann.

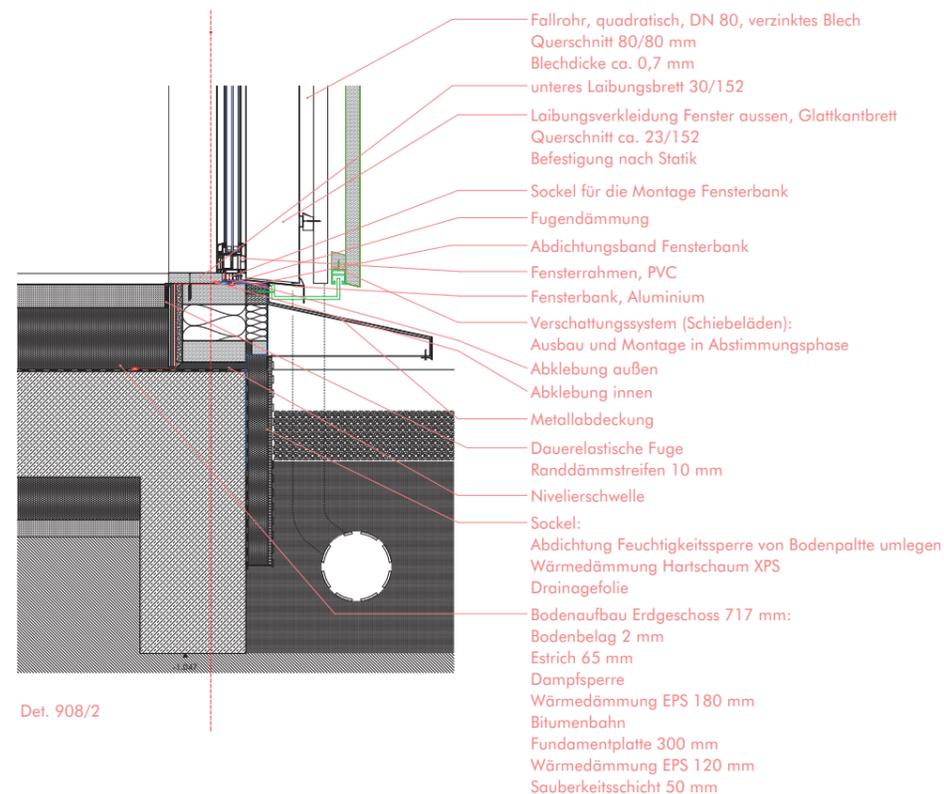
Um den KfW-Effizienzhaus-40-Standard und den Passivhausstandard zu erreichen, ist jedoch eine weitere Optimierung der Wärmebrücken und der detaillierte rechnerische Wärmebrücken-Nachweis notwendig oder der Einfluss der Wärmebrücken muss über die Dämmung der Bauteile ausgeglichen werden. Ein bausystemspezifischer Wärmebrückenkatalog ist vor diesen Hintergrund wünschenswert.

Im Modellvorhaben wurde ein detaillierter Wärmebrückennachweis geführt. Es wurde ein mittlerer, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Wärmebrückenzuschlag von $0,0149 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ für den L-Körper $0,0104 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ für den Punktkörper erreicht. Aufgrund der projektspezifischen verschiedenen Wandaufbauten und besonderen Anschlüsse war der Aufwand mit der Berechnung von rund 160 Wärmebrücken jedoch hoch.

Die Referenzwerte der Ausführungsbeispiele der DIN 4108 Beiblatt 2 2019-12 werden im Modellvorhaben mit Ausnahme des Anschlusses der Geschossdecke an die Außenwand unterschritten.

Im Falle der einbindenden Geschossdecke ist augenscheinlich die äußere Dämmung, die die horizontale Brandsperre im Hinterlüftungsspalt unterbricht, ursächlich für die Überschreitung der Referenzwerte. Zudem wird die Gefachdämmung an dieser Stelle durch Rähm, Unterzug und tragende Geschossdecke auf einer Höhe von 480 mm unterbrochen. Für die Weiterentwicklung des Bausystems ist eine Optimierung des Anschlusses hinsichtlich der Wärmebrückenminimierung sinnvoll.

Graphik 82:
Anschlussdetails Bausystem
für Außenwand/Bodenplatte
Quelle: DGJ Architektur.



Fazit Dämmung der Gebäudehülle

Das Modellvorhaben zeigt, dass sowohl der KfW40-Standard als auch eine passivhaustaugliche Gebäudehülle mit dem entwickelten Bausystem realisiert werden kann.

Die Regelaufbauten der Außenwand, des Daches und der Bodenplatte können so ausgeführt werden, dass sie den Richtwerten für die Transmissionswärmekoeffizienten des jeweiligen Standards entsprechen. Die aussteifenden Außenwände sowie die Fenster erreichen jedoch nicht die jeweiligen Richtwerte. Es ist daher sinnvoll, den Fensterflächenanteil unter Berücksichtigung anderer Belange gering zu halten und aussteifende Wände nach Möglichkeit innerhalb des beheizten Volumens zu realisieren. Die verbleibende Überschreitung der Richtwerte kann durch Übererfüllung an anderer Stelle kompensiert werden.

Kompensationspotential bietet vor allem ein detaillierter Nachweis der Wärmebrücken. Der ansetzbare pauschale Wärmebrückenzuschlag von $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ durch Nachweis der Gleichwertigkeit mit den Ausführungsbeispielen des Beiblatts 2 der DIN 4108 von 2019 Kategorie B liegt bereits nahe an dem Richtwert für ein KfW-Effizienzhaus 40. Die detaillierte Wärmebrückenberechnung für das Modellvorhaben hat gezeigt, dass bei detaillierter Berechnung aller Wärmebrücken ein spezifischer auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Wärmebrückenzuschlag von $0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit dem entwickelten Bausystem möglich ist. Im Hinblick auf zukünftige Projekte kann zudem für das Bausystem ein allgemeingültiger Wärmebrücken-katalog erstellt werden, sodass der projektspezifische Aufwand des detaillierten Wärmebrückennachweises deutlich reduziert wird.

Daneben bietet die Erhöhung der Dämmstärke der Aufdachdämmung oder der Außendämmung des Wandaufbaus Kompensationspotentiale.

Luftdichtheit der Gebäudehülle

Für das Bausystem wird eine hohe Luftdichtheit mit einem n50-Wert von $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ in Anlehnung an den Passivhausstandard angestrebt.

Die Luftdichtheit ist in der Fläche durch ohnehin erforderliche Bauteilebenen gegeben, da sowohl Leimholzstützen und -träger als auch Dreischichtplatten nach DIN 4108-7 als luftdicht eingestuft werden.

Besonderes Augenmerk ist jedoch den Bauteilanschlüssen zu widmen. Hierunter fallen die Stoßfugen der Dreischichtplatten untereinander, der Anschluss an die tragenden Stützen, der geschossübergreifende Anschluss in Verbindung mit Trägern und einbindenden Decken. Hinzu kommen die Anschlüsse an andere Bauteile der Gebäudehülle – Fenster, Dach und Bodenplatte. Die Luftdichtheit an den Anschlüssen ist entsprechend den anerkannten Regeln der Technik, insbesondere der DIN 4108-7, mit besonderer Sorgfalt bei der Planung und Ausführung umzusetzen.

Eine technische Herausforderung stellt dabei die nach innen sichtbare Konstruktion dar. Die raumabschließende innere Beplankung wird in diesem Falle durch die tragenden Stützen unterbrochen. Der luftdichte Anschluss ist auf die später nicht mehr sichtbare Außenseite beschränkt. Zudem perforieren kaltseitig der Luftdichtheitsebene geführte haustechnische Installationen die Luftdichtheitsebene zwangsläufig an vielen Punkten.

Hierzu stehen vier Lösungsvarianten zur Verfügung:

Variante 1: Luftdichtheitsfolie kaltseitig des Raumabschlusses

Eine Möglichkeit besteht darin, eine zusätzliche durchgehende luftdichte Ebene in Form einer Luftdichtheitsfolie auf der Kaltseite der Dreischichtplatte und ggf. vorhandener Installationen jedoch warmseitig der Gefachedämmung vorzusehen. Eine zusätzliche durchgängige Ebene stellt dabei sicher, dass keine Fuge bei der nachträglichen luftdichten Abdichtung vergessen wird. Allerdings ist die Luftdichtheitsfolie im Bereich der Tragkonstruktionen auf deren Kaltseite zu verziehen, sodass die Folie nicht in einer Ebene durchlaufen kann und somit anfällig für einen unsachgemäßen Einbau ist (Zugbeanspruchung, fehlende Abdichtung an erforderlichen Einschnitten der Folie etc.). Zudem wird eine zusätzliche Ebene erforderlich, deren Investitionskosten und deren graue Energie berücksichtigt werden muss.

Variante 2: Luftdichtheit durch raumabschließende Ebene

Die Luftdichtheit kann in der Fläche durch die raumabschließende Dreischichtplatte und das Tragwerk aus Holzleimbindern erfolgen. In diesem Fall sind alle Bauteilanschlüsse auf der Außenseite mit luftdichtem Klebeband abzudichten. Diese Arbeiten sind im Herstellungsprozess zu berücksichtigen. Zudem sind geeignete Maßnahmen zu berücksichtigen, um trotz Vorfertigung der Elemente einen luftdichten Anschluss an das Tragsystem zu gewährleisten.

Der Umfang haustechnischer Installationen ist in diesem Fall auf ein Minimum, maßgeblich die Vorsehung einzelner zwingend erforderlicher Steckposen in der Außenwand, zu reduzieren. Die verbleibenden Durchführungen von Elektrokabeln sind luftdicht auszuführen und Steckdosen in luftdichter Bauweise in die Dreischichtplatte einzubauen und von der Außenseite her luftdicht abzudichten. Alternativ kann die Installation auch auf der Warmseite des Raumabschlusses sichtbar oder als Vorwandinstallation, z. B. in einem Sockelkanal, geführt werden.

Variante 3: Luftdichtheitsfolie mit oder ohne raumseitiger Installationsebene

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zusätzlich eine raumseitige durchgehende luftdichte Ebene vorzusehen und diese mit einer raumseitigen Installationsebene und Innenraumbeplankung zu schützen. Diese Ausführung bietet mehr Flexibilität bei den haustechnischen Installationen und zusätzlichen Raum, der gedämmt werden kann. Hinsichtlich der Bauausführung kann der Innenausbau losgelöst von der Primärkonstruktion ausgeführt werden, sodass sich auch hier eine größere Flexibilität ergibt. Nachteilig ist der größere Bauteilquerschnitt im Hinblick auf den Nutzflächenverlust, die nicht mehr sichtbare Konstruktion und die höheren Investitionskosten für die zusätzlichen Bauteilschichten sowie deren graue Energie.

Im Modellvorhaben hat die ausführende Firma auf der Ausführung einer raumseitigen Folie bestanden, um die Anforderungen an die Luftdichtheit sicher erreichen zu können. Deswegen wurde auf der Innenseite die Innenverkleidung (Holz-Dreischichtplatte) so weit eingerückt, dass die Folie luftdicht mit Klebeband an die Stützen und Unterzüge angeschlossen werden konnte. Die Folie und die Anschlüsse wurden anschließend durch die Dreischichtplatte verkleidet.

Variante 4: Diffusionsoffene Luftdichtheitsfolie kaltseitig der Tragkonstruktion

Im Modellvorhaben konnte mittels hygrothermischer Simulation nachgewiesen werden, dass eine luftdichte diffusionsoffene Ebene kaltseitig der Primärkonstruktion und warmseitig der zusätzlichen Außendämmung hinsichtlich des Diffusionsverhaltens unkritisch ist.

Diese Ausführung bietet den Vorteil der durchgängigen Luftdichtheit in einer Ebene, sodass kein Verziehen der Luftdichtheitsebene erforderlich ist und Anschlusspunkte auf ein Minimum reduziert werden. Haustechnische Installationen können im Gefachbereich raumseitig der Luftdichtheitsebene geführt werden perforieren diese nicht.

Schutz vor unzuträglicher Feuchte in die Konstruktion infolge Diffusion

Außenwände

Der Wandaufbau des Bausystems sieht grundsätzlich eine nach außen abnehmende Diffusionsdichtheit und eine hinsichtlich der Wasserdampfdiffusion nachweisfreie Konstruktion nach DIN 4108-3 vor. Demzufolge ist eine raumseitige diffusionshemmende Schicht mit $sd,i \geq 2$ m vorzusehen. Die äußere Schicht ist im Falle einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade diffusionsoffen mit $sd,e \leq 0,3$ m und im Falle eines WDVS mit wasserabweisendem Putz und einem $sd \leq 0,7$ m auszuführen.

Im Falle des Regelaufbaus sind die Anforderungen an die innere diffusionshemmende Schicht bereits durch die Innenwandbekleidung erfüllt. Die 19mm Dreischichtplatte erreicht als Sperrholz gemäß DIN EN ISO 10465 sd-Werte je nach Rohdichte von 2,85 bis 4,75 m im trockenen Zustand und 0,95 bis 2,09m im feuchten Zustand. Entsprechend behandelte Gipsfaserplatten mit 18mm Stärke erreichen sd-Werte von 3,1m bis 4,5m (zum Beispiel „fermacell Vapor“). Wird die Luftdichtheit mittels zusätzlicher Folie im Zusammenhang mit der Innenbekleidung ausgeführt, erhöht diese den inneren Diffusionswiderstand zusätzlich.

Die äußere Unterspannbahn wird diffusionsoffen ausgeführt. Die Hinterlüftungsebene sorgt für einen zuverlässigen Abtransport der Feuchte.

Im Falle der aussteifenden Wände gilt für nachweisfreie Konstruktionen ebenfalls die Anforderung an die Diffusionsoffenheit nach außen ($sd,e \leq 0,3$ m). Anforderungen an eine zusätzliche raumseitige diffusionshemmende Schicht bestehen mit Verweis auf DIN 68800-2 nicht.

Das Modellvorhaben sieht hinsichtlich der Vermeidung von unzuträglicher Feuchte in den Außenwandkonstruktionen eine nach außen abnehmende Diffusionsdichtheit sowie eine hinterlüftete Fassade zum Schlagregenschutz vor. Der Regelaufbau entspricht dabei der nachweisfreien Konstruktion nach DIN 4108-3 Nr. 5.3.2.3 a).

Hierzu bildet die Dreischichtplatte und die Gipsfaserplatte und eine zusätzliche diffusionshemmende PE-Folie eine innenseitige diffusionshemmende Schicht mit $sd,i \geq 2,0$ m. Die nachfolgenden Dämmschichten weisen einen sd-Wert von 0,24 m auf. Eine diffusionsoffene Unterspannbahn als außenseitige diffusionsoffene Schicht weist einen $sd,e \leq 0,3$ m auf.

Sonderfall Luftdichtheitsebene kaltseitig der Tragkonstruktion

Wird eine zusätzliche Luftdichtheitsebene kaltseitig der Tragkonstruktion ausgeführt (zwischen Gefachdämmung und äußerer Dämmung, Luftdichtheitsvariante 4), entspricht die Konstruktion nicht mehr einer nachweisfreien Konstruktion nach DIN 4108-3. In diesem Fall kann die Konstruktion mittels stationärem Verfahren (Glaser) nachgewiesen werden. Der Diffusionswiderstand ist hierbei in Abhängigkeit der inneren Diffusionswiderstände und der Dämmeigenschaften der Konstruktion zu begrenzen um die Diffusion nach außen nicht zu behindern.

Bei einer raumseitigen diffusionshemmenden Beplankung mit $sd = 2,0$ m und 60mm Außendämmung WLG 035 wäre eine Luftdichtheitsebene mit ist sd-Wert von maximal 50 m im Hinblick auf den Feuchteschutz realisierbar (bei 80mm Außendämmung maximal 100m). Liegt der sd-Wert auf der Innenseite deutlich geringer, reduziert dies den maximal möglichen sd-Wert der Luftdichtheitsebene. Bei einem inneren sd-Wert von 0,5 m wäre nur noch ein sd-Wert der Luftdichtheitsebene von maximal 2m möglich (bei 80mm Außendämmung maximal 10m).

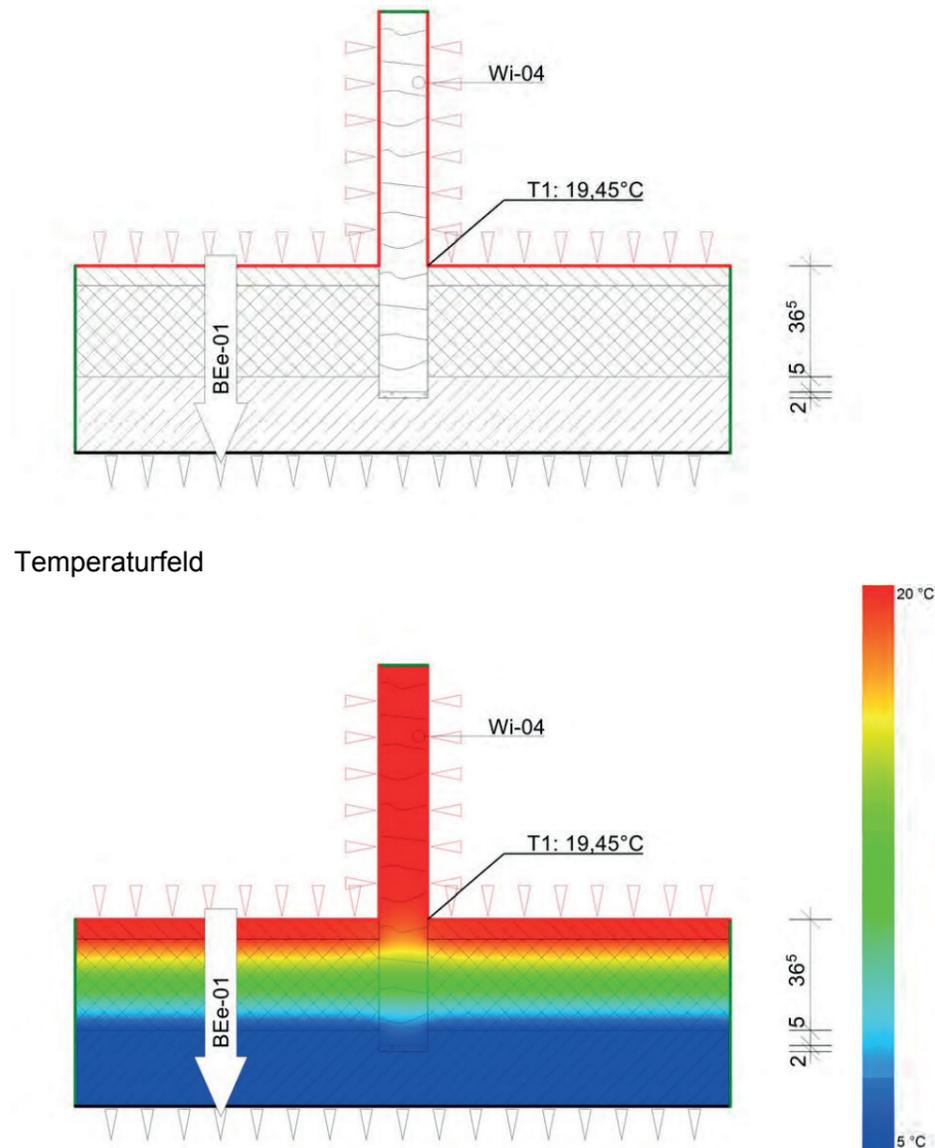
Mittels hygrothermische Simulation kann der Feuchteschutz zudem auch für weitere, feuchteadaptive Luftdichtheitsebenen nachgewiesen werden, wie in einer Variantenuntersuchung zum Modellvorhaben geschehen.

Flachdach

Im Falle des Flachdaches ist aufgrund der Flachdachabdichtung eine nach außen abnehmende Diffusionsdichtheit nicht gegeben.

Entsprechend der nachweisfreien Beispielkonstruktion nach DIN 4108-3 e) (Bild 8) wurde eine innere diffusionshemmende Schicht oberhalb der Brettstapeldecke mit einem sd-Wert ≥ 100 m in Verbindung mit einer Aufdachdämmung und einer Dachabdichtung gewählt. Zwischen innerer diffusionshemmender Schicht und Dachabdichtung sind weder Holz noch Holzwerkstoffe geplant, sodass der Feuchteschutz eingehalten ist.

Graphik 83:
Variantenuntersuchung
Feuchteschutz Bodenplatte
Quelle INA
Planungsgesellschaft.



Temperaturfeld

Bodenplatte

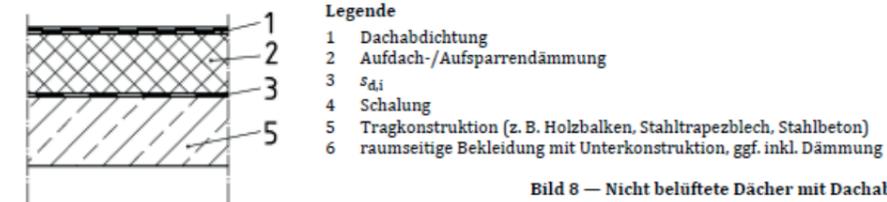
Hinsichtlich der Bodenplatte ist die Konstruktion nachweisfrei entsprechend DIN 4108-3 Nr. 5.3.2.6, sofern der Anteil der raumseitigen Schichten am Gesamtwärmedurchlasswiderstand der Bodenplatte nicht mehr als 20 % beträgt. Andernfalls ist der Nachweis mittels hygrothermischer Simulation zu führen, da das stationäre Verfahren (Glaser-Verfahren) für erdberührte Bauteile nicht anwendbar ist.

Im Modellvorhaben wurde der Feuchteschutz mittels thermischer Simulation für eine ober- und unterseitige Dämmung der Bodenplatte nachgewiesen.

Grundvoraussetzung für nachweisfreie Konstruktionen nach DIN 4108-3 ist eine luftdichte Ausführung nach DIN 4108-7 und die Einhaltung des Mindestwärmeschutzes nach DIN 4108-2.

Belange des Konstruktiven Holzschutzes sind in DIN 68800-2 geregelt.

Die Durchführung der Innenausbauarbeiten muss so aufeinander abgestimmt sein, dass keine schädliche Feuchtigkeit in der Konstruktion eingeschlossen wird. Dies muss entweder durch geeignete Maßnahmen, wie z. B. Luftentfeuchter, Heizgeräte oder durch einen zeitlich sinnvollen Ablauf der verschiedenen Gewerke sichergestellt sein.



Legende
1 Dachabdichtung
2 Aufdach-/Aufsparrendämmung
3 s_{di}
4 Schalung
5 Tragkonstruktion (z. B. Holzbalken, Stahltrapezblech, Stahlbeton)
6 raumseitige Bekleidung mit Unterkonstruktion, ggf. inkl. Dämmung

Bild 8 — Nicht belüftete Dächer mit Dachabdichtung

Graphik 84:
Prinzipskizze: Nicht belüftete
Dächer mit Dachabdichtung
Quelle INA
Planungsgesellschaft.

Schlagregenschutz

Grundsätzlich kann das Bausystem sowohl mit einer hinterlüfteten Holz- oder Metallfassade ausgeführt werden, als auch mit einem Wärmedämmverbundsystem.

Sowohl bei bauaufsichtlich zugelassenen WDV-Systemen als auch bei fachgerecht hinterlüfteten Außenwandbekleidungen sind die Anforderungen an den Schlagregenschutz für alle Schlagregenbeanspruchungsgruppen erfüllt.

Im Falle der hinterlüfteten Außenwandbekleidung ist auf eine ausreichende Hinterlüftung zu achten. Gemäß DIN 18516-1 ist diese gewährleistet, wenn die Bekleidung mit einem Abstand von mindestens 20 mm von der Außenwand angeordnet wird bzw. ein minimaler Hinterlüftungsquerschnitt von 200 cm²/m gewährleistet ist.

6.5. HERSTELLUNG UND MONTAGE

Als zusätzlicher Faktor im Zusammenwirken zwischen dem Tragwerk und den konstruktiven Maßnahmen zur Erfüllung des Brandschutzes, Schallschutzes und der Anforderungen der thermischen Bauphysik sind deren Auswirkung auf die Herstellungs- und Montageprozesse zu betrachten. Die Übertragung der Anforderungen auf die konstruktive Ausführung soll dabei ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen (notwendigem) Aufwand beziehungsweise Komplexität einerseits und praktikabler Anwendung sowie nicht zuletzt Wirtschaftlichkeit andererseits wahren. Dies zeigten beispielsweise die Entwicklungen und Versuche zur bauteilintegrierten Fügung, in denen sich die Ziele der Systementwicklung grundsätzlich erfüllen ließen, eine Umsetzung in großem Maßstab allerdings nicht realisierbar erschien.

Um einen möglichst effizienten Transfer zwischen konstruktiven Entscheidungen in der Planung und der Produktion zu erreichen, ist es notwendig, integrierte Planungsprozesse zu etablieren. Grundlage bildet dafür der verstärkte Einsatz von BIM-Planungswerkzeugen, deren Daten sich direkt in digitalisierte Fertigungs- und Montageprozesse (CNC, CAM) übertragen lassen. Daraus ergeben sich auf verschiedenen Ebenen Vorteile für die Anwendung des Bausystems.

Zunächst wird durch den Einsatz automatisierter Abbundtechnologien die hohe Maßhaltigkeit der Bauteile und Komponenten erreicht, die vor allem zur Herstellung der form- und kraftschlüssigen Tragwerksverbindungen notwendig ist. Dabei lassen sich sowohl hohe Stückzahlen gleicher Bauteile seriell produzieren als auch Abweichungen und Sonderbauteile problemlos in die Fertigung integrieren.

Im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch wird somit auch eine bedarfsgerechte Fertigung ermöglicht, bei der Herstellungs- und Bearbeitungsprozesse materialsparend optimiert werden. Gleichmaßen kann durch automatisierte Abläufe eine zeit- und kosteneffiziente Herstellung gewährleistet werden.

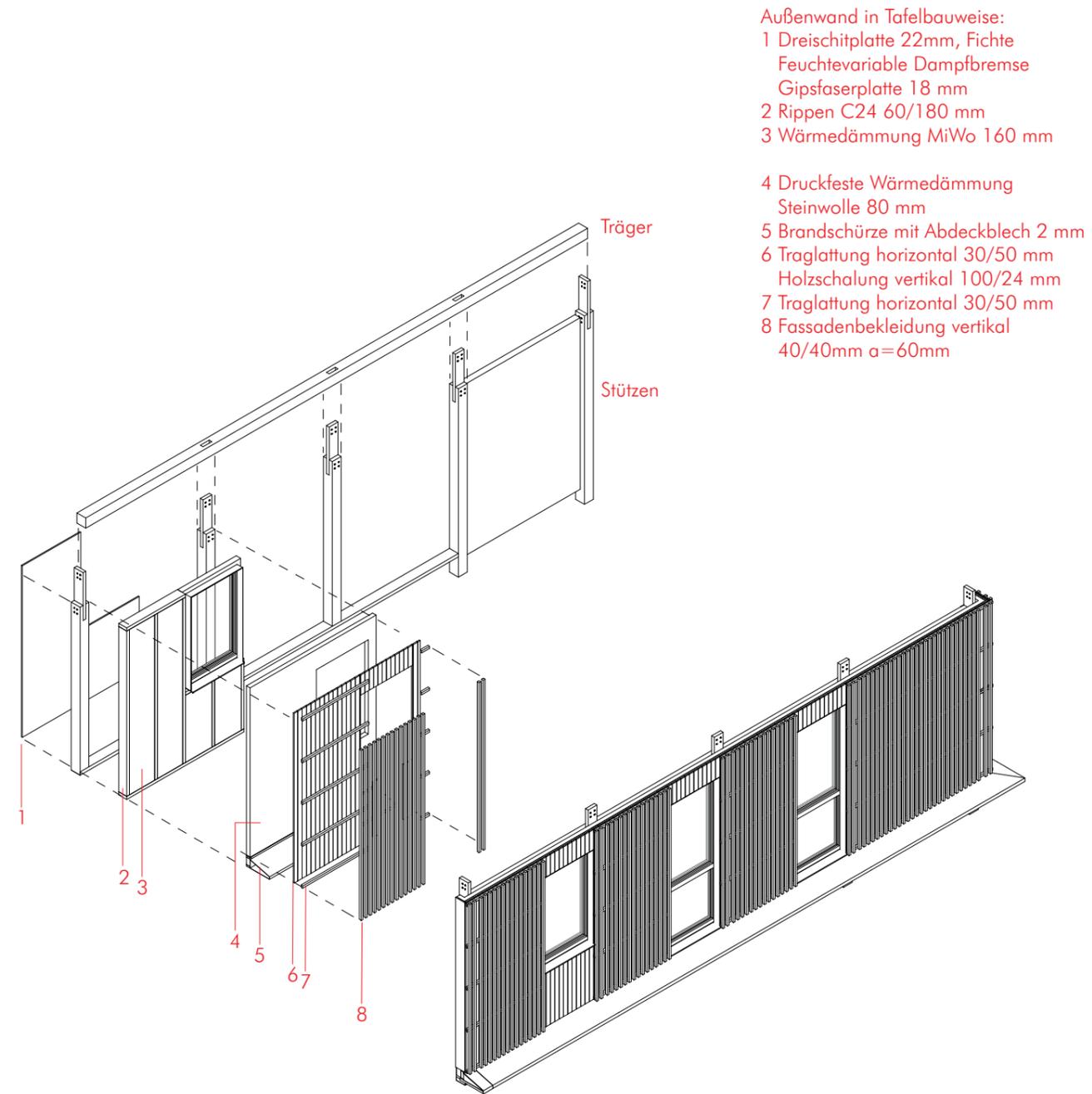
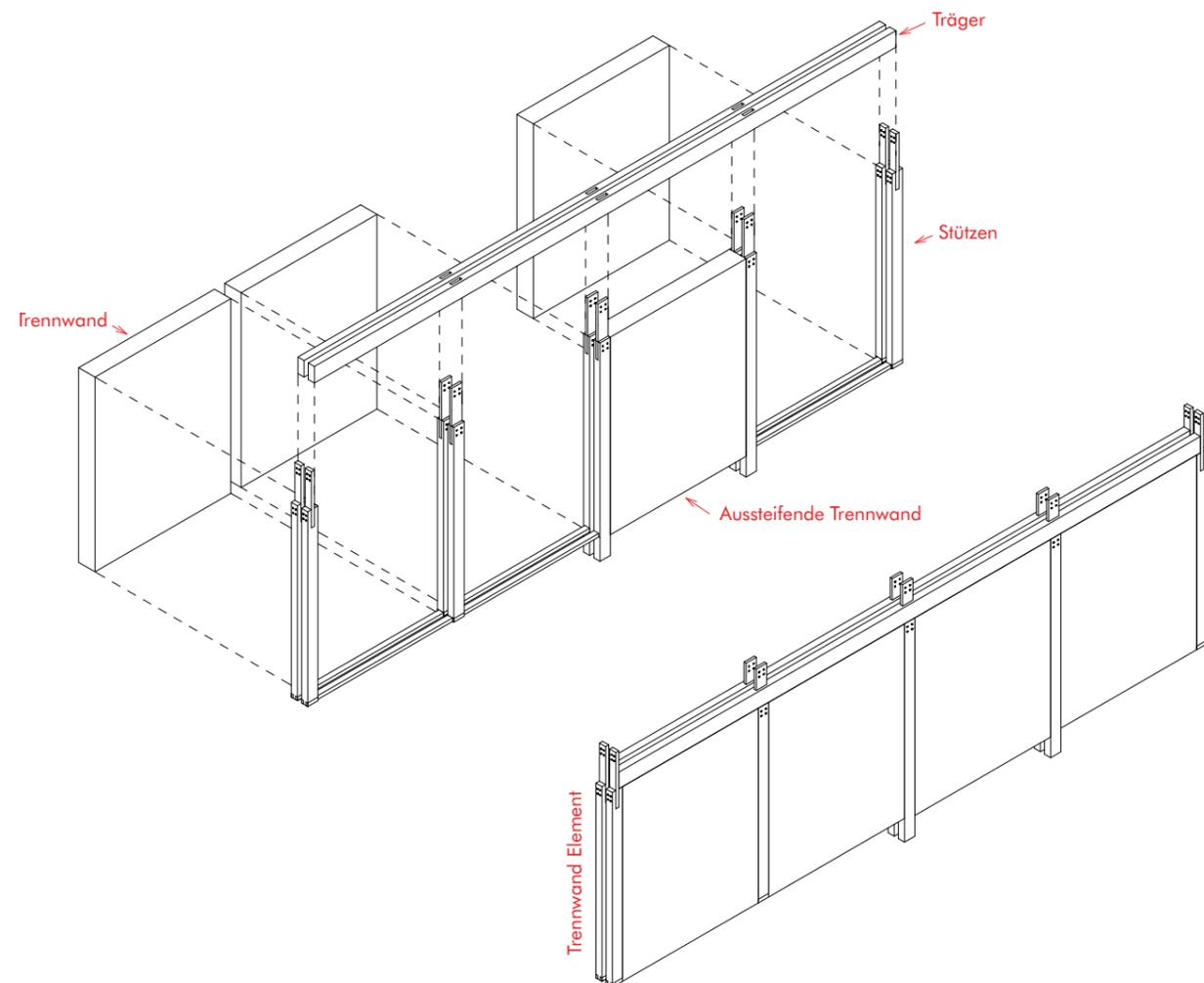
Ziel für das Bausystem ist es außerdem, einen möglichst hohen Grad der Vorfertigung zu erreichen. Es wird daher versucht, die abgebundenen Holzbaulemente bereits werkseitig mit weiteren Bauteilkomponenten und auch zu größeren Transport- und Montagemodulen zu verbinden.

Elementierung und Fertigungsmodule

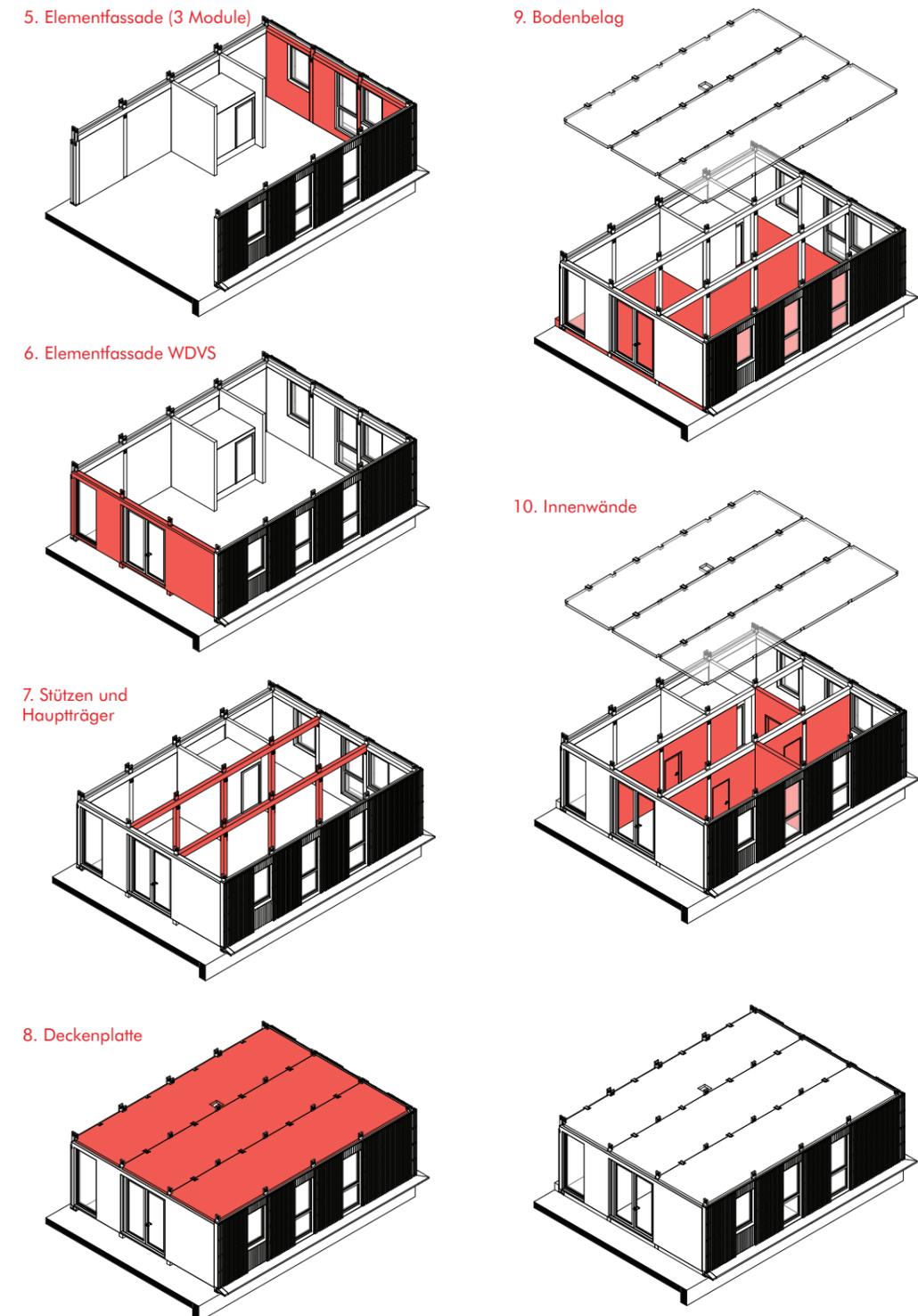
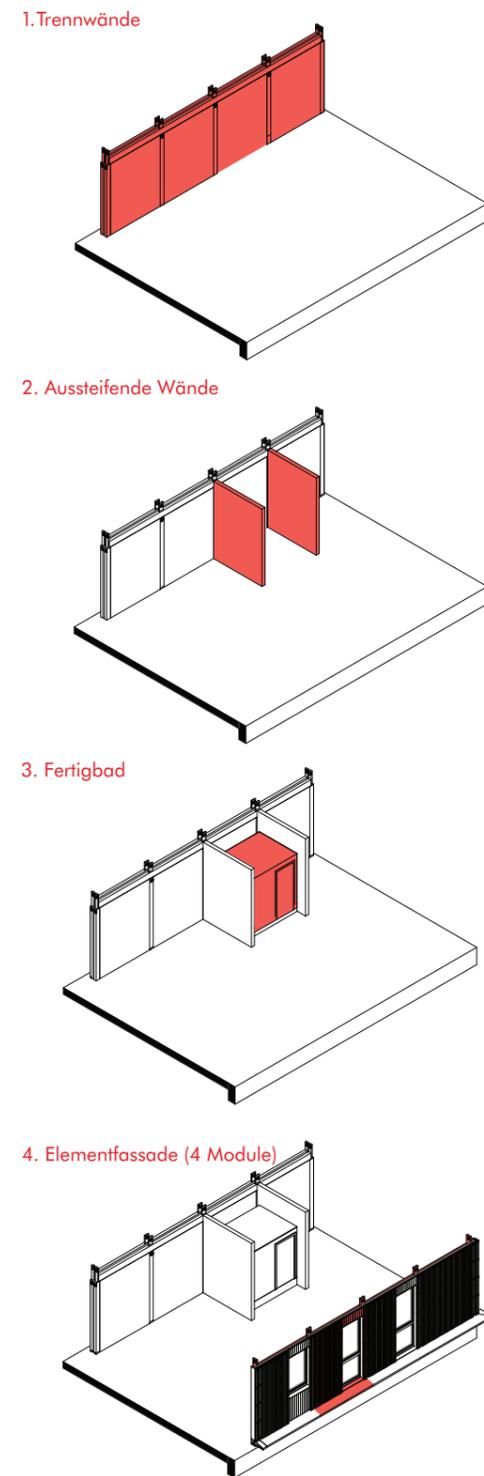
Während die konstruktive Logik des Bausystems von kleinteiligeren stabförmigen oder flächigen Elementen ausgeht, kann in der tatsächlichen Umsetzung auch mit größeren Fertigungsmodulen geplant werden. Der angestrebte hohe Vorfertigungsgrad erlaubt es, auch im Hinblick auf die Montageprozesse eine hohe Flexibilität zu erzielen. Je nach projektspezifischen Möglichkeiten oder Einschränkungen lässt sich das Bausystem in Einzelelementen vor Ort montieren oder aber in größeren Montageeinheiten bereits werkseitig vorfertigen.

Als Montageeinheiten eignen sich in erster Linie größere Wandelemente im Rahmen der möglichen Transportmaße, in denen für eine Reihe von Stützen alle Anschlüsse an Unterzüge und tragende Wandelemente hergestellt werden. Nichttragende Wandaufbauten und Fassaden können ebenso bereits integriert werden. Letztendlich entstehen mit der Tafelbauweise vergleichbare, größere Scheibenelemente, die auf der Baustelle in kurzer Zeit geschossweise montiert werden können.

Graphik 85:
Ausbildung von
Montagemodulen für massive
Wandkonstruktionen (oben)
und Außenwandaufbauten
in Tafelbauweise (unten) im
Modellvorhaben ‚Collegium
Academicum‘.



Graphik 86:
Montageprozess der
Vorfertigungsmodule im
Modellvorhaben ‚Collegium
Academicum‘.



Montageprozess

Ein exemplarischer Ablauf eines Montageprozesses am Beispiel des Modellvorhabens ‚Collegium Academicum‘ wird in den oben gezeigten Abbildungen dargestellt. Als aussteifende Elemente werden zunächst die Wohnungstrennwand und massive Wandelemente um den Installationskern, in den ein Fertigbad eingesetzt wird, errichtet. Module für die Außenwände können danach einzeln je Rasterfeld oder als rasterübergreifende Einheiten montiert werden. Die innenliegende Skelettstruktur wird anschließend aus Einzelteilen aufgebaut, um die spätere Flexibilität im Ausbau zu gewährleisten.

Die Deckenplatten aus Brettspertholz werden im nächsten Schritt auf der Tragstruktur angebracht und untereinander schubsteif verbunden. Decken und Böden stellen dabei eine Einschränkung für die Vorfertigung dar, da derzeit keine Möglichkeit besteht, die komplexen Schichtaufbauten in funktionalen bzw. praktikablen Modulen zusammenzufassen. Schüttung, Installation, Estrich und Belag können erst auf der Baustelle eingebracht werden. Abschließend folgt darauf der innere Ausbau der Trennwände.

Erprobung der Montage im Teststand

Die Planung des Studierendenwohnheims ‚Collegium Academicum‘ beinhaltet als zusätzlichen Schwerpunkt die Entwicklung flexibler Wohnungsgrundrisse, die durch die BewohnerInnen in Eigenleistung hergestellt werden und immer wieder neu konfiguriert sein sollen. Das Gebäude soll dadurch ermöglichen, jederzeit auf wechselnde Wünsche und Anforderungen reagieren zu können und somit auch für Nutzungen, die über das Studierendenwohnen hinaus entstehen, eine nachhaltige, wandelbare Grundstruktur anzubieten.

In der Forschung galt es demnach zu betrachten, welche Ausbauschritte des Bausystems im Selbstbau möglich sind und inwiefern bestimmte Konstruktionen eine flexible Grundrissgestaltung durch die BewohnerInnen zulassen. Die Innenwandaufbauten im Teststand wurden daher zu großen Teilen von an der Planung beteiligten Studierenden des ‚Collegium Academicum‘ durchgeführt.

Das entwickelte Bausystem ist durch seine Skelettbauweise auf eine möglichst flexible Grundrissgestaltung ausgelegt. Gesammelte Erkenntnisse aus dem Modellprojekt lassen sich daher auch in die weiteren Entwicklungen und Anwendung einbeziehen. Mit dem Sonderthema des Selbstbaus werden zudem Potentiale ermittelt, wie alternative und wandelbare Wohnformen auch in der Planung weiterer Projekte umgesetzt werden können.

Zielstellung im Teststand

Während der Auf- und Einbauprozesse ließ sich die Eignung anhand verschiedener Kriterien beurteilen. Hinsichtlich des Selbstbaus stellten sich die Komplexität der Grundkonstruktion, der Be- und Verarbeitungsaufwand der eingesetzten Materialien und Bauteile, der Umgang mit den notwendigen Werkzeugen sowie der abschließende Einbauaufwand als entscheidend heraus. Für die Flexibilität kommt darüber hinaus die Möglichkeit eines zerstörungs- und abfallfreien Rückbaus, Gewicht und Handhabbarkeit der Gesamtkonstruktion und der daraus resultierende, für den Umbau notwendige Aufwand zum Tragen.

Beschreibung der Aufbauprozesse

Es wurde mit den teilnehmenden Studierenden versucht, die Aufbauprozesse gleich weitestgehend eigenständig durchzuführen. Für Nachfragen und Hilfestellungen standen dabei begleitend Fachkräfte zur Verfügung.

Bei den geplanten Wandaufbauten mussten aufgrund von Abweichungen zwischen der Planung und Ausführung des Teststands zusätzliche Nachbesserungsarbeiten verrichtet werden. Die angegebenen effektiven Arbeitszeiten für die Aufbauprozesse wurden daher aus der begleitenden Bildokumentation überschlägig ermittelt.

Zweischalige Trennwand mit geteiltem Ständerwerk TW05

Das Ständerwerk wurde liegend verschraubt und danach in der Einbauposition platziert und seitlich an den Stützen fixiert. Dabei ist auf die Einhaltung der seitlichen Toleranzabstände sowie den Abstand zwischen den Ständerlagen zu achten. Nach einseitiger Beplankung mit Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) wurden die Zwischenräume des Ständerwerks mit Mineralwolle ausgedämmt und die Wand mit der zweiten GKF-Schicht verschlossen. Die Stoßfugen der Beplankung müssen verspachtelt werden, was eine längere Wartezeit zum Aushärten der Spachtelmasse nach sich zieht. Erst danach konnte die abschließende Beplankung mit Dreischichtplatten (DSP) angebracht werden.

Abbildung 33:
Herstellung des Ständerwerks
für die zweischalige
Innenwand TW05
Foto: Carina Bauer.



Die Ständerkonstruktionen konnten auch ohne besondere Vorkenntnisse sehr schnell in jeweils etwa 10-15 Minuten hergestellt werden. Für die Beplankung mit Gipskartonplatten sowie das Ausdämmen der Wand wurden jeweils 45 Minuten benötigt. Vor allem vermeintliche Zwischenschritte wie das Platzieren und Fixieren zwischen den Stützen oder die Dämmung und Abdichtung der Randfugen stellten sich als erheblich zeitaufwendiger heraus.

Überschlägig lässt sich daher für den Aufbau der Trennwand TW05 eine effektive Montage- und Einbauzeit von ca. 3,5 Stunden annehmen.

In weiteren Ertüchtigungsschritten erfolgte der Einbau einer Tür sowie einer Lüftungsöffnung mit einem schalldämmenden Überströmelement.



Abbildung 34:
Aufbauschritte zweischalige
Ständerwand TW05.
Fotos: DGJ Architektur,
04.04.2019.

Zweischalige Trennwand TW03

Abbildung 35:
Montage der Beplankung an
Ständerwänden.
Foto: Carina Bauer.



Bei der Trennwand TW03 müssen grundsätzlich die gleichen Arbeitsschritte wie bei der Trennwand TW05 durchgeführt werden. Ein geringerer Aufwand besteht nur bei der Ständerkonstruktion, welche jedoch zeitlich kaum ins Gewicht fällt. Zu berücksichtigen ist der zusätzlich ausgeführte und von den Studierenden begleitete Türeinbau, der ohne Vorkenntnisse als schwer ausführbar empfunden wurde und durch das Ausschäumen der Türrahmen mehr Zeit benötigt. Daher ist mit einer effektiven Montage- und Einbauzeit von mindestens 4 Stunden zu rechnen.



Abbildung 36:
Aufbau der zweischalige
Ständerwand TW03.
Fotos: DGJ Architektur, ..

Abbildung 37:
Einsetzen der
Schiebewandelemente.
Foto: Carina Bauer.

Schiebewand TW01 und TW01.1



Das Schiebewandsystem wurde mit dem Ansatz konzipiert, aus wenigen Materialien einen sowohl im Aufbau einfachen, als auch in der Anwendung flexiblen Raumabschluss anzubieten. Die Konstruktion beschränkt sich auf einen Rahmen mit ausgefrästen Fugen, in die zwei oder vier Schiebeelemente nach Bedarf eingestellt werden können. Die notwendigen Arbeitsschritte umfassen zunächst das Verschrauben und Befestigen des Rahmens sowie das Einkleben von Filzstreifen in die vorgefertigten Nuten zur Verbesserung der schalltechnischen Abdichtung. Die Wandplatten müssen mit Griffleisten versehen werden und sollen daraufhin nur noch in den Rahmen eingesetzt werden.

Aufgrund einer von der Planung abweichenden Ausführung der Rahmenhölzer musste die Herstellung der Schiebewand teilweise in abgewandelten Arbeitsschritten erfolgen. Das Einsetzen der Wandplatten war in den komplett montierten Rahmen nicht möglich. Daraus ergab sich eine erheblich längere Arbeitszeit als erwartet. Weitere Probleme, die während des Aufbauprozesses deutlich wurden, bestanden bei der Gleitfähigkeit der Wände, da die verwendeten Dreischichtplatten aufgrund von Durchbiegung und Gewicht in den Nuten verkeilten und sich nur schwer bewegen ließen.

Der im Teststand ausgeführte Montageablauf ergab daher keine aussagekräftigen Erkenntnisse bezüglich des Zeitaufwands. Nach einer Optimierung des Systems und einer plangerechten Ausführung sollte überschlägig mit einer Zeit von ca. 2,5 Stunden gerechnet werden.



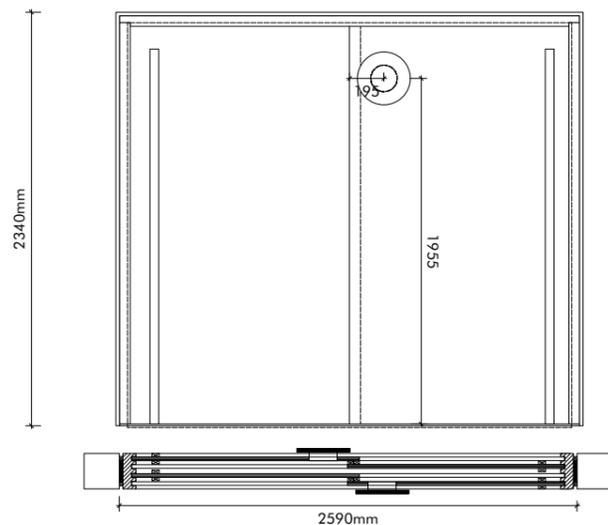
Abbildung 38:
Aufbau der einfachen
Schiebewand TW01
Fotos: DGJ Architektur,
08.04.2019.

Dennoch wurde das Schiebewandsystem als bevorzugter Aufbau der flexiblen Trennwände zwischen Individual- und Gemeinschaftsräumen in den Wohnungen des Modellvorhabens ausgewählt. Zum einen begründete sich dies durch die vergleichsweise einfache Konstruktion, die aus wenigen vorgefertigten Elementen – zwei Ständer, Rähm und Schwelle für den Rahmen und vier Platten als Schiebeelemente – ohne den Einsatz zusätzlicher Baustoffe (v.a. Dämmstoffe) und Bauteilschichten besteht. Zum anderen ließ sich dadurch eine im Vergleich zur Regalwand bessere Handhabbarkeit durch geringeres Eigengewicht und einen einfacheren Ausbau feststellen.

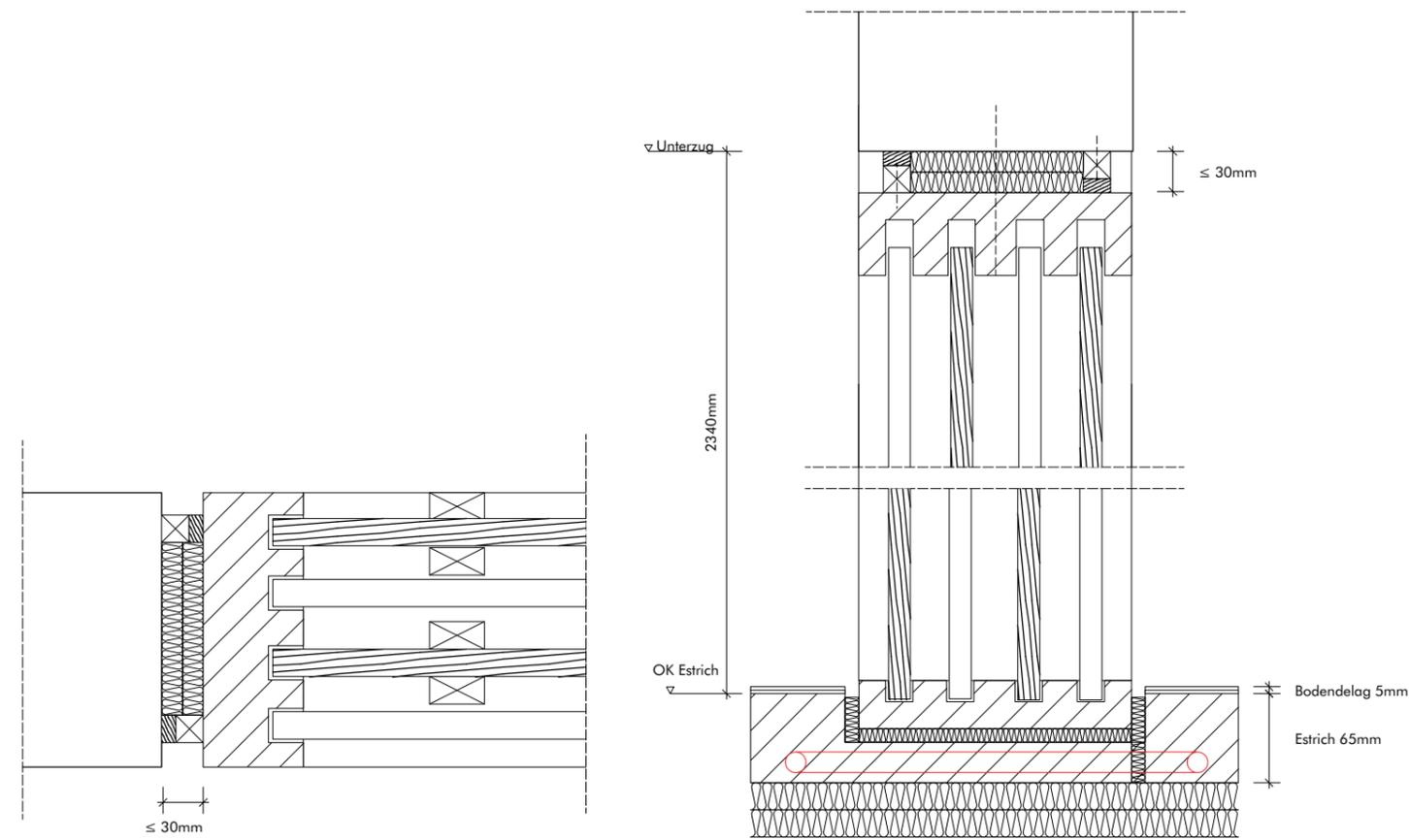
Die Schwierigkeiten im Teststand ergaben sich aus der materiellen Ausführung (Dreischichtplatte, Filzabdichtung in den Führungsfugen) beziehungsweise auch aus Konstruktions- und Planungsfehlern am Teststand. Dadurch konnte festgestellt werden, welche Optimierungen in der Entwicklung vorzusehen waren. Darauf aufbauend wurden verbesserte Detaillösungen entwickelt und in einem weiteren Testaufbau der Schiebewand erprobt.

Hinsichtlich der Barrierefreiheit wurden die Dimensionen der Schiebewand angepasst, sodass die Ausführung einer bodengleichen Schwelle sowie eine ausreichende Öffnungsbreite gewährleistet werden kann. Damit einhergehend musste für den Bodenanschluss ein entsprechendes Detail entwickelt werden, um die Schwelle in den Bodenaufbau zu integrieren. Ebenfalls wurden für die Abdichtung der oberen und seitlichen Anschlüsse an Stützen und Unterzüge versucht, eine praktikablere Lösung zu finden. Dazu wurde die Ausbildung einer breiteren Anschlussfuge in Erwägung gezogen, in die versetzt an Rähm und Unterzug angebrachte Abdeckleisten angebracht werden. Die verbleibenden aus Einbautoleranzen entstehenden Fugen werden mit dauerelastischen Dichtungsbändern verschlossen. Da die seitlichen Ständer und das Rähm losgelöst von der Schwelle ein- und ausgebaut werden können, können sie ohne Schwierigkeiten in Position gebracht und dann mit der Schwelle verbunden werden.

Graphik 87: Bodengleiche Ausführung der Schiebewand (mit Überströmelement).



Zur Verbesserung der Gleitfähigkeit und allgemeinen Handhabbarkeit der Schiebeelemente wurden im Testaufbau verschiedene Materialien der Wandelemente eingesetzt sowie Ausführungsvarianten der Führungsfugen hergestellt. Die eingesetzten Plattenwerkstoffe (Tischlerplatten, Pressspanplatten) wurden in Hinblick auf eine möglichst geringe Verformung und des Eigengewichts gewählt. In den Fugen wurden verschiedene Auflagelösungen für die Schiebeelemente sowie Varianten der Abdichtung bzw. Reduzierung des Luftstroms getestet.



Als praktikabelste Lösung wurde eine beschichtete Pressspanplatte gewählt, die an der Unterkante mit einem Umleimer aus Kunststoff zur Verbesserung der Gleitfähigkeit versehen wird. In der Fuge wird ein schmaler Steg ausgebildet, um die Auflage- und Reibungsfläche der Schiebewand zu reduzieren. Die Luftdurchlässigkeit wird durch seitlich eingebrachte „Bürsten“ vermindert (Abbildung 42).

Graphik 88: Optimierte Anschlusslösung der flexiblen Schiebewand.

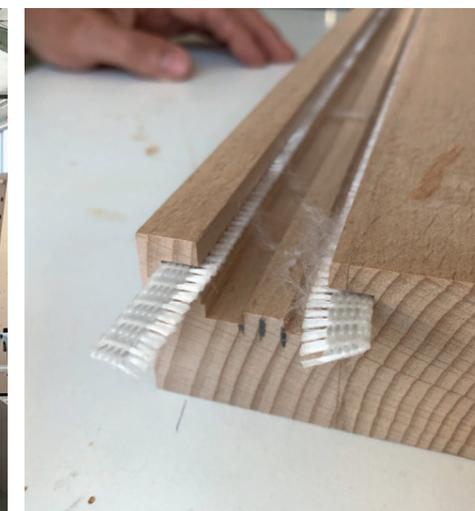


Abbildung 39: Testaufbau der Schiebewand mit verschiedenen Materialoptionen.

Abbildung 40: Optimierung der Führungsfugen in der Schiebewandswelle.

Regalwand TW02, TW02.1 und TW02.2

Abbildung 41:
Aufbau der Regalwände.
Foto: Carina Bauer.



Zunächst wurde die Grundkonstruktion in einem Stecksystem aus vorgefertigten Regalbrettern hergestellt. Nach dem Fixieren in der Einbauposition kann einseitige Beplankung angebracht und der Türrahmen eingesetzt werden. Für die offene Regalwand sind danach keine weiteren Schritte mehr notwendig. So lässt sich vor allem die Montage der Grundkonstruktion in kurzer Zeit abschließen. Zusätzlicher hoher Zeitaufwand entsteht allerdings erneut durch den Einbau der Tür und die Dämmung und Abdichtung der Fugen.

Für die offene Regalwand kann daher mit einer effektiven Montage- und Einbauzeit von ca. 3 Stunden gerechnet werden.

Die Ertüchtigung mit Mineralwolle nahm mit circa 30 Minuten ebenfalls wenig Zeit in Anspruch, da der Dämmstoff schon vor Fertigstellung der Wand genau auf die Maße der Regalfächer zugeschnitten werden konnte und die Beplankung ebenfalls vorgefertigt zur Verfügung stand. Im Gegensatz dazu gestaltete sich die Ertüchtigung mit Sandsäcken umso aufwendiger. Das Ausfüllen der Regalfächer dauerte zunächst etwa eine Stunde, um die Wandplatten aufzubringen mussten allerdings für eine weitere Stunde Unebenheiten und Ausbeulungen der Sandsäcke beseitigt sowie größere Lücken mit Mineralwolle ausgefüllt werden.



Abbildung 42:
Aufbauschritte der Regalwand
TW02 im Zeitablauf,
Aufbauzeit im Versuch von
14:27 Uhr bis ca. 19:30
Uhr bis zur kompletten
Fertigstellung im Eigenbau.
Fotos: DGJ Architektur,
09.04.2019.

Abbildung 43:
Ertüchtigung Regalwand
TW02.1 mit Sandsäcken.
Fotos: DGJ Architektur,
09.04.2019.

Abbildung 44:
Ertüchtigung Regalwand
TW02.2 mit Mineralwolle.
Fotos: DGJ Architektur,
09.04.2019.

Bewertung Selbstbau und Flexibilität

Die Bewertung des Selbstbaus der verschiedenen Trennwandkonstruktionen muss nach den Erkenntnissen im Teststand zwischen der Herstellung der Grundkonstruktion und dem Einbauaufwand unterscheiden. Für die offene Regalwand und das Schiebewandsystem gilt, dass sich die Grundkonstruktion in einem Stück außerhalb der Einbauposition weitestgehend problemlos herstellen lassen. Die Ständerwandkonstruktionen müssen hingegen schrittweise in der Einbauposition aufgebaut werden.

Während die Herstellung einzelner Bauteile, die einzelnen Arbeitsschritte sowie der Umgang mit verwendeten Werkzeugen und Materialien von den beteiligten Studierenden grundsätzlich als verständlich und in Eigenleistung gut durchführbar empfunden wurden, erforderten die Montage in der Einbauposition und die Ertüchtigungen teilweise zusätzliche Erläuterung und Einweisung oder stellten sich als sehr kraft- und zeitaufwendig dar. Ohne eine genaue Anleitung gestalteten sich vor allem die Ausführung der Anschlussdetails und die Türeingbauten als nicht vollständig in Eigenleistung umsetzbar oder praktikabel. Die Dämmung und Abdichtung der Anschlüsse erfolgte zudem unter Einsatz selbstklebender dauerelastischer Dichtungsbänder sowie teils provisorisch eingepasster oder vorgesetzter Holzleisten und entsprach demnach nicht dem Anspruch, ein unkompliziertes und wiederholt ausführbares Detail anzubieten.

Die Ausführung der Anschlüsse stellt auch für die Flexibilität einen entscheidenden Faktor dar. Der erhöhte Arbeitsaufwand sowie der Einsatz nicht wiederverwendbarer Materialien schränkt die Flexibilität in hohem Maße ein. Die vor allem bei Regal- und Schiebewand guten Voraussetzung für den Selbstbau und eine flexible Anwendung kamen daher kaum zum Tragen. Im Laufe der Versuchsaufbauten offenbarte sich für die Anschlussdetails daher ein akuter Entwicklungsbedarf.

Des Weiteren sind die Handhabbarkeit und Praktikabilität der Wandsysteme zu betrachten. Die Grundstrukturen oder Ertüchtigungsstufen haben fast alle ein hohes Eigengewicht und konnten nur mit entsprechendem Kraftaufwand bewegt werden. Eine Ausnahme bildet das Schiebewandsystem, bei dem sich Rahmen und Wandelemente leicht einzeln versetzen lassen sollen. Allerdings konnte dies im Teststand aufgrund der beschriebenen Ausführungsfehler nicht erprobt werden. Bei allen Aufbauten mit vorgeschraubter Beplankung muss diese für den Ausbau entfernt werden. Die Ständerwände mussten sogar komplett zurückgebaut werden, um sie an anderer Stelle wieder einsetzen zu können. Zudem sind einige Materialien nicht schadensfrei wiederverwertbar und es ist bei jedem Umbau mit Materialverschleiß zu rechnen.

Es ließ sich anhand der Aufbauten im Teststand festhalten, dass sich die Montage der Innenwände grundsätzlich im Selbstbau umsetzen lässt. Dafür erscheint es aber notwendig, eine genaue Beschreibung der Bauabläufe und

der einzelnen Arbeitsschritte zu erarbeiten und kritische Detailpunkte mit Blick auf ihre Praktikabilität weiterzuentwickeln. Dies ist auch Voraussetzung für die Gewährleistung flexibler Raumgestaltung durch die NutzerInnen.

Das Modellvorhaben wurde in einem mehrjährigen, partizipativen Entwurfs- und Bauprozess mit der Projektgruppe und zukünftigen Bewohnenden entwickelt, in dem eine völlig neue Wohnform entstand, die eine flexible Anpassung der Wohnungen ermöglicht. Das Gebäude wurde dadurch zum Labor, in dem Bewohnende Raumbedarf, Nutzung und räumliche Konfiguration der Wohnungen zwischen Individual- und Gemeinschaftsflächen rekonfigurieren und verhandeln können.

In diesem speziellen Anwendungsfall bestand auch die Möglichkeit, dass das Gebäude im Betrieb umgebaut und angepasst werden kann. Zum einen sind die technischen Voraussetzungen durch eine eigene Werkstatt mit großer CNC-Fräse gegeben. Zum anderen lebt das Projekt von dem außergewöhnlichen Engagement der Projektgruppe und der Bewohnenden, die ihre Studierendenwohnheim selbst verwalten und die auch zukünftige Bewohnende in den Erhalt und Betrieb des Gebäudes einbinden werden. Mit dieser Form der Weitergabe von Wissen und Kompetenz als einer Art „Alltagsverstand“ des handwerklichen Bauens knüpft das ‚Collegium Academicum‘ im Prinzip an historische Handwerkstraditionen an, wie sie im Kapitel 4 „Referenzen“ beschrieben wurden.



Abbildung 45:
Werkstatt für Eigenleistungen;
Foto: Collegium Academicum.

Montage Auswände in chronologischer Reihenfolge / Übersicht

Abbildung 46:
Montagebeginn.



Abbildung 47:
Aufstellung Außenwand 1.



Abbildung 48:
Aufstellung Außenwand 2.



Abbildung 49:
Aufstellung Außenwand 3.



Abbildung 50:
Montage innenliegende Trennwand.



Montage Innenkonstruktion in chronologischer Reihenfolge / Übersicht



Abbildung 51:
Stützen.

Abbildung 52:
Hauptträger.

Abbildung 53:
Aussteifende Innenwände.
Abbildung 54:
Decken.

Abbildung 55:
Bad / Nasszelle..

Abbildung 56:
Deckenträger.

Montage der Außenwände im Detail

Abbildung 57:
Beginn der Montage einer
Außenwand. Foto: DGJ
Architektur.



Abbildung 58:
Abbildung 59:
Montage eines
Fassadenelement.



Abbildung 60:
Links: Nut eines
Fassadenpfostens.
Rechts: Aufnehmende Ebene
im Geschossboden.



Abbildung 61:
Fügung der Fassadenteile.

Aufstellen der Stützen im Detail

Abbildung 62:
Montageprozess
Wandelemente beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur,



Abbildung 63:
Montageprozess
Wandelemente beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur,

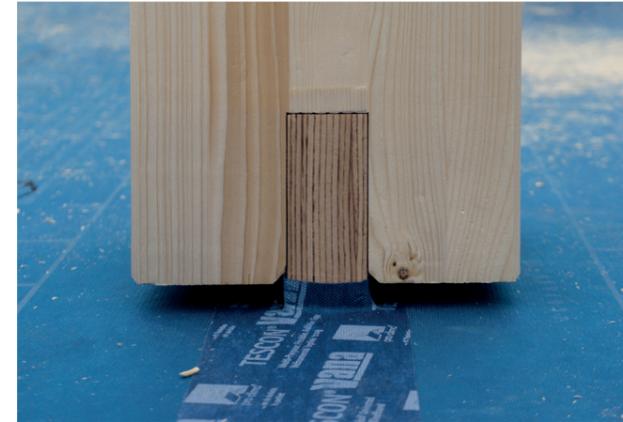


Abbildung 64:
Montageprozess Stützen beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur,



Abbildung 65:
Befestigung Stützen mit
Schallentkoppelung beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur,

Hauptträger - Details der Montage

Abbildung 66:
Montageprozess Unterzüge
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur,



Abbildung 67:
Detail einer
Holzbalkenmontage mit
Fügung.
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 68:
Montageprozess Unterzüge
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 69:
Montageprozess Unterzüge
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.

Aussteifende Innenwände - Details der Montage

Abbildung 70:
Montageprozess aussteifende
Innenwände beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 71:
Montageprozess aussteifende
Innenwände beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 72:
Montageprozess aussteifende
Innenwände beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 73:
Montageprozess aussteifende
Innenwände beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.

Deckenträger - Details der Montage

Abbildung 74:
Montageprozess Deckenträger
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 75:
Montageprozess Deckenträger
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 76:
Montageprozess Deckenträger
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 77:
Montageprozess Deckenträger
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 78:
Montageprozess Deckenträger
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.

Bad: Montage der Nasszelle im Detail

Abbildung 79:
Montageprozess Nasszellen
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 80:
Montageprozess Nasszellen
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 81:
Montageprozess Nasszellen
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 82:
Montageprozess Nasszellen
beim Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.

Abbildung 83:
Montageprozess
Deckenelemente beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.

Decken - Details der Montage



Abbildung 84:
Montageprozess
Deckenelemente beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 85:
Montageprozess
Deckenelemente beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 86:
Montageprozess
Deckenelemente beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.



Abbildung 87:
Montageprozess
Deckenelemente beim
Modellvorhaben
Fotos: DGJ Architektur.

In den Explorationen aus vorangegangenen Forschungsprojekten wurden insgesamt 12 Fallstudien von DGJ Architektur betrachtet, bei denen das Bausystem angewandt wurde, teils ausschließlich in der Planung, teils zusätzlich in tatsächlichen Projekten. Die Fallstudien aus diesen vorherigen Forschungen fallen in drei Kategorien:

Bauprojekte

Das Bausystem wird im Rahmen des Entwurfs zweier Modellvorhaben entwickelt, für die gerade die Planung beginnt und die bis 2022 umgesetzt werden. Der klare Anwendungsbezug des Bausystems erlaubt, die theoretischen Überlegungen mit Erkenntnissen aus der Praxis zu validieren.

- ‚Case Study 1: dgj223 IBA Heidelberg‘
- ‚Case Study 2: dgj228 Wohngruppe Gemeinsam Suffizient Leben‘ Frankfurt
- ‚Case Study 10.1 und 10.2: dgj253 Wohngruppe Mannheim‘

Bauprojekte, bei denen die Ausführungsplanung nicht bei DGJ liegt

- ‚Case Study 6.1: dgj205 Reichenbach RH‘
- ‚Case Study 6.2: dgj205 Reichenbach EFH‘

Theoretische, freie Arbeiten

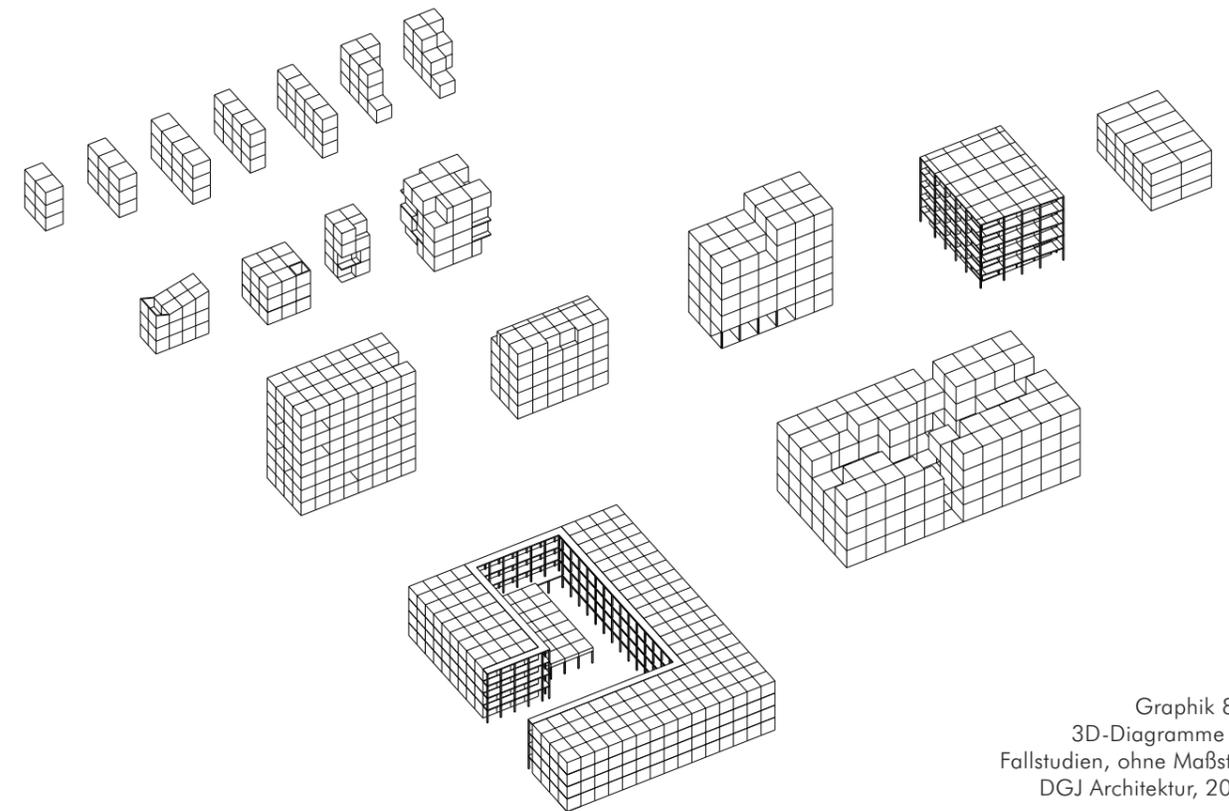
- ‚Case Study 3: dgj219 Arrival City 4.0‘
- ‚Case Study 5: dgj244 Greenhouse‘
- ‚Case Study 7: dgj243 Wohncluster Merianstraße‘

Wettbewerbsbeiträge

- ‚Case Study 4: dgj236 Studierenden-Wohnheim Weimar‘
- ‚Case Study 8: dgj229 Konstanz TYP MFH‘
- ‚Case Study 9: dgj229 Konstanz TYP Minihaus‘
- ‚Case Study 11: dgj251 KOWO Erfurt‘
- ‚Case Study 12.1 - 12.3: dgj241 Prefab MAX Reihenhaus‘

Für die vorliegende Forschungsarbeit werden nur die Fallstudien vorgestellt, die in die Kategorie „Bauprojekte“ fallen, weil hier die Planung in einer ausreichenden Detailtiefe vorliegt, um die hier forschungsrelevanten Fragen zu diskutieren.

Zur Erläuterung und den Ergebnissen der anderen Fallstudien wird auf die Buchpublikation „Open Architecture“, Jovis Verlag, Berlin 2020, verwiesen.



Graphik 89:
3D-Diagramme der
Fallstudien, ohne Maßstab,
DGJ Architektur, 2019.

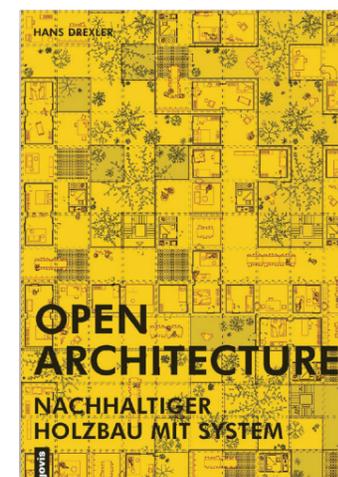


Abbildung 88:
Open Architecture -
Nachhaltiger Holzbau mit
System, Hans Drexler, Jovis
Berlin, 2020.

7.1. CASE STUDY 1: DGJ223 IBA HEIDELBERG

Abbildung 89:
Case Study 1:
dgj223 IBA Heidelberg,
2015-2020, Modell 1/50,
Quelle:
DGJ Architektur, 2017.
Foto: Hans Drexler, 2018.



Die Projektgruppe des ‚Collegium Academicum‘ plante seit mehreren Jahren die Gründung einer selbstverwalteten Bildungs- und Kultureinrichtung und eines selbstverwalteten Studierendenwohnheims in Heidelberg. Die Collegium Academicum GmbH ist aus dem Förderverein Collegium Academicum Heidelberg e.V. und einer studentischen Initiative entstanden. Im Rahmen der Internationalen Bauausstellung (IBA) Heidelberg entwickelte DGJ Architektur für und mit dem ‚Collegium Academicum‘ die nachfolgend vorgestellte interaktive Wohnform. Der Neubau des ‚Collegium Academicum‘ bietet 176 Wohnheimplätze mit insgesamt 46 Wohngemeinschaften.

Ergänzt wird das Wohnen durch die geplante Gemeinschaftsfläche, die den BewohnerInnen sowie anderen StadtbewohnerInnen Raum gibt, sich zu begegnen, Ideen auszutauschen und Initiativen zu starten.

Entwurfskonzept

Der Entwurf ist maßgeblich geprägt von der Absicht, eine Vielzahl von unterschiedlichen Wohnformen und Lebensmodellen innerhalb des Gebäudes umsetzen zu können. Als Teil des Programms von Modellvorhaben Variowohnungen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) war es die Absicht der Fördermittelgeberin und der Bauherren, ein Gebäude zu planen, das heute als studentisches Wohnen genutzt werden kann, perspektivisch zu einem späteren Zeitpunkt aber auch als altersgerechtes Wohnen genutzt oder umgebaut werden kann. Beide Anforderungen führten dazu, dass das Gebäude mit flexiblen Grundrissen entwickelt wurden, die sich im laufenden Betrieb umbauen lassen.



Abbildung 90:
Leitbild des Modellprojekts
dgj223 Collegium
Academicum:
Veranschaulichung der
flexiblen Grundrisse,
Quelle:
DGJ Architektur, 2017.
Foto: Hans Drexler, 2018.

7.1.2 Tragwerk und Konstruktion

Das Tragwerk ist eine Hybridkonstruktion aus einem Skelettbau mit aussteifenden Wandscheiben um die Sanitärkerne. Auch Teile der Außenwände und ein Teil der Wohnungstrennwand haben aussteifende Funktion. Die Wohnungen sollen später verbunden werden können, weswegen die Wohnungstrennwände nur in Teilen für das Tragwerk angesetzt wurden und in anderen Teilen ausgebaut werden können. Der Laubengang und die außenliegenden Treppen sind aufgrund des Brandschutzkonzepts aus nichtbrennbarem Material in Stahlbeton konstruiert. Diese Bauteile sind jedoch konstruktiv nicht mit dem Holzbau gekoppelt.



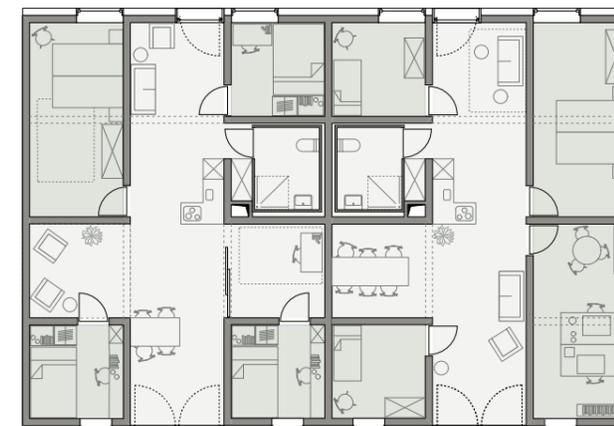
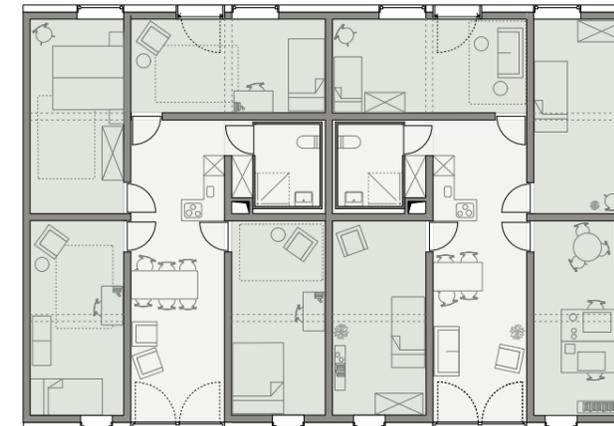
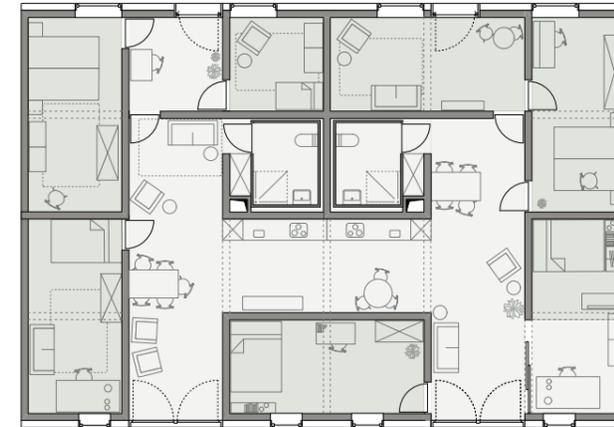
Abbildung 91:
Vorangehende Doppelseite:
Östliche Fassade des
Collegium Academicum.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.

Nutzung und Adaptabilität

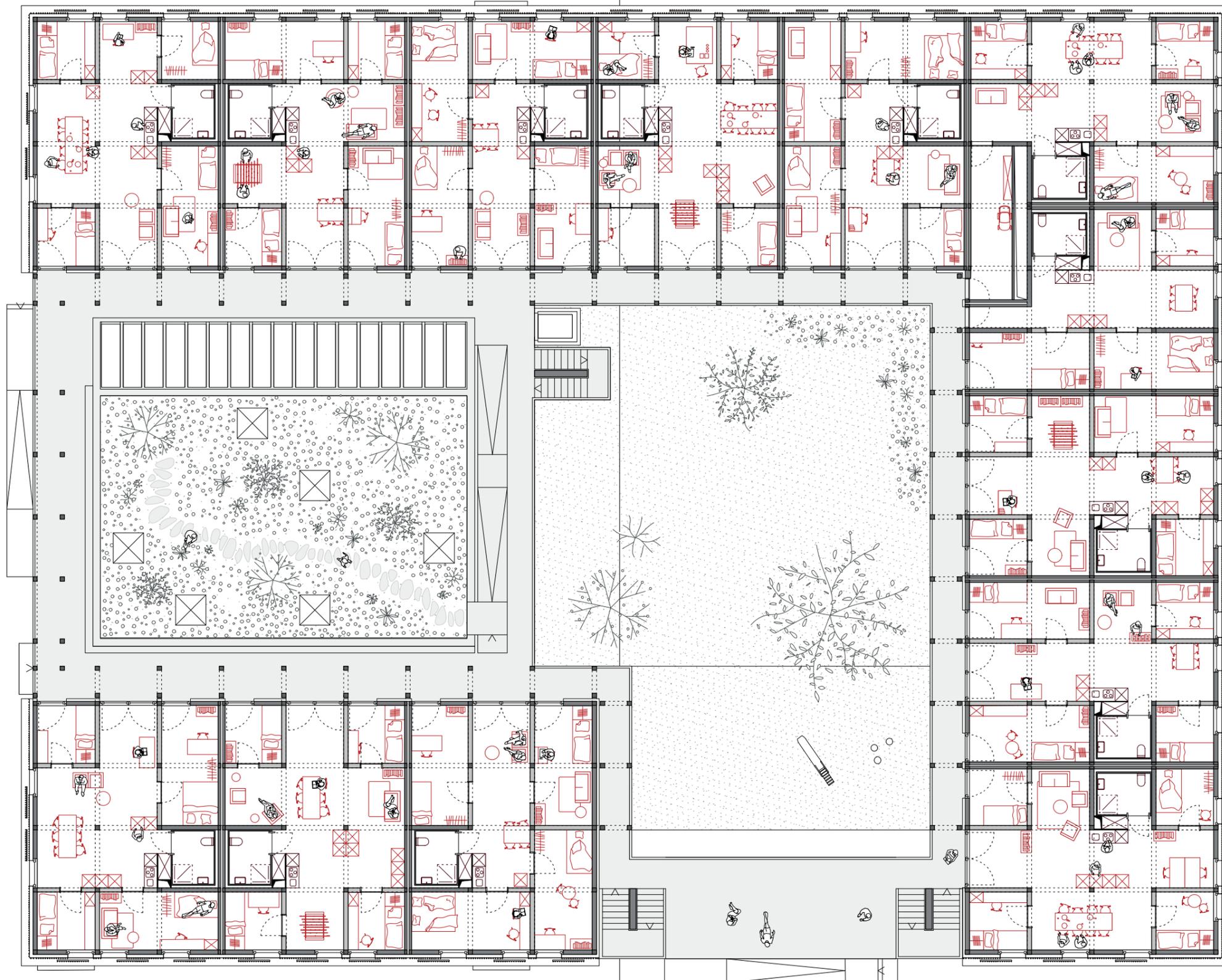
Die Skelettbauweise ermöglicht, dass Innenwände flexibel versetzt werden können. Die Grundform der Wohnung besteht aus einer Gemeinschaftsfläche in der Mitte, um die vier Individualräume und einzelne Minibäder angeordnet sind. Die Individualräume bestehen jeweils aus zwei Teilen mit je $7,3\text{m}^2$ Fläche: eine räumlich geschlossene Kernzone und eine flexible Zone, die räumlich nicht vom Gemeinschaftsbereich der Wohnung abgetrennt werden kann. 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 der einzelnen BewohnerIn 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 flexiblen Zwischenwände sind mit einfachen Möbelverbindern (drehbaren Exzenter-Verbindern) verbunden und können innerhalb weniger Minuten versetzt werden. Durch eingelegte Gummidichtungen kann eine hohe Luft- und Schalldichte erreicht werden.

Die Wohnungen sind alle als Seniorenwohnungen nutzbar. Die Individualräume werden in dieser Nutzung in den meisten Fällen $15,2\text{m}^2$ Fläche aufweisen 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 (beispielsweise junges Paar mit Baby und zwei MitbewohnerInnen oder junges Paar mit Kleinkind und einer MitbewohnerIn) möglich. Der Vorteil der variablen Größe der abgetrennten Individualbereiche besteht darin, dass Zimmer von $15,2\text{m}^2$ (Schlafzimmer) und kleinere Zimmer, die als Einzelzimmer oder Kinderzimmer dienen, gebildet werden 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- und Seniorenwohnen innerhalb einer Groß-WG.



Graphik 90:
Grundriss-Varianten
der Wohnungen im
Modellvorhaben Collegium
Academicum.



Graphik 91:
Grundriss Regelgeschoss
Modellvorhaben Collegium
Academicum.



Abbildung 92:
Luftaufnahme während der Bauphase, 2022.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 93:
Blick in den Innenhof mit Laubengängen in westlicher Richtung, 2023.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 94:
Innenraum mit Holzwänden.
Auf dem Boden sind die
Holzschwellen sichtbar,
die die Grundrisse für die
versetzbaren Innenwände
markieren. Nehmen die
Schwellen eine Trennwand
auf, werden die hier
sichtbaren, flachen Schwellen
durch Führungsschienen mit
entsprechenden Rillen ersetzt.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 95:
Montage der Trenn- und
Innenwände im Selbstbau.
Foto: Sabine Arndt.



Abbildung 96:
Blick in den Innenraum mit
versetzbarer Trennwand rechts
im Bild und austauschbarer
Führungsschiene mit Rillen im
Boden.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 97:
Holzstütze und Raumteiler
einer Studierendenwohnung.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 98:
Selbstgebaute Möbel für die
Studierendenwohnungen.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.

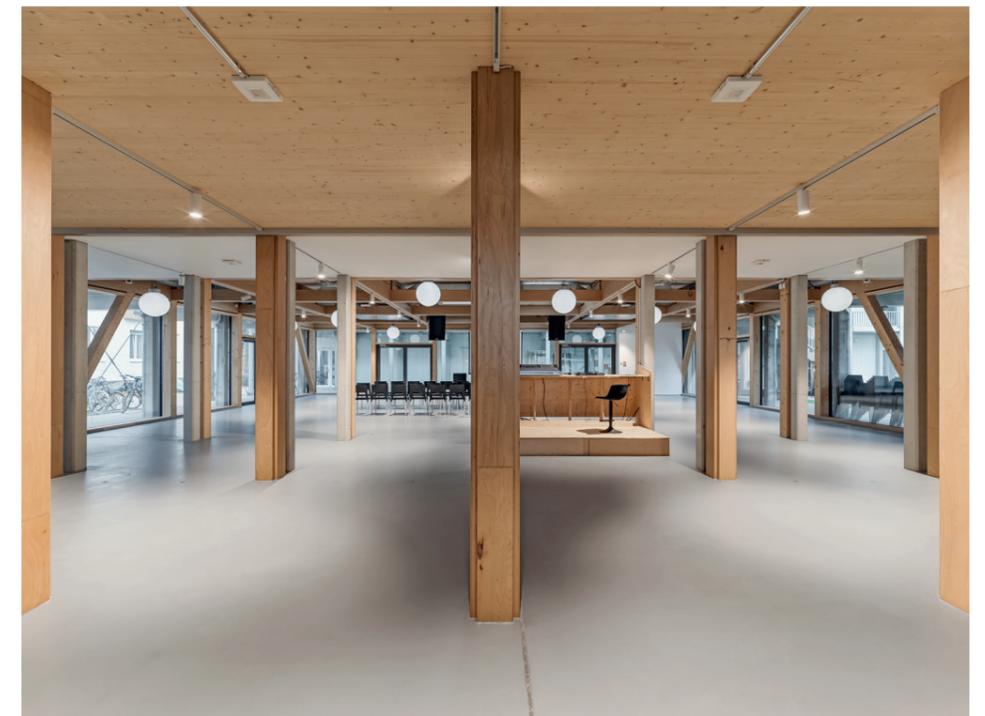
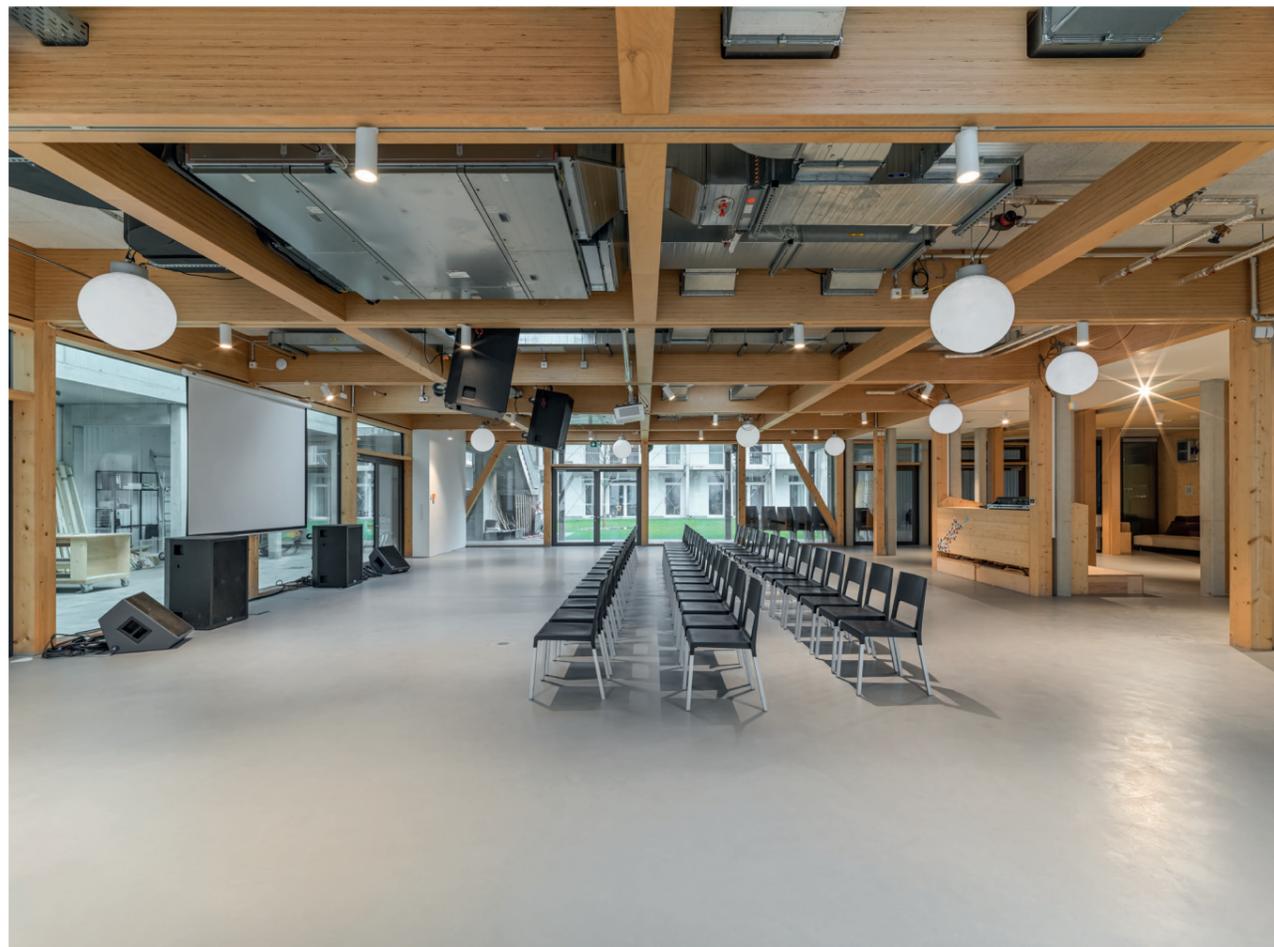


Abbildung 99:
Abbildung 100:
Abbildung 101:
Aufnahmen des
Veranstaltungsraums/der Aula
des Collegium Academicum,
2024.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.

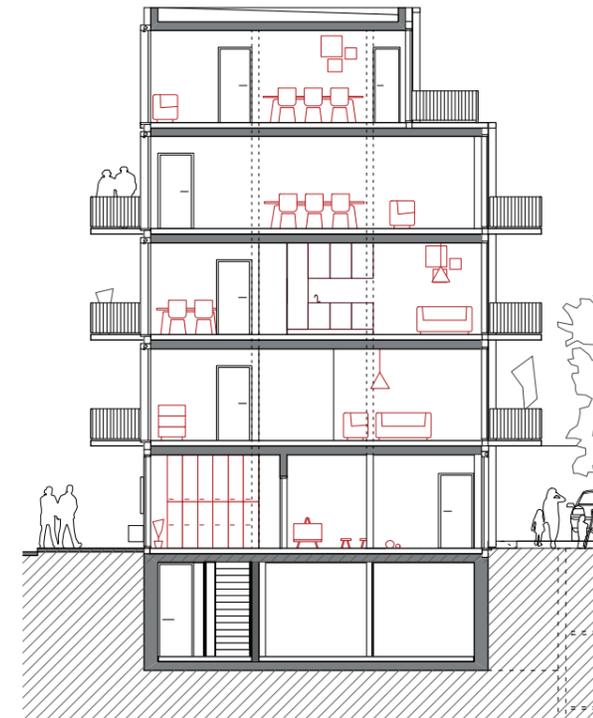


Abbildung 102:
Case Study 2:
dgj228 Wohngruppe
'Gemeinsam Suffizient Leben':
Modell im Maßstab 1/50,
Frankfurt am Main.
Foto: Hans Drexler, 2019.

7.2. CASE STUDY 2: DGJ228 WOHNGRUPPE GEMEINSAM SUFFIZIENT LEBEN

Das Projekt ist als eine Bewerbung um ein innerstädtisches Grundstück entwickelt worden, 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 die Verminderung der Wohnfläche pro Person, ohne dabei die Wohnqualität zu reduzieren (Suffizienz). 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 Effizienzgewinne 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 numerisches 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



Graphik 92:
Querschnitt, o.M.
Wohngruppe 'Gemeinsam
Suffizient Leben'.

kompensiert. Kleine Wohnungen profitieren in besonderer Weise von großzügigen Ausblicken in die Stadt, die den Wohnraum optisch erweitern und großzügig erscheinen lassen. Durch zahlreiche Einbaumöbel, ausreichende Stauräume im Keller und die Reduktion der Verkehrsflächen wird eine Nutzbarkeit der Wohnungen gewährleistet.

Das Haus ermöglicht gemeinschaftliches Leben in einer familienfreundlichen und generationenübergreifenden Umgebung. Im Projekt haben sich Menschen mit dem Wunsch zusammengefunden, gemeinsam zu wohnen und einen Teil ihres Alltags zu verbringen. Diese Gemeinschaft braucht geeignete Räume, in denen sie sich entfalten und spontan entwickeln kann. Viele Wohnfunktionen werden im Gebäude geteilt. Dies macht das Vorhalten von Raumreserven in den einzelnen Wohnungen überflüssig. Herzstück des Hauses ist die gemeinschaftliche Wohnküche, die dem Eingangsbereich zugeordnet ist. Die Wohnküche steht allen BewohnerInnen zu jeder Zeit offen. Die Gemeinschaftsküche ist ein informeller Treffpunkt, an dem sich die Hausgemeinschaft entfaltet. Sie steht beispielsweise für große Gesellschaften oder Familienfeste zur Verfügung. Darüber hinaus kann die Gemeinschaftsküche nachmittags und abends als Co-Working-Space für die BewohnerInnen genutzt werden, wenn es in den Familienwohnungen zu lebhaft für konzentriertes Arbeiten ist. Die Wohnungen benötigen weder Waschmaschinen, Trockner noch



A modern multi-story apartment building with a colorful facade of vertical stripes in shades of pink, yellow, and green. The building features large windows, balconies with glass railings, and a central entrance with the number 34. The facade is composed of vertical panels in various colors, creating a vibrant, multi-colored effect. The windows are large and rectangular, with some having glass railings. The balconies are small and rectangular, with glass railings. The central entrance is a large glass door with the number 34 above it. The building is situated on a street with a red-painted curb. To the right, an adjacent building is under construction, covered in scaffolding.

A building under construction, covered in scaffolding. The scaffolding is made of metal and has red horizontal bars. The building's facade is partially visible, showing windows and a dark roof. A black banner is attached to the scaffolding, with the text "IMMOBILIENGRUPPE" and "CREAL OF COMPANIES" visible. The banner also features a logo with a triangle and the letters "G".

A street scene with a red-painted curb. A street lamp is visible on the left. A bicycle is parked on the sidewalk. In the background, there are trees and other buildings. The sky is cloudy.

Abbildung 103:
Vorangehende Doppelseite:
dgj228 Wohngruppe
'Gemeinsam Suffizient
Leben', westliche Fassade zur
Friedberger Landstraße hin.
Die adressbildende
hinterlüftete Glas-Fassade
wurde von DGJ Architektur
speziell entwickelt und
wirkt entlang der farblich
monotonen Häuserzeile
der Friedberger Landstraße
als Blickfang: Heiter und
lebendig, mit warmen
Farbtemperaturen. Beim
Rückbau können sowohl
Profilgläser als auch das
Aluminium leicht getrennt
und recycelt werden,
weil die Fassade mit
lösbaren Schraub- und
Steckverbindungen gefügt ist.

Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.

Wäscheleinen, sondern teilen eine Waschküche. Ein von allen BewohnerInnen nutzbares Joker-Zimmer im Haus ersetzt die Notwendigkeit für Gästezimmer in den Wohnungen.

Tragwerk und Konstruktion

Das Tragwerk in der umgesetzten Planung ist ein Hybrid aus einem tragenden Skelett mit aussteifenden Wandscheiben und einem aussteifenden Treppenhaus-Kern. Die Auflagen der Bauordnung bedingen, dass die Treppenläufe aus nicht-brennbarem Material (F60-A) konstruiert werden müssen. Deswegen wurden diese aus Stahlbeton geplant. Die angrenzenden Wände hätten auch aus Holz konstruiert werden können. Es wurde aus Kostengründen jedoch auch hier eine Ausführung der Treppenhauswände aus Stahlbeton gewählt.

Für den Dialog mit der Wohngruppe wurden mehrere Typen-Wohnungen für unterschiedliche Wohnbedürfnisse entwickelt, von denen letztendlich keine Variante genauso umgesetzt wird. Die große 4-Zimmer-Wohnung wurde in eine 5-Zimmer-Wohnung umgeplant, die zusammen mit der kleineren 3-Zimmer-Wohnung in fast allen Geschossen gewählt wurde.

Partizipation

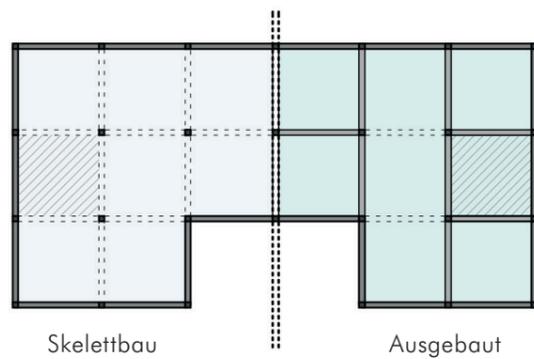
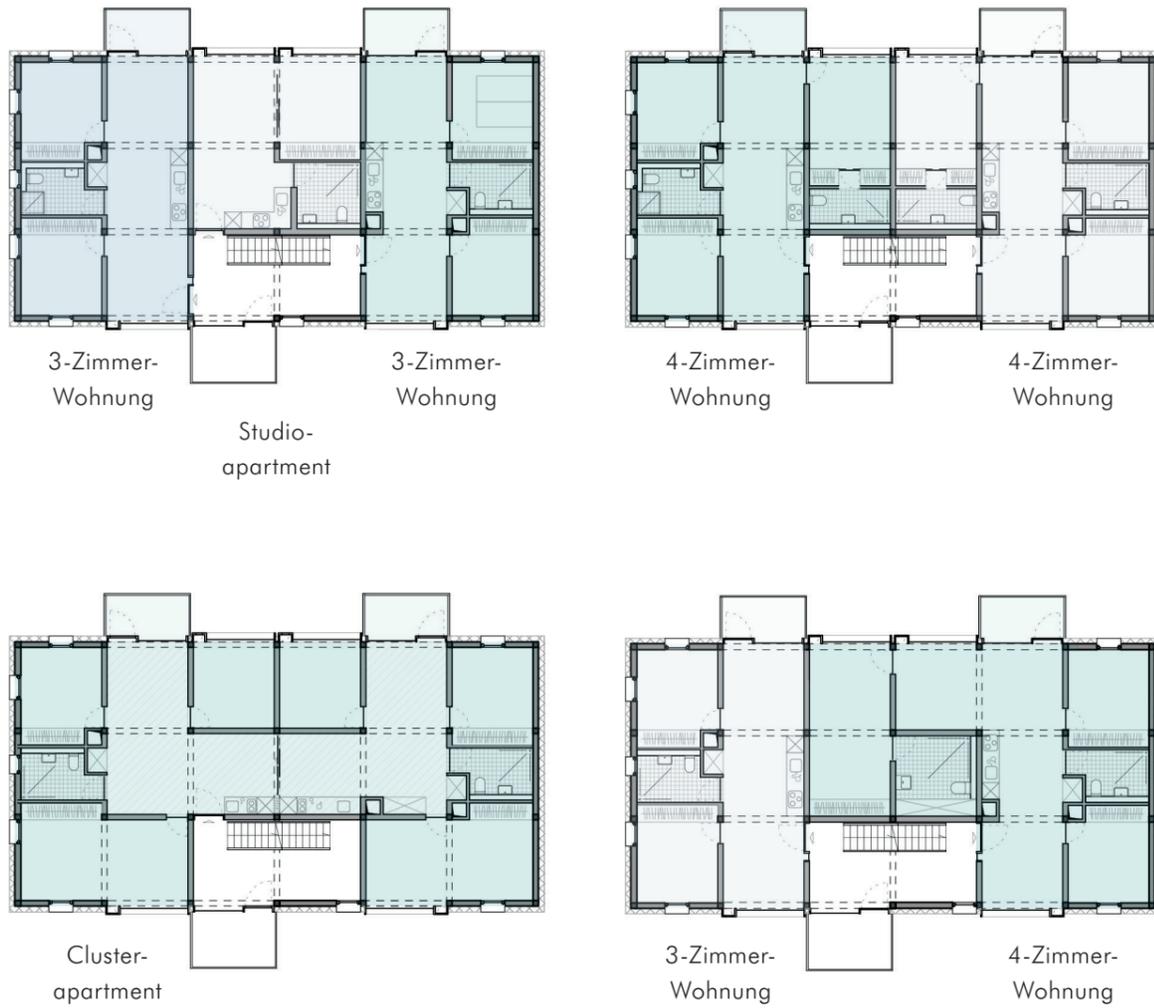
Bei der Wohngruppe in Frankfurt am Main sind die NutzerInnen von der Bauherrin, der Wohnbaugenossenschaft in Frankfurt am Main eG, an der Entwicklung des Konzepts und der Planung beteiligt worden. So wurde das Projekt in einem Konzeptverfahren erarbeitet, bei dem das Grundkonzept sowie die Planung und dabei insbesondere die Grundrisse im Dialog mit den BewohnerInnen entworfen wurden.

Im Planungsprozess manifestiert sich die Partizipation vor allem in der Möglichkeit, unterschiedliche Varianten zu entwickeln und durch die Diskussion über diese Varianten einen Konsens in der Gruppe und Zustimmung der Mitglieder zu erreichen.



Abbildung 104:
dgj228 Wohngruppe
'Gemeinsam Suffizient Leben':
Modell des Grundrisses einer
in der Quadratmeterzahl
reduzierten Wohnraums,
Maßstab 1/50, Frankfurt am
Main.
Foto: Hans Drexler, 2019.

Ausbauvarianten:



Graphik 93:
Ausbauvarianten der
Geschosse und Grundrisse,
dgj228.

Graphik 94:
Rechts oben:
Unterschiedliche,
mögliche Grundrisse für
Wohnungszuschnitte, dgj228.

Graphik 95:
Rechts unten:
Fassadenansicht, dgj228.





Abbildung 105:
dgj228 Wohngruppe
'Gemeinsam Suffizient
Leben', westliche Fassade zur
Friedberger Landstraße hin.
Dachansicht mit PV-Anlage.
Das Gebäude erreicht
KfW-Programm 153- sowie
Frankfurt-Aktivhaus-
Standard, besitzt außerdem
eine hochdämmende
Gebäudehülle, und, neben
der hinterlüftete Fassade, eine
Luft-Wärme-Pumpe.

Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 106:
Großzügige Fensteröffnungen, Einbaumöbel, ausreichende Stauräume im Keller und reduzierte Verkehrsflächen gewährleisten eine hohe Lebensqualität in den Wohnungen.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 107:
Die Friedberger Landstraße gehört zu den Hauptverkehrsadern von Frankfurt am Main. Entsprechend hoch waren die Ansprüche an den Schallschutz. Die Fassade ist eine einschalige Fensterkonstruktion, die sowohl den Wärme- als auch den Schallschutzanforderungen entspricht und die im Holzbau anspruchsvollen Einbaudetails zur Verhinderung der Flankenschallübertragung technisch umsetzt. Der Einsatz der Profilgläser als schallentkoppelte Schicht vor der vergleichsweise leichten Holz-Außenwand verbessert den Schallschutz wesentlich.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH.

Abbildung 108:
Im EG befindet sich eine Kita, die sich als Angebot an das ganze Quartier richtet, im Bild Aufenthaltsraum mit zukünftiger Küche. Das Gebäude wurde außerdem durch das „Frankfurter Programm für familien- und seniorengerechten Mietwohnungsbau“ gefördert.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 109:
Der Kita angeschlossen ist ebenfalls ein Außenraum mit kleinem Spielplatz und Garten, die von der zur Friedberger Landstraße abgekehrten Seite des Gebäudes erreichbar sind.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH.





Abbildung 110:
Rückwärtige, der Friedberger
Landstraße abgewandte
Seite des Gebäudes
mit entstehendem
Garten, Spielplatz und
gemeinschaftlichem
Außenraum, rechts im Bild
der Tiefparker und die
E-Ladestation.
Foto: Urheberrecht Thilo Ross
Urh. Nr. 4026999, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 111:
X-Fix Verbinder, Fugen
ausgestopft mit Mineralwolle.

Konstruktion und Montage

Bei dem Projekt in Frankfurt am Main wurde das Bausystem mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen im gesamten Tragwerk umgesetzt mit folgenden Besonderheiten:

- Bekleidung aller Wände zum Brandschutz und Schallschutz. Straßen-
seitig ist die Bekleidung als entkoppelte Vorsatzschale konstruiert.
- Stahlbeton-Treppenhaus als Flucht- und Rettungsweg
- Ausstopfen aller Hohlräume bei den X-Fix-Verbindern zur Verhinderung
eines Hohlraumbrandes

Graphik 96:
Grundriss 2. OG.

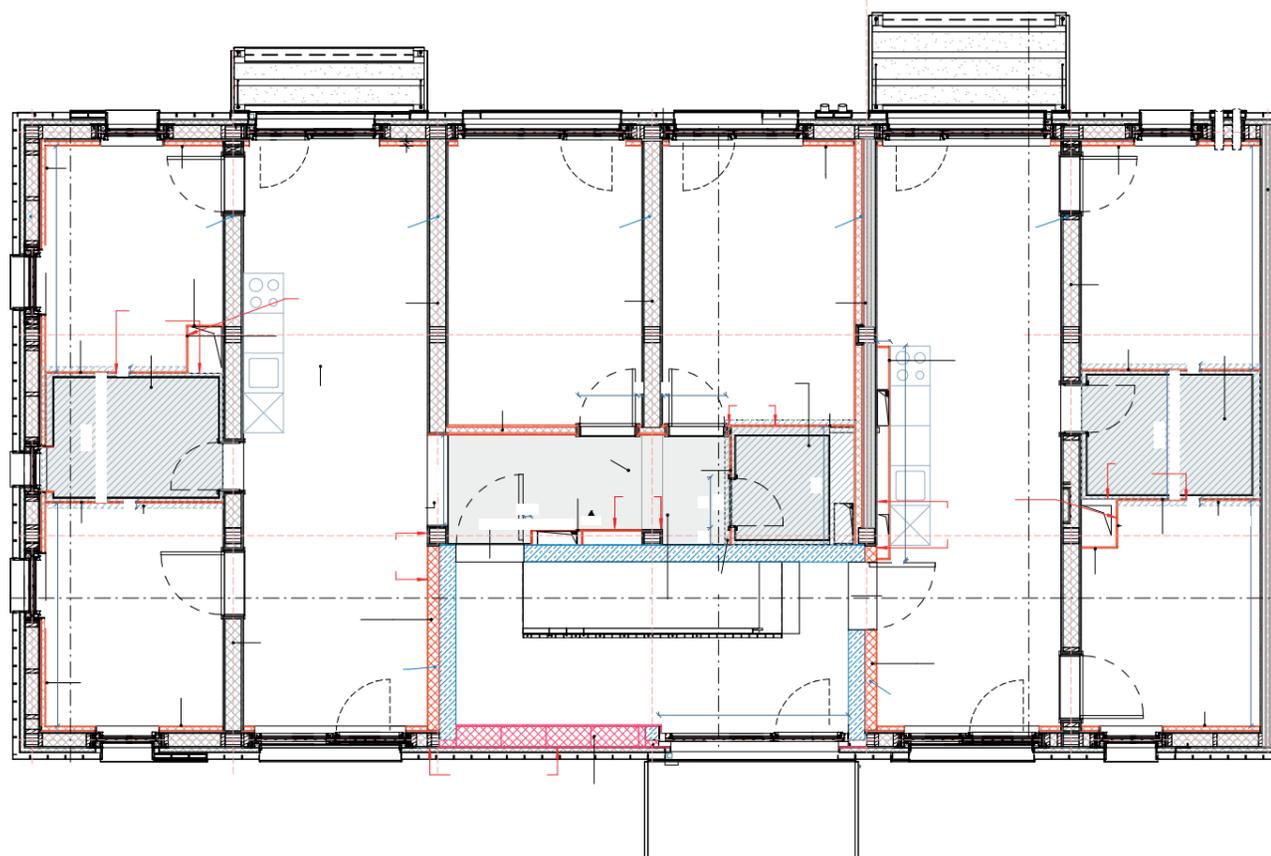


Abbildung 112:
Montage der Decken, dgj228.



Abbildung 113:
Montage der Decken, dgj228.

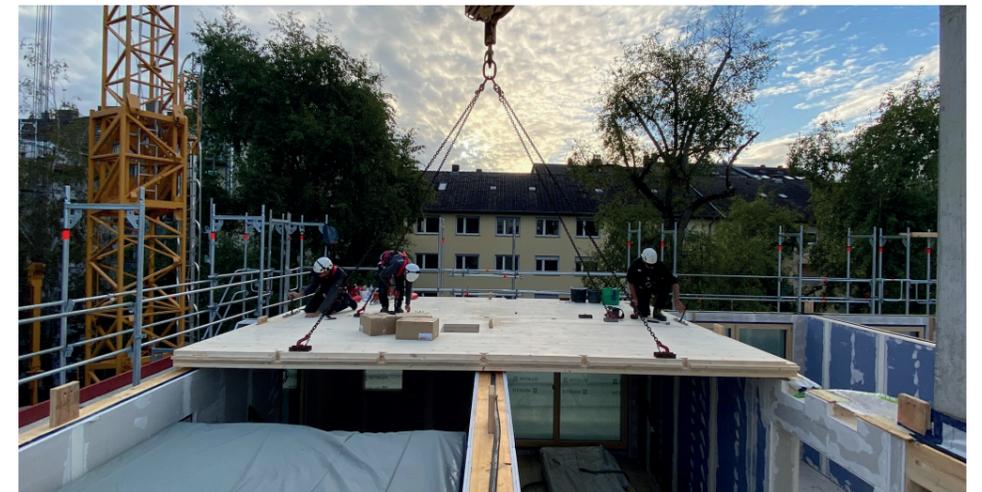
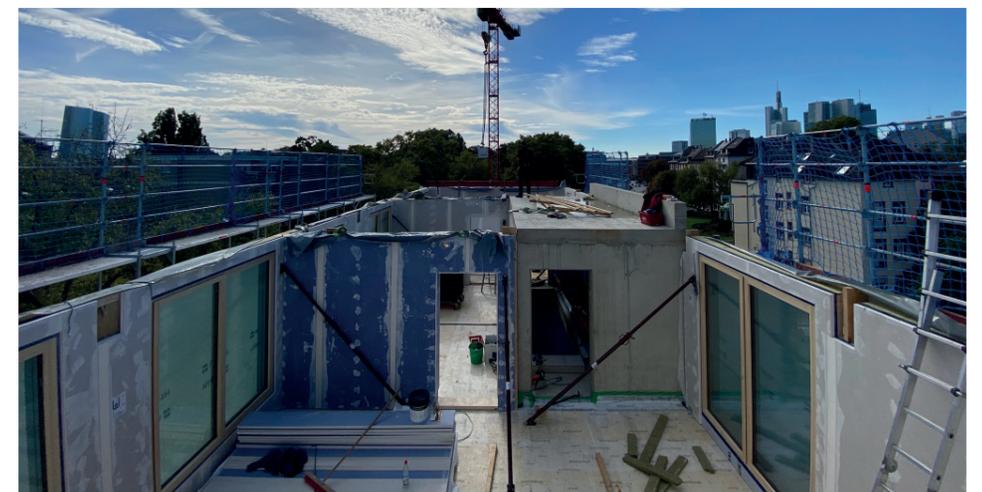


Abbildung 114:
Montage der Decken, dgj228.



7.3. CASE STUDY 3: DGJ253 WOHNGRUPPE MANNHEIM

Abbildung 115:
dgj253 Wohngruppe
Mannheim, 2019,
Visualisierung Noisy Owls,
Vilnius nach
3D-Model im Auftrag von
DGJ Architektur, 2019.



Für ein Konzeptverfahren (Wettbewerb) in Mannheim wurde das Bausystem eingesetzt, um eine flexible Wohnbebauung zu entwerfen, die unterschiedliche Wohnungsgrößen von 2- bis 5-Zimmer-Wohnungen kombiniert. Da zum Zeitpunkt des Entwurfs noch nicht alle Mitglieder der Wohngruppe feststanden, sollte das Gebäude so entworfen werden, dass im Austausch mit den jetzigen und zukünftigen BewohnerInnen möglichst viele unterschiedliche Wohnungsgrößen und Wohnkonzepte implementiert werden können.

Entwurfskonzept

In Hinblick auf Anforderungen der Wohngruppe wurde zusammen mit den zukünftigen BewohnerInnen entschieden, dass die Wohnungen auf dem $3,03\text{m} \times 3,0\text{m}$ -Raster geplant werden. Ausschlaggebend war, dass bei den kleineren Rastern, die Schlafzimmer und Kinderzimmer für ein Rasterfeld mit einem Innenmaß von ca. $2,39\text{m} \times 2,3\text{m}$ zu klein waren, um die Nutzung auf nur einem Feld mit nur $5,5\text{m}^2$ unterzubringen. Die Annahme von zwei Feldern führte zu länglichen Räumen, die aufgrund der geringen Breite nicht optimal nutzbar sind, weil z.B. neben einem Doppelbett nur auf einer Seite genug Platz bleibt, um seitlich in das Bett einzusteigen.

Vergleich von Entwurfsvarianten Varianten

Als Case-Study für die Systementwicklung wurde dieser Fall zum Anlass genommen, um einen systematischen Vergleich unterschiedlicher Rastergrößen zu erarbeiten und diese Raster im Hinblick auf die Eignung für die unterschiedlichen Wohnungen zu bewerten. Dabei wurden folgende Grundraster entworfen:

- $2,59\text{m} \times 2,5\text{m}$ (Achismaß)
- $3,03\text{m} \times 3,0\text{m}$ (Achismaß)
- $3,63\text{m} \times 3,55\text{m}$ (Achismaß)
- $3,63\text{m} \times 5,0\text{m}$ (Achismaß)

Für alle Varianten wurden alle Wohnungstypen (2- bis 4-Zimmer-Wohnungen) entworfen. Für die vier unterschiedlichen Raster wurden alle Wohnungstypen getestet. Die Ergebnisse wurden mit der Wohngruppe diskutiert, um das optimale Rastermaß identifizieren zu können. Zunächst können die Varianten quantitativ verglichen werden. Die Wohnfläche und die Effizienz der Grundrisse unterscheiden sich nur minimal. Diese Unterschiede ergaben sich auch aus den verschiedenen Anteilen an allseitig umbauten Flächen (BGF (r)) und offenen Flächen (BGF (s)).

Deutlicher unterscheidet sich die Holzmenge im Tragwerk der Varianten, indem OPT4 23% mehr Holz benötigt als die beste OPT1. Die größeren Spannweiten und erforderlichen Querschnitte vor allem in den Decken führen zu einem ineffizienteren Tragwerk als der gleichmäßigere und kleinteiligere Lastabtrag mit mehr Stützen und kleineren Spannweiten der Decken.

Der deutlichste Unterschied der Varianten zeigt sich in der Anzahl der BewohnerInnen. OPT4 kann bis 40 Personen aufnehmen, OPT1 nur 32 Personen. Diese Daten sind immer mit der Einschränkung zu betrachten, dass durch andere Nutzungskonzepte und Möblierungen die Anzahl der BewohnerInnen ebenfalls deutlich schwanken kann. Die Auswertung basiert auf einer Standardmöblierung und Nutzung für alle Fälle und Varianten, die sich vor allem an der Anzahl der Betten und Doppelbetten orientiert und davon ausgeht, dass Kinderzimmer einfach belegt sind.

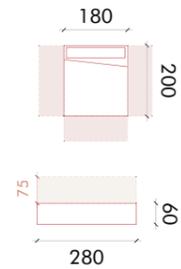
In einem weiteren Vergleich, der im Entwurfsprozess für alle Varianten durchgearbeitet wurde, wurde die Passung der einzelnen Wohnfunktionen mit dem konstruktiven Raster untersucht. Es fällt auf, dass die strenge Geometrie des Bausystems in der Entwurfspraxis häufig gebrochen wird. So sind die Räume nicht immer nur auf ganzzahlige Rastergrößen festgelegt. Vielmehr sind die meisten Räume mit zwei oder auch nur mit Teilen des Rasters entworfen. Für das größte Raster von $3,6\text{m} \times 5,0\text{m}$ ergibt sich ein System, bei dem ein Raum mit einem Teil eines Korridors kombiniert in ein Rasterfeld eingepasst werden kann. Diese Interpretation des Bausystems ermöglicht eine große Bandbreite an Raumgrößen und Grundriss-Organisationen.

Ausschlaggebend für die Auswahl einer Entwurfsvariante – der OPT2 mit einem Quadrat-Raster von ca. 3m lichtigem Raummaß – war jedoch das Zusammenspiel von Passung der Wohnfunktionen mit der Raumgeometrie und die Effizienz des Grundrisses. So ergaben sich für die wichtigsten Wohnfunktionen (Schlafzimmer, Kinderzimmer, Wohnküche) durchgehend gute Raumgrößen und Proportionen. Das kleinere Raster hatte in Hinblick auf die Möblierbarkeit deutliche Schwächen. Die größeren Raster ergaben zwar bessere Grundrisse für die Schlafzimmer, aber zu großzügige Kinderzimmer.

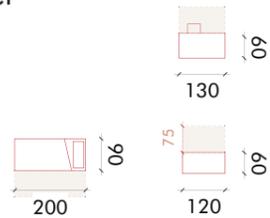


Abbildung 116:
Vorangehende Doppelseite:
dgj253 Wohngruppe
Mannheim.
Die Bauherrin, die „WohnWerk
Mannheim eG“, will
gemeinschaftliches Leben in
einer familienfreundlichen und
generationsübergreifenden
Umgebung fördern. Auch
beim „WohnWerk“ wurde
die Quadratmeterzahl pro
Kopf bewusst zugunsten
von Gemeinschaftsflächen
reduziert.
Foto: Johannes Vogt, Quelle:
DGJ Architektur GmbH.

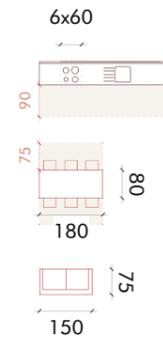
Schlafzimmer



Kinderzimmer



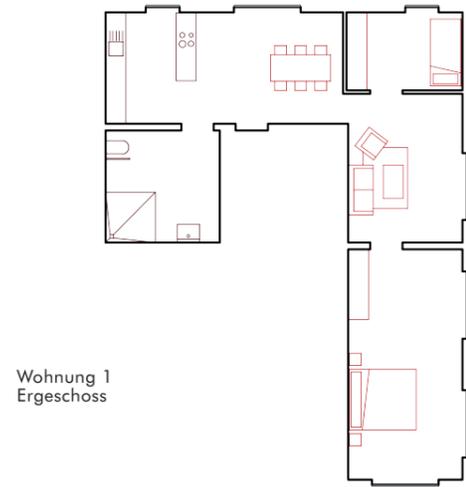
Wohnzimmer



Graphik 97:
Möblierungsschablone für
Wohnnutzung.



Graphik 98:
Vergleichende Untersuchung
zu Rastergrößen, Nutzungen
und Möblierungen.



Wohnung 1
Erdgeschoss



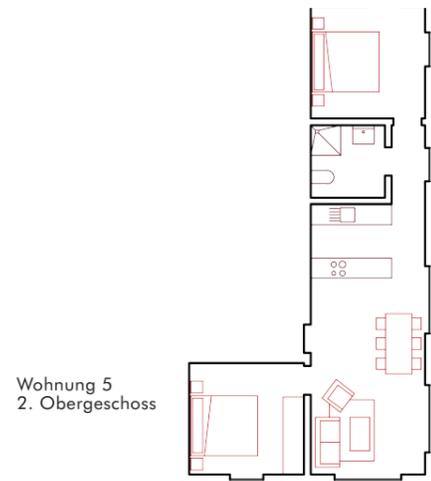
Wohnung 2
1. Obergeschoss



Wohnung 3
1. Obergeschoss



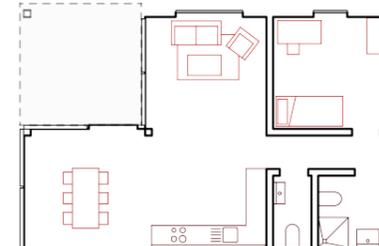
Wohnung 4
2. Obergeschoss



Wohnung 5
2. Obergeschoss



Wohnung 6
2. Obergeschoss



Wohnung 7
3. Obergeschoss



Wohnung 8
3. Obergeschoss



Wohnung 9
3. Obergeschoss



Wohnung 10
4. Obergeschoss



Wohnung 11
4. Obergeschoss

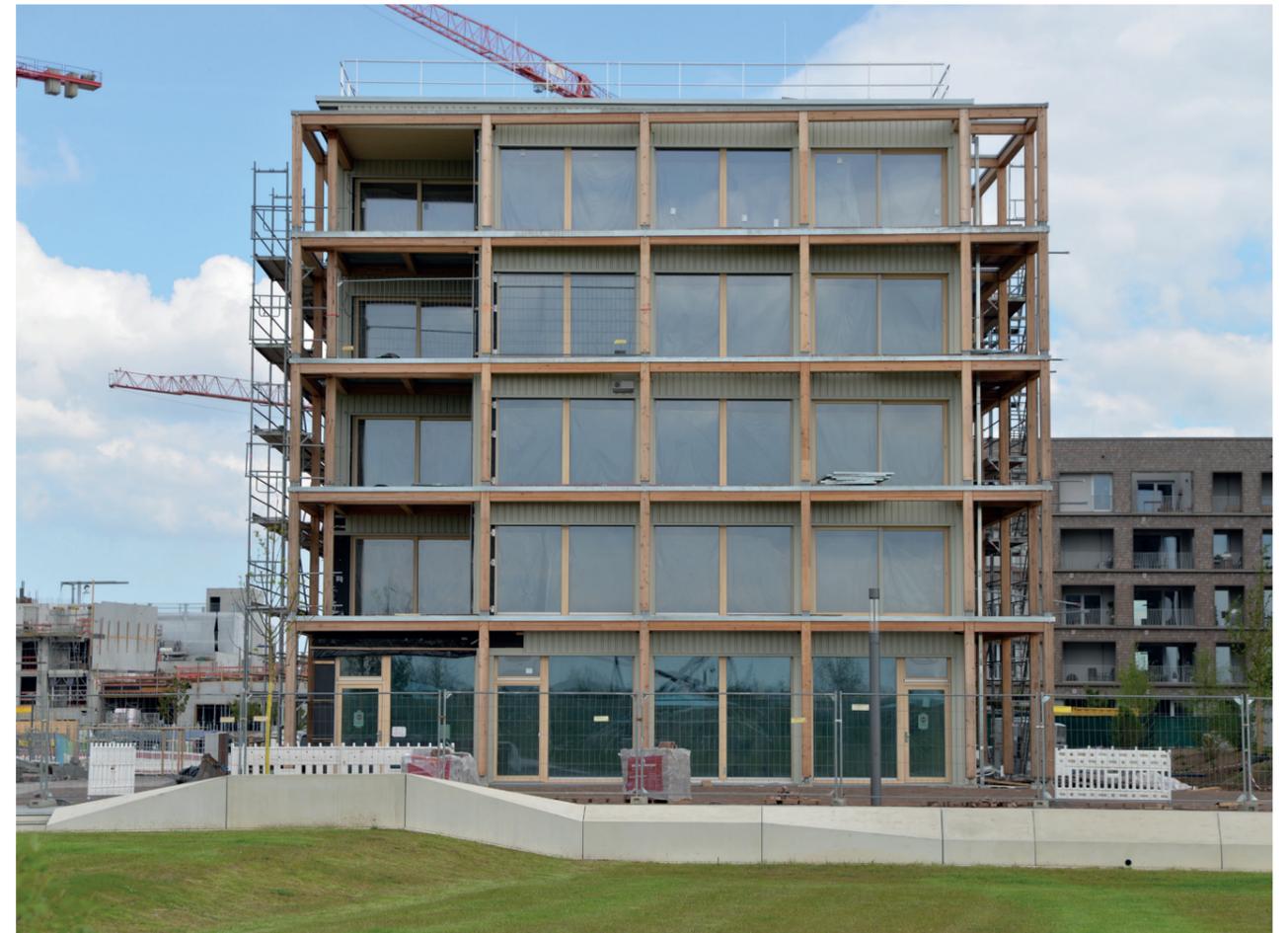


Wohnung 12
4. Obergeschoss

Abbildung 117:
Das „WohnWerk“ stellt einen Teil des Erdgeschosses dem Quartier zur Mitnutzung zur Verfügung, beispielsweise für ein Angebot von Gesundheitskursen oder für private Feiern.
Foto: Johannes Vogt, Quelle: DGJ Architektur GmbH.



Abbildung 118:
Für das prominent direkt gegenüber dem BUGA2023 gelegenen Gebäude entwickelte DGJ ein eigenes, preisgünstiges und wartungsarmes System zur Fassadenbegrünung.
dgj253 während der Bauphase.



In diesem Kapitel werden die Interaktionen zwischen den einzelnen Forschungsfeldern diskutiert. Die Betrachtung beginnt bei einer Beschreibung der Maßnahmen und konstruktiven Strategien im Bausystem, weil die gleichen Anforderungen mit unterschiedlichen konstruktiven Strategien erfüllt werden können, die im Kapitel 6 ausführlich beschrieben wurden.

Bei der Betrachtung der Analyse der positiven und negativen Synergien zwischen den Forschungsfeldern werden vor allem die verschiedenen Varianten oder Ausprägungen verglichen, um eine Auswahl einer geeigneten Variante für den jeweiligen Anwendungsfall in Abhängigkeit von den spezifischen Anforderungen, aber auch für das Bausystem allgemein, zu ermöglichen.

Im ersten Schritt wurden in einer qualitativen Betrachtung in Anlehnung an eine systemische Analyse die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Planungsthemen beschrieben.

Die Komplexität erhöht sich, weil bei jedem Planungsziel (Standicherheit/Tragwerk, Brandschutz, Schallschutz, Wärmeschutz) eine Anzahl von Varianten für die Umsetzung betrachtet wurden. Aus den unterschiedlichen Strategien zur Erreichung der Planungsziele ergeben sich unter Umständen auch unterschiedliche Wechselwirkungen.

		Konstruktion	Tragwerk	Brandschutz	Schallschutz	Wärmeschutz	Luftdichtheit
Ebene	Sub-Ebene						
Tragwerk	„Globales Tragwerk VAR A: Skelettbau“	Tragende Stützen und Träger mit Ausfachungen und Decken in Holzrahmenbauweise		0	-	+	-
	„Globales Tragwerk VAR B: Hybrid „	Tragende Stützen mit Ausfachungen und Decken aus Massivholzbauweise		-	+	+	-
	„Globales Tragwerk VAR C: Massivbau“	Tragende und aussteifende Wände und Decken aus Massivholz		-	-	-	+
	Lokales Tragwerk	Knotenpunkt mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen, Holznägel		+	+		
Brandschutz	VAR A:	Tragwerk (tragende und aussteifende Bauteile) werden überdimensioniert	+		+	0	0
	VAR B: Beplankung	Tragwerk (tragende und aussteifende Bauteile) werden mit einer Beplankung (GFK, GK)	+		0	+	+
Schallschutz	VAR A: Entkoppeln		-	-		0	0
	VAR B: Steifigkeit / Koppeln	Bauteile biegesteif koppeln, Masse erhöhen	+	+		0	0
	VAR C: Beplankung / Vorsatzschale	Vorsatzschalen als sekundäre Konstruktion	0	+		+	+
	Dämmung: Dämmdicken Wand		0	+	+		+
	U-Wert /		0	0	0		0
Luftdichtheit	VAR A: Dichte Bauteil-Anschlüsse	Geometrische Verschränkungen, Abkleben	+	+	+	+	
	VAR B: Folien, Luftdichte Ebenen	Zusätzliche Folien und / oder Luftdichte Ebene	-	+	+	+	

Tabelle 22: Qualitative Bewertung der Interaktion zwischen den Einflussfaktoren und Systemvarianten.

8.1. BETRACHTUNGSEBENE

TRAGWERK

INTERKATION MIT...

Konstruktion	INTERKATION MIT...			SCHALLSCHUTZ	THERMISCHE BAUPHYSIK			GWP / CO ₂ KOSTEN
	TRAGWERK	BRANDSCHUTZ			WÄRMESCHUTZ	LUFTDICHTHEIT		
<p><u>VAR A:</u> <u>Skelettbau</u></p> <p>Holzrahmen- und Holztafelbauweise Gebäudeklasse 4</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tragende Stützen - Träger - Aussteifung mit Holztafeln/ Holzrahmenwänden - Decken: Balkendecke 		<p>++</p> <ul style="list-style-type: none"> • Heißbemessung möglich • Holztafeln mit Brandschutz- bekleidung (GFK) <p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tragende und aussteifende Bauteile müssen zusätzlich bekleidet werden 		<p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relativ leichte Bauweise mit geringem Schallschutz 	<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gefache können ausgedämmt werden und verbessern Wärmeschutz <p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Meist zusätzliche Dämmlagen außenseitig 	<p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • viele Fugen und Anschlüsse 		
<p><u>VAR B:</u> <u>Hybrid Skelett+Massiv</u></p> <p>Massivholzbauweise Gebäudeklassen 4 und 5</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tragende Stützen (Skelett) - Träger (Skelett) - Decken: Brettsper Holz oder Brettstapel (Massivholz) - Aussteifung mit Massivholzwänden 		<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Decken: Heißbemessung auf Abbrand führt meist nicht zur Erhöhung des Holzvolumens <p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wände und Stützen müssen u.U. zusätzlich bekleidet werden 		<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Massive Decken bieten besseren Schallschutz, erfordern aber zusätzliche Schüttungen <p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wände im Holzrahmen / Holztafel relativ leicht mit schlechtem Schallschutz 	<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Außenwände als Holzständer lassen sich gut ausdämmen <p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dachdämmung erhöht Querschnitte 	<p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Viele Fugen und Anschlüsse in Außenwänden 		
<p><u>VAR C:</u> <u>Massivbau</u></p> <p>Massivholzbauweise Gebäudeklassen 4 und 5</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wände und Decken: Brettsper Holz oder Brettstapel - Aussteifung mit Massivholzwänden 		<p>o</p> <ul style="list-style-type: none"> • Decken: Heißbemessung ohne zusätzliches Holzvolumen • Stützen und Wände: Heißbemessung führt zu größeren Querschnitten 		<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schwere Bauteile bieten guten Schallschutz <p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Decken mit zusätzlicher Beschwerung (Schüttung) 	<p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Massivholz hat relativ Dämmwert und muss mit zusätzlichen Dämmschichten ertüchtigt werden 	<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Große, homogene Bauteile mit wenig Fugen 		

Tabelle 23: Interaktion: Betrachtungsebene Tragwerk in Interaktion mit anderen Dimensionen.

8.1. VARIANTEN STANDSICHERHEIT / TRAGWERK

Variantenbeschreibung

VAR A: Skelettbau

Beim Skelettbau werden Stützen, Träger und aussteifende Wand- und Deckenscheiben eingesetzt, die in Holztafel- oder Holzrahmenbauweise, beziehungsweise Holzbalkendecken ausgeführt werden. Holztafel- oder Holzrahmenbauweise erfordert nach der MHolzBauRL (Fassung 2020) in der Gebäudeklasse 4 doppelte Brandschutzbekleidungen.

VAR B: Hybrid-Konstruktion

Die beschriebene Konstruktion des Modellvorhabens setzt Stützen und Träger ein, die mit massiven Decken und aussteifenden Wänden kombiniert werden. Im Sinne der MHolzBauRL (Fassung 2020) ist dies auch als eine Holztafel- oder Holzrahmenbauweise einzustufen, die in der Gebäudeklasse 4 und 5 doppelte Brandschutzbekleidungen erfordert.

VAR C: Holz-Massivbau

Tragende und aussteifende Wände und Decken werden in Massivholz (BSP, BHS) ausgeführt.

In der MHolzBauRL (Fassung 2020) wird diese Bauweise Gebäudeklasse 4 und 5 mit einfacher Brandschutzbekleidungen ausgeführt.

Synergien Tragwerk

VAR A: Skelettbau

Der Skelettbau reduziert das zu schützende Holz-Volumen.

Die Hohlräume können ausgedämmt werden und verbessern den Wärmeschutz.

Notwendige Bekleidungen können den Brandschutz verbessern.

Der Schallschutz erfordert aufgrund des geringen Gewichts besondere Maßnahmen, insbesondere Beschwerung durch Schüttungen, um den Trittschallschutz zu gewährleisten.

VAR B: Hybrid-Konstruktion

Mit zunehmenden Holzvolumen in der Tragkonstruktion steigt auch der Materialverbrauch. Wenn die Bauteile verkleidet werden, wird das Holzvolumen geringer, was aber durch die Mehrkosten der Bekleidungen überkompensiert wird. Die Bekleidungen können den Schallschutz und den Brandschutz verbessern. Auf den Decken sind Maßnahmen, insbesondere Beschwerung durch Schüttungen, erforderlich.

VAR C: Holz-Massivbau

Grundsätzlich sind die Massivholz-Wände und -Decken leistungsfähig für Brandschutz und Luftschallschutz.

Der Trittschallschutz ist ohne zusätzliche Beschwerung der Decken nicht nachweisbar.

Beim Holz-Massivbau besteht häufig der Wunsch der ArchitektInnen und NutzerInnen, die Holzoberflächen sichtbar zu belassen. Dies ist für die Decken oder 25 % der Wände zulässig. Grund dafür ist eine Begrenzung der Brandlast.

8.2. BETRACHTUNGSEBENE

BRANDSCHUTZ

INTERKATION MIT...

	Beschreibung	INTERKATION MIT...		SCHALLSCHUTZ	THERMISCHE BAUPHYSIK			GWP / CO ₂ KOSTEN
		TRAGWERK	BRANDSCHUTZ		WÄRMESCHUTZ	LUFTDICHTHEIT		
VAR A: <u>Heißbemessung</u> (Gebäudeklasse 4 und 5: Sichtholz nur Decke oder 25% aller Wände)	Gebäudeklasse 3 - F30 - Wände und Stützen auf Abbrand dimensioniert (ca. 21mm zusätzlich auf jeder Abbrandseite) - Decken meist ohne zusätzliche Holzmenge	-	• Heißbemessung erhöht Querschnitte	+	• Erhöht Masse und verbessert Schallschutz	o	• Größere Querschnitte erhöhen auch Wärmeschutz, aber Dämmwert Holz nicht so gut	
	Massivholzbauweise Gebäudeklassen 4 und 5 - F60 - Wände und Stützen auf Abbrand dimensioniert (ca. 42mm Holz) - Decken meist ohne zusätzliche Holzmenge, weil im Brandfall nur Standsicherheit nicht Gebrauchstauglichkeit.	--	• Mehr Holzvolumen					
	Lokales Tragwerk - Knoten mit form + kraftschlüssigen Verbindungen		+	• Anschlüsse können wie homogene Bauteile wirken	+		• Gekoppelte Bauteile wirken als System mit höherer Masse	
VAR B: <u>Bekleidung</u>	Gebäudeklasse 3 - F30 - mind. 1 x 18mm Gipsfaserplatte Typ GKF		+	• Beplankungen können aussteifende ausgeführt werden	++	+	• mineralische Dämmschichten können auch als Brandschutz-verkleidung eingesetzt werden	
	Holzrahmen- und Holztafelbauweise Gebäudeklasse 4 - F60 - mind. 2 x 18mm Gipsfaserplatte Typ GKF							
	Massivholzbauweise Gebäudeklassen 4 und 5 - F30 - mind. 1 x 18mm Gipsfaserplatte Typ GKF							

Tabelle 24: Interaktion: Betrachtungsebene Brandschutz in Interaktion mit anderen Dimensionen.

Betrachtungsebene Brandschutz

Beschreibung der Varianten

Beim Schallschutz können zwei Varianten unterschieden werden:

VAR A: Heißbemessung

Bei der Heißbemessung wird der Querschnitt der tragenden, aussteifenden und raumabschließenden Bauteilen erhöht, um einen Abbrand Rechnung zu tragen.

VAR B: Bekleidungen

Die tragenden, aussteifenden und raumabschließenden Bauteilen werden mit Brandschutzbekleidungen geschützt, die als Gipsfaserplatten, Estriche oder Mineralische Dämmplatten ausgeführt werden können.

Synergien Brandschutz

VAR A:

Die Heißbemessung erhöht das Holzvolumen. Diese Ausführung des Brandschutz kann vorteilhaft für das Tragwerk sein, weil Bauteile, die auf Verformungen oder Schwingungen bemessen werden durch das zusätzliche Volumen nicht vergrößert werden.

Das höhere Gewicht ist positiv für den Luftschallschutz.

VAR B:

Die Brandschutzverkleidungen können auch aussteifend wirken.

Für den Schallschutz sind insbesondere Estriche und entkoppelte Schalen positiv, wobei deren Konstruktion aufwendig ist.

Werden Mineralwolleplatten eingesetzt, dann können diese gleichzeitig dem Brandschutz und dem Wärmeschutz dienen.

8.3. BETRACHTUNGSEBENE

SCHALLSCHUTZ

INTERKATION MIT...

	Konstruktion	INTERKATION MIT...		SCHALLSCHUTZ	THERMISCHE BAUPHYSIK		GWP / CO ₂ KOSTEN
		TRAGWERK	BRANDSCHUTZ		WÄRMESCHUTZ	LUFTDICHTHEIT	
<u>VAR A:</u> <u>Entkoppeln</u>	Schallübertragung wird durch die Trennung bzw. Entkoppelung von Bauteilen verhindert - Trennung von durchgehenden Bauteilen (Träger, Decken, Wände) - Verdoppelung von Stützen, Wänden und Trägern - Schallabsorber / Schwingungsisolierung als Trennlagen (z.B. Sylomer) - Trittschalldämmung unter Estrich zur Entkoppelung des Trittschalls	--- • Entkoppel führt zu -höherem Holzverbrauch durch doppelte Querschnitte, -schlechte Kraftübertragung (Druck), -Zugkräfte nicht übertragbar.	○ • Keine Interaktion		○ • Keine Interaktion	- • Mehr Fugen + Anschlussdetails	
<u>VAR B:</u> <u>Koppeln:</u> <u>Erhöhung von Steifigkeit und Masse</u>	Durchgehende Bauteile werden steif verbunden, so dass die Masse des gekoppelten Systems erhöht wird und die Schwingungen reduziert werden. - durchgehende Träger oder Stützen werden biegesteif und fest an Träger und Decken angeschlossen mittels form- und kraftschlüssigen Knoten	++ • Gute Kraftübertragung • lokal + global	+ • Kraftschlüssige Verbindungen wirken wie homogene Bauteile		○ • Keine Interaktion	+ • Dichte Anschlüsse erhöhen Luftdichtheit, müssen aber meist noch abgeklebt werden	
<u>VAR C:</u> <u>Bekleidungen</u> <u>Vorsatzschalen</u> <u>Schüttungen</u>	Zusätzliche Schichten, die entweder direkt auf die Holzbauteile aufgebaut werden, um die Masse zu erhöhen oder entkoppelte Vorsatzschalen - Beplankungen mit Gipskartonplatten, Gipsfaserplatten oder Lehmbauplatten - Vorsatzschalen meist als Gipskarton- oder Gipsfaserplatten - Schüttungen (gebunden oder in Waben) auf den Holzdecken, die die Masse erhöhen.	+ • Bekleidungen können aussteifend eingesetzt werden	++ • Bekleidungen + Vorsatzschale können Schallschutz und Brandschutz leisten		+ • Vorsatzschalen können ausgedämmt werden	+ • Zusätzliche Abdichtungsebene wenn versetzte Stöße • Folien und Abklebungen hinter Bekleidungen möglich	

Tabelle 25: Interaktion: Betrachtungsebene Schallschutz in Interaktion mit anderen Dimensionen.

8.2. STRATEGIEN SCHALLSCHUTZ

Variantenbeschreibung

Strategie A: Entkoppeln

Bauteile, die Körperschall übertragen könnten, werden getrennt. Im Falle von Böden wird die Trittschallübertragung durch Dämmlagen mit einer hohen dynamischen Steifigkeit verhindert.

Wohnungstrennwände werden zweischalig ausgeführt und akustisch getrennt.

Bei Stützen, Wänden und Trägen können durch weiche Auflager (zum Beispiel Sylomere) getrennt und entkoppelt werden.

Strategie B: Koppeln: Erhöhung von Steifigkeit und Masse

Werden die Bauteile formschlüssig und biegesteif verbunden, dann wirken die gekoppelten Bauteile zusammen. Die Masse des so gekoppelten Systems ist so erhöht, wenn mehrere Bauteile biegesteif gekoppelt werden. Dementsprechend ist mehr Energie notwendig, um das gekoppelte System zum Schwingen zu bringen. Die Schallwellen werden von den gekoppelten besser absorbiert.

Strategie C: Bekleidungen Vorsatzschalen und Schüttungen

Die verbreitete Methode im Holzbau, den Schallschutz der Bauteile zu verbessern, sind zusätzliche Bekleidungen, Schüttungen oder Estriche. Diese haben zwei Funktionen:

- Erhöhen der Masse: Je mehr Masse angeregt werden muss, umso mehr Schallenergie wird von einem Bauteil absorbiert und entsprechend weniger wird weitergeleitet.
- Entkoppelung: Wenn akustische getrennte (oder zumindest bedämpfte) Schichten oder Schalen verhindern die Weiterleitung von Körperschall. Bei mehrschaligen Aufbauten entsteht ein Masse-Feder-Masse-System, bei dem die Schallabsorption von der Masse und der Unterschiedlichkeit der Massen der Schalen abhängt.

Synergien Schallschutz

Strategie A: Entkoppeln

Die Trennung der tragenden und aussteifenden Bauteile reduziert die Kraftübertragung. Insbesondere bei den Stützen, bei denen hohe Lasten auf kleiner Fläche übergeben werden müssen. Dieses Prinzip steht dem Ansatz von form- und kraftschlüssigen Verbindungen diametral entgegen.

In den Modellvorhaben sind einzelne Bauteile entkoppelt ausgeführt: Zum Beispiel sind die Wohnungstrennwände auf Schalldämmlager (Sylomeren) aufgelagert, um die Schallübertragung zu verhindern. Allerdings sind die Stützen und aussteifenden Wände kraftschlüssig verbunden und folgen der Strategie B.

Strategie B: Koppeln: Erhöhung von Steifigkeit und Masse

Das Koppeln und verbinden von Bauteilen entspricht dem Grundprinzip des Bausystems. Allerdings ist die schalldämmende Wirkung nicht einfach nachzuweisen. Es gibt keine numerischen Verfahren oder Simulationen, um das Verhalten solcher komplexen Strukturen zu berechnen.

Strategie C: Bekleidungen Vorsatzschalen und Schüttungen

Direkte Bekleidungen, Vorsatzschalen und Schüttungen sind effektiv für den Schallschutz. Mit der geeigneten Konstruktion lassen sich für alle gängigen Anforderungen die erforderlichen Schalldämmmaße nachweisen. Allerdings steigt der Aufwand je höher die Anforderungen sind. Die Bauweisen sind effektiv und leicht nachweisbar sind. Allerdings handelt es sich um additive Maßnahmen, deren Funktionsweise bei verschiedensten Grundkonstruktionen hinzufügen lassen und keine spezifische Synergie mit den form- und kraftschlüssigen Holzbauweisen entfalten.

Ein Vorteil der zusätzlichen Schichten (Bekleidungen, Vorsatzschalen, Schüttungen und Estriche) ist, dass diese mit mineralischen Baustoffen ausgeführt werden können, die zum einen nicht brennbar sind um im Falle von gipsbasierten Baustoffen eine feuerhemmende Wirkung haben.

8.4. BETRACHTUNGSEBENE

WÄRMESCHUTZ

INTERKATION MIT...

	Beschreibung	INTERKATION MIT...	
		TRAGWERK	BRANDSCHUTZ
<u>Grundkonstruktion A:</u> Skelettbau Holzrahmenbau Holztafelbau	Gefachedämmung (Wände und/oder Decken) - Hohlräume ausgedämmt: - GKL3: Brennbare Dämmung - GKL 4 und 5: Nicht brennbare Dämmung - zusätzliche Dämmschicht über	+	+
<u>Grundkonstruktion B:</u> Massivholz	aussenliegende Dämmschichten - GKL3: Brennbare Dämmung - GKL 4 und 5: Nicht brennbare Dämmung - Häufig ist eine Unterkonstruktion erforderlich, um die Fassade anzuschließen	○	+

8.5. BETRACHTUNGSEBENE

LUFTDICHTHEIT

INTERKATION MIT...

	Beschreibung	INTERKATION MIT...	
		TRAGWERK	BRANDSCHUTZ
<u>VAR A:</u> Dichte Bauteilanschlüsse Abkleben	Abkleben - Form- und kraftschlüssige Anschlüsse sind nicht dauerhaft ausreichend luftdicht - Abkleben mit Klebebändern - Konflikt bei sichtbaren Holzoberflächen		+
<u>VAR B:</u> Folien	Zusätzliche Folien - Dampfsperre - Windbremse - Anschluss an die Bauteile meist auch mittels Klebebändern	--	+

Tabelle 26: Interaktion: Betrachtungsebene Wärmeschutz in Interaktion mit anderen Dimensionen.

Tabelle 27: Interaktion: Betrachtungsebene Luftdichtheit in Interaktion mit anderen Dimensionen.

	THERMISCHE BAUPHYSIK			GWP / CO ₂ KOSTEN
	SCHALLSCHUTZ	WÄRMESCHUTZ	LUFTDICHTHEIT	
	-		-	
• Leichte Bauweise, wenig Schallschutz			• Viele Fugen + Anschlüsse	
	+		+	
• Schwere Bauteile verbessern Schallschutz			• Große homogene Bauteile	
	+	++		
• Luftdichtheit wichtig für Luftschallübertragung		• Verhindert Konvektion + Kondensat		
	+			
• Luftdichtheit wichtig für Luftschallübertragung				

8.4. BETRACHTUNGSEBENE WÄRMESCHUTZ

Beschreibung der Varianten

Für den Wärmeschutz hängt die Ausführung maßgeblich von der gewählten Grundkonstruktion des Bauteils ab. Unterschieden werden aufgelöste (skeletthafte) Konstruktionen, wie Holzrahmen- und Holztafelbau, Holzbalkendecken und massive Holzwände und Decken (Brettsperrholz, Brettsschichtholz, Brettstapel).

Grundkonstruktion A (Skelettbau, Holzrahmenbau, Holztafelbau):

Bei den aufgelösten Konstruktionen entstehen zwischen den lastführenden Bauteilen geometrische Räume, die ausgedämmt werden können. Im Allgemeinen besteht jedoch die Notwendigkeit eine zusätzliche vollflächige dünnere Dämmschicht vor die gesamte Konstruktion aufzubringen, die Stützen, Ständer und Unterzüge überdeckt. So wird der Wärmeverlust über die Holzbauteile wie Ständer oder Träger reduziert, die einen geringeren Dämmwert als die Dämmung der Hohlräume oder Gefache hat. Auch wird dadurch vermieden, dass es an Wärmebrücken zu Kondensat kommt.

Grundkonstruktion B (Massivholz mit außenliegender Dämmung)

Die massiven Holzschichten haben einen nicht ausreichenden Dämmwert für energie-effiziente Gebäude. Es werden mit zusätzlichen Dämmschichten aufgebaut, die bauphysikalisch sinnvoll außen aufgebracht wird, um den Taupunkt der Konstruktion außen zu halten.

Synergien Wärmeschutz

Grundkonstruktion A:

Synergien zwischen den zusätzlichen Dämmschichten gibt es beim Brandschutz, wenn diese als nichtbrennbare Dämmung (Schmelzpunkt $> 1000^\circ$ Cel.) ausgeführt werden, weil diese dann als Brandschutzverkleidung angesetzt werden können.

Grundkonstruktion B:

Auch bei dieser Bauweise können mineralische Dämmungen als Brandschutzbekleidung wirksam sein.

Die massiven Konstruktionen sind in Hinblick auf den Materialverbrauch ineffizient, weil der konstruktive Aufwand für die exzentrischen Fassaden hoch ist.

8.5. BETRACHTUNGSEBENE LUFTDICHTHEIT

VAR A: Dichte Bauteilanschlüsse und/oder Abkleben

Die Rauchdichtheit ist ein wesentlicher Bestandteil des Brandschutzs. Luftdichtheit ist im Holzbau wesentlich, weil selbst kleine Leckagen in der Außenwand zu Konvektion und in Folge Kondensat im Bauteil kommen kann.

Die konstruktive oder geometrische Lösung, um dichte Bauteilanschlüsse zu konstruieren ist, wenn die Fügung der Bauteile luftdicht konstruiert werden. Dichte Anschlüsse sind durch versetzte Anschlüsse und Federn zu gewährleisten. Die geometrischen Verschränkungen und/oder Federn bedeuten ein Aufwand in der Konfektion der Bauteile und der Montage. Insbesondere Federn, die aus Sperrholz gefertigt werden können, sind in der Montage von großen Bauteilen eine Herausforderung, weil die dichtende Wirkung sich nur einstellt, wenn die Federn ohne Fugen eingebaut werden. Auch sind die Toleranzen am Bau ein Problem für dichte Bauteilanschlüsse.

Im Holzbau führen Verformungen (Quellen, Schwinden, Verwerfungen) auch bei einer passgenauen Montage unter Umständen zu Fugen. Dies kann bei stumpfen Anschlüssen nicht sichergestellt werden, weil sich Holz verformt bei wechselnden Temperaturen und Feuchtigkeit und so Fugen entstehen.

Zuverlässig und ohne größeren Aufwand lassen sich luftdichte Anschlüsse herstellen, wenn die Fuge unter dauerhaft belastet wird: Decken, die auf Träger aufliegen schließen im Allgemeinen luftdicht, weil das Eigengewicht verhindert, dass sich Fugen bilden.

In der Baupraxis werden solche Anschlüsse und Fugen meist mit Fugenbändern oder Klebebändern abgedichtet.

VAR B: Folien

Wind- und dampfdichte Folien werden eingesetzt, um luftdichte Ebenen und Anschlüsse herzustellen. Insbesondere bei teilweise sichtbaren Holzoberflächen, wie zum Beispiel die sichtbaren Stützen im Modelvorhaben in Heidelberg, dann werden die eingesetzten Folien um die Bauteile herumgeführt.

Die Anschlüsse der Folien an den Rändern und zwischen den Bahnen müssen im Allgemeinen mit Klebebändern umgesetzt.

VAR A: Dichte Bauteilanschlüsse und/oder Abkleben

Wenn auf Folien und Abklebungen verzichtet wird, dann ist bei Bauteilen, die nicht durch Auflasten zusammengehalten werden immer mit Undichtigkeiten zu rechnen. Es wäre im Anschluss an diese Studie zu prüfen, ob sich vergleichsweise einfache lineare Anschlussdetails entwickeln lassen, die auch die Luft- und Rauchdichtheit von Nur-Holz-Konstruktionen gewährleisten. Im Moment sind nur Lösungen denkbar, die vergleichsweise aufwendig und nicht praxistauglich sind, wie Sperrholzfedern.

VAR B: Folien

Der Einsatz von Folien ist eine additive Technik, die unabhängig von der Grundkonstruktion eingesetzt werden kann. Sie hat also keine spezifischen Vor- oder Nachteile im Hinblick auf die gegenständliche Holzkonstruktion mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen. Es lassen sich aber bei dieser Konstruktion auch keine Synergien finden.

8.1. BEWERTUNG DES ENTWICKLUNGSSTAND

Bei der Beurteilung des Entwicklungsstands konnte im Kerngebiet des Forschungsvorhabens - der Entwicklung eines Tragwerks mit form- und kraftschlüssigen Verbindungen - der Nachweis der Praxisreife der Bauweise erbracht werden. Drei Gebäude in der Gebäudeklasse 4 und 5 wurden in Baden-Württemberg und Hessen umgesetzt. Der Verzicht auf die metallischen Verbindungsmittel hat dabei nicht zu wesentlichen Kostensteigerungen geführt, wie in einem vorgelagerten Forschungsvorhaben nachgewiesen werden konnte.⁸¹

Die Synergien zu den anderen untersuchungsgegenständlichen Aspekten – Brandschutz, Schallschutz, thermische Bauphysik (Wärmeschutz, Feuchteschutz und Luftdichtheit) – haben durch die Novellierung der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise - MHolzBauRL:2020-10 im Laufe des Forschungsprojekts eine grundlegende Veränderung erfahren. Bis zur Einführung der MHolzBauRL im Jahr 2020 waren auch Gebäude in Gebäudeklasse 4 und 5 ohne eine Brandschutzbekleidung denkbar, wenn ein entsprechendes Brandschutzkonzept erarbeitet wurde. Die MHolzBauRL:2020-10 begrenzt den möglichen Anteil an sichtbarem Holz deutlich, indem nur 25 % der Wände oder die Decken holzsichtig sein dürfen. Durch diese Vorgaben wird auch die Möglichkeit von sortenreinen Holzkonstruktionen in den Gebäudeklassen 4 und 5 stark eingeschränkt. So lassen sich die zusätzlichen Bekleidungen aus Gipsfaser nur mit metallischen Verbindungsmitteln befestigen. Durch die Bekleidungen lassen sich aber andere Anforderungen, wie Schallschutz, Wärmeschutz und Luftdichtheit verbessern. Das Ergebnis ist ein Hybrid, der im Hinblick auf die Anforderungen leistungsfähig ist, aber nicht der Grundidee einer Nur-Holz-Bauweise entsprechen.

¹ Hans Drexler et al., "Holz: Form- und kraftschlüssig – Entwicklung eines Vollholz-Bausystems mit form- und kraftschlüssigen geometrischen Verbindungen," accessed January 22, 2020, <https://www.baufachinformation.de/holz-form-und-kraftschluessig/fb/253213>.

8.2. AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Weitere Knotenpunkte und Anschlussdetails

In der bisherigen Forschung wurden eine Reihe von Anschlusspunkten (Knoten) und Details entwickelt, die für die gewählten Tragwerke notwendig waren. Für die weitere Forschung ist es sinnvoll, einen Katalog von Bauteilen und Anschlüssen zu erarbeiten, auf den weitere Projekte zurückgreifen können.

Als herausfordernd haben sich insbesondere Zugverbindungen beispielsweise bei zugbelasteten Stützen erwiesen. Auch die Durchleitung von Drucklasten durch Träger und Decken, die in den Modelvorhaben mit einem Schwert aus Furnierschichtholz mit höherer Druckfestigkeit gelöst wurden, lassen sich weiter optimieren.

Brandschutz

Der weitere Forschungsbedarf für die Bauweise liegt vor allem im Bereich des Brandschutzes. Das ökologische und ökonomische Potential der Nur-Holz-Bauweisen liegt in der Sortenreinheit, Einfachheit und der sich daraus ergebenden Rückbau- und Wiederverwendbarkeit. Wenn durch die Anforderungen des Brandschutzes Bekleidungen, unabhängig von der darunterliegenden Holzbauweise, notwendig sind, dann werden diese Vorzüge konterkariert. Die Frage des Brandschutzes und die Erforschung und Optimierung des Brandverhaltens von Holzgebäuden ist ganz unabhängig von der forschungsgegenständlichen Bauweise ein wesentliches Forschungsfeld für den Holzbau.

In der Planungs- und Genehmigungspraxis werden an den Holzbau Anforderungen herangetragen, die die Konstruktionen aufwendig, das heißt ökologisch und ökonomisch weniger effizient machen. In der weiteren Diskussion, die nicht nur wissenschaftlich, sondern auch politisch und gesamtgesellschaftlich zu führen ist, sind auch diese Schutzziele kritisch zu hinterfragen. Unstreitig ist die Notwendigkeit, Menschen im Brandfall sicher und mit ausreichender Geschwindigkeit zu retten. Diskutiert werden sollte, ob die Notwendigkeit, wirksame Löscharbeiten einzuleiten und durchzuführen, nicht in die Verantwortung der Bauherrschaft übergeben werden könnte. Abstandsflächen und technische Anforderung an Bauteile, die Gebäude trennen, stellen generell sicher, dass ein Brand nicht auf benachbarte Gebäude überschlagen kann. Wenn alle Menschen aus dem Gebäude geflüchtet oder gerettet sind, kann das Gebäude auch kontrolliert abbrennen

und verursacht nur einen wirtschaftlichen Schaden für die EigentümerInnen (und die Versicherungen).

Zum Beispiel sind in dem Modellvorhaben in Heidelberg aus jeder Wohnung zwei bauliche Rettungswege in Form eines Laubengangs aus Beton gebaut. Diese ermöglichen auch im Brandfall allen Menschen mit oder ohne Bewegungseinschränkungen für mehr als 60 Minuten die Flucht aus dem Gebäude. Eine vernetzte Alarmierung sorgt dafür, dass alle Menschen im Brandfall alarmiert werden und schnell das Gebäude verlassen. Es wäre also denkbar, dass darüber hinaus die Maßnahmen des Brandschutzes auf ein Minimum reduziert werden, weil das oberste Schutzziel - die Rettung von Personen - auch mit einem geringeren Aufwand erreicht wird.

Wenn die Rettung der Menschen gewährleistet und durch die Abstände des Gebäudes zu anderen Gebäuden und/oder Brandwände ein Überschlag auf die Nachbarbebauung ausgeschlossen werden kann, dann muss im Hinblick auf die öffentlichen Interessen auch nicht gelöscht werden. Ob das Gebäude anschließend abbrennt oder gelöscht werden kann, ist eine wirtschaftliche Entscheidung der EigentümerIn, die diese gegebenenfalls mit der Versicherung abstimmen müsste. Relevant scheint in diesem Zusammenhang auch, dass viele Feuerwehren die Löschung bei Gebäuden mit großen PV-Anlagen ohnehin ablehnen, weil sie die Risiken aus dem Reststrom in den PV-Anlagen nicht eingehen wollen. In diesen Fällen ist der konstruktive Aufwand für eine Standsicherheit über den Zeitpunkt der Evakuierung irrelevant, weil das Gebäude ohnehin kontrolliert abbrennt. Für die Zukunft des Holzbaus wäre eine genauere Unterscheidung zwischen den einzelnen Schutzzielen des Brandschutzes und den notwendigen Maßnahmen sinnvoll, die eine erhebliche Reduktion des konstruktiven Aufwands ermöglichen kann.

Thermische Bauphysik

Was die Luftdichtheit angeht, wäre es interessant, lineare Bauteilanschlüsse zu entwickeln, die kraftübertragend wirken, aber gleichzeitig dauerhaft und verformungsstabil einen luft- und rauchdichten Anschluss gewährleisten. Es sind Lösungen wie Versätze sowie Nut-und-Feder denkbar. Der Aufwand für Herstellung und Montage müsste reduziert werden. Zur bautechnisch einfacheren Umsetzung der luftdichten Ebene, deren Fehlertoleranz und der Nachhaltigkeit der verwendeten Materialien ist es sinnvoll, die in diesem Bericht dargestellten Varianten hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile für die Zielsetzungen des Bausystems näher zu untersuchen.

Zur Reduktion der weniger gedämmten aussteifenden Außenwänden wäre zu untersuchen, in wie weit die aussteifenden Wände teilweise oder gänzlich innerhalb des beheizten Volumens realisierbar sind. Der gänzliche Verzicht von aussteifenden Elementen in der Außenwand würde auch den Aufwand

für die Berechnung der Wärmebrücken reduzieren. Alternativ wäre die Optimierung der aussteifenden Außenwand im Hinblick auf den Wärmeschutz sinnvoll, um die Schwachstellen zu reduzieren und das Erfordernis der Kompensation an anderer Stelle zu minimieren.

Zur wirtschaftlich sinnvollen und technisch umsetzbaren Minimierung der Wärmebrückeneffekte wäre eine Untersuchung zu verschiedenen Unterkonstruktionen der hinterlüfteten Fassade sinnvoll.

Zur feuchteschutztechnisch einfacheren Umsetzung der Bodenplatte, zur Reduktion der verbauten Energie und zur Erhöhung der Rückbaubarkeit der Bodenplatte wäre die Prüfung von alternativen zur konventionellen Flachgründung mittels Stahlbetonbodenplatte nützlich (zum Beispiel aufgeständerte Bodenplatte in Holzbauweise).

Eine Vereinheitlichung der vier im Modellvorhaben umgesetzten Wandaufbauten würde das Bausystem wesentlich vereinfachen. Generell wäre eine Vereinfachung und Vereinheitlichung des Bausystems in Hinblick auf den Planungsaufwand zweckmäßig und würde dem Ausbau der Praxis-tauglichkeit dienen. Für die einfache Erstellung eines detaillierten Wärmebrückennachweises ist es wünschenswert, für das Bausystem einen Wärmebrücken-katalog zu entwickeln, der für den Nachweis der Wärmebrücken für zukünftige Projekte herangezogen werden kann. Hierzu bietet es sich an, die Ausführungsdetails weiter zu standardisieren.

10

ANHANG

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER GRAPHIKEN

TABELLENVERZEICHNIS

LITERATURLISTE

LISTE DER ABKÜRZUNGEN

10.1. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Wo in Abbildung/Grafik/Tabelle nicht weiter aufgeführt oder explizit erwähnt, kann als Quelle, beziehungsweise als Urheberrechtinhaber angesehen werden: DGJ Architektur GmbH, Frankfurt am Main.

- Abbildung 1: Residenz in Shosei-en Garden aka. Kikoku-tie, Kyoto, 1657, Ishikawa Jozan (1583-1672), Foto: Hans Drexler, 2016. Seite: 33.
- Abbildung 2: Holzrahmenbau; Quelle: PK-Media Consulting GmbH. Seite: 43.
- Abbildung 3: Links: Ausbildung der Tragwerksknoten, Lukas Lang Building Technologies GmbH Seite: 45.
- Abbildung 4: Rechts: Lukas Lang Building Technologies GmbH; Montage Fassade. Seite: 45.
- Abbildung 5: Das Wandelement 4.0 – LENO®, Ed. Züblin AG, ZÜBLIN Timber GmbH, https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/ZUEBLIN_Timber_LENO_ADD_DE.pdf Seite: 49.
- Abbildung 6: Links: Fertigung der Module, Quelle: Kaufmann Bausysteme. Seite: 51.
- Abbildung 7: Rechts: Montage der Raummodule auf der Baustelle, Quelle: Kaufmann Bausysteme. Seite: 51.
- Abbildung 8: Quelle: Lignatools Lignatool e.U., AU-Kufstein, schwalbenschwanz.html Seite: 53.
- Abbildung 9: Handwerkliche Fertigung von Holzverbindungen, Bildquelle: Lignatool e.U.;AT-Kufstein, <http://www.lignatool.at> Seite: 53.
- Abbildung 10: Abbundanlage, Bildquelle: Hans Hundegger AG, Kemptener Straße 1, D-87749 Hangwangen; Abbundmaschinen K2i und ROBOT-Drive, <https://www.hundegger.de/de/maschinenbau/produkte.html>. Seite: 53.
- Abbildung 11: Timber Prototype I, Münster School of Architecture 2012-2013 und Terhalle Holzbau, V.-Prof. Hans Drexler und Studierende der MSA. Foto: Hans Drexler. Seite: 54.
- Abbildung 12: Timber Prototype House, IBA Thüringen, Foto: Thomas Müller. Seite: 55.
- Abbildung 13: Timber Prototype House, IBA Thüringen, Verbindung Rahmenecke, Foto: Hans Drexler und Studierende der JHS. Seite: 56.
- Abbildung 14: Links: dgj244 Greenhouse, Case Study für das Bausystem 2020, Foto: Hans Drexler Seite: 65.
- Abbildung 15: Links: Nut-Feder-Verbindung zwischen Wand und Stütze. Mitte: Deckenaufleger. Rechts: Zapfenverbindung zwischen Stützen und Trägern. Seite: 98.
- Abbildung 16: Transportmodul des Demonstrationsbaus. Seite: 99.
- Abbildung 17: X-Fix-C Verbinder (Quelle: Schilcher Trading & Engineering GmbH, <http://www.x-fix.at/de/x-fix-c/>). Seite: 102.
- Abbildung 18: Montageschritte für den Anschluss zwischen Deckenelement, Unterzug und aussteifender Wand. Seite: 103.
- Abbildung 19: Montageschritte für den Knotenpunkt zwischen Stützen, Unterzug und Deckenelementen am Geschossübergang. Seite: 105.
- Abbildung 20: Ausbildung der Kohleschicht um tragenden Restquerschnitt (Quelle: TU München, in Quelle: Kaufmann, Hermann et al (2017): Atlas mehrgeschossiger Holzbau, München: Detail Business Information GmbH). Seite: 126.
- Abbildung 21: X-Fix Verbinder im Modellprojekt „dgj223 Collegium Academicum“, Heidelberg. Seite: 133
- Abbildung 22: Schiebewände als Trennwand in der Wohnung beim Modellvorhaben des Studierendenwohnheims Collegium Academicum. Foto: Thilo Ross Seite: 167.
- Abbildung 23: Im Teststand realisierter Beispielausschnitt aus der Planung, Foto: DGJ Architektur. Seite: 170.
- Abbildung 24: Umlaufender elastischer Dichtungstreifen zur Entkopplung der Beplankungslagen bei Tafelbauwänden. Foto: Carina Bauer. Seite: 173.
- Abbildung 25: Montage des Ständerwerks im Teststand. Foto: Carina Bauer. Seite: 174.
- Abbildung 26: Fertig eingebaute Regalwand im Teststand. Foto: Carina Bauer. Seite: 175.
- Abbildung 27: Links und rechts: Auskleidung der Fugen mit Filz und Dichtungsprofilen. Foto: Carina Bauer. Seite: 177.
- Abbildung 28: Eingebaute Schiebewand im Teststand. Foto: Carina Bauer. Seite: 177.
- Abbildung 29: Montagefehler beim Bau des Teststandes: Schallbrücken durch nicht durchgängige Trennung der Estrichlagen zwischen den Räumen. Foto: Carina Bauer. Seite: 182.
- Abbildung 30: (links) Durchbruch für Nachströmung der Lüftung. Fotos: Carina Bauer. Seite: 185.
- Abbildung 31: (mittig) Ertüchtigung der Lüftungsöffnung mit einem Überströmelement mit Schalldämmung. Fotos: Carina Bauer. Seite: 185.
- Abbildung 32: (rechts) Überströmelement mit Schalldämmung. Fotos: Carina Bauer. Seite: 185.
- Abbildung 33: Herstellung des Ständerwerks für die zweischalige Innenwand TW05 Foto: Carina Bauer. Seite: 222.
- Abbildung 34: Aufbauschritte zweischalige Ständerwand TW05. Fotos: DGJ Architektur, 04.04.2019.

- Seite: 223.
- Abbildung 35: Montage der Beplankung an Ständerwänden. Foto: Carina Bauer. Seite: 224.
- Abbildung 36: Aufbau der zweischalige Ständerwand TW03. Fotos: DGJ Architektur, . Seite: 225.
- Abbildung 37: Einsetzen der Schiebewandelemente. Foto: Carina Bauer. Seite: 226.
- Abbildung 38: Aufbau der einfachen Schiebewand TW01 Fotos: DGJ Architektur, 08.04.2019. Seite: 227.
- Abbildung 39: Testaufbau der Schiebewand mit verschiedenen Materialoptionen. Seite: 229.
- Abbildung 40: Optimierung der Führungsfugen in der Schiebewandschwelle. Seite: 229.
- Abbildung 41: Aufbau der Regalwände. Foto: Carina Bauer. Seite: 230.
- Abbildung 42: Aufbauschritte der Regalwand TW02 im Zeitablauf, Aufbauzeit im Versuch von 14:27 Uhr bis ca. 19:30 Uhr bis zur kompletten Fertigstellung im Eigenbau. Fotos: DGJ Architektur, 09.04.2019. Seite: 231.
- Abbildung 43: Ertüchtigung Regalwand TW02.1 mit Sandsäcken. Fotos: DGJ Architektur, 09.04.2019. Seite: 231.
- Abbildung 44: Ertüchtigung Regalwand TW02.2 mit Mineralwolle. Fotos: DGJ Architektur, 09.04.2019. Seite: 231.
- Abbildung 45: Werkstatt für Eigenleistungen; Foto: Collegium Academicum. Seite: 233.
- Abbildung 46: Montagebeginn. Seite: 234.
- Abbildung 47: Aufstellung Außenwand 1. Seite: 234.
- Abbildung 48: Aufstellung Außenwand 2. Seite: 234.
- Abbildung 49: Aufstellung Außenwand 3. Seite: 234.
- Abbildung 50: Montage innenliegende Trennwand. Seite: 234.
- Abbildung 51: Stützen. Seite: 235.
- Abbildung 52: Hauptträger. Seite: 235.
- Abbildung 53: Aussteifende Innenwände. Seite: 235.
- Abbildung 54: Decken. Seite: 235.
- Abbildung 55: Bad/Nasszelle. Seite: 235.
- Abbildung 56: Deckenträger. Seite: 235.
- Abbildung 57: Beginn der Montage einer Außenwand. Foto: DGJ Architektur. Seite: 236.
- Abbildung 58, Abbildung 59: Montage eines Fassadenelement Fotos: DGJ Architektur,) Seite: 236.
- Abbildung 60: Links: Nut eines Fassadenpfostens. Rechts: Aufnehmende Ebene im Geschossboden. Seite: 237.
- Abbildung 61: Fügung der Fassadenteile. Seite: 237.
- Abbildung 62: Montageprozess Wandelemente beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 238.
- Abbildung 63: Montageprozess Wandelemente beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 238.
- Abbildung 64: Montageprozess Stützen beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 239.
- Abbildung 65: Befestigung Stützen mit Schallentkoppelung beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 239.
- Abbildung 66: Montageprozess Unterzüge beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 240.
- Abbildung 67: Detail einer Holzbalkenmontage mit Fügung. Fotos: DGJ Architektur, Seite: 240.
- Abbildung 68: Montageprozess Unterzüge beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 241.
- Abbildung 69: Montageprozess Unterzüge beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 241.
- Abbildung 70: Montageprozess aussteifende Innenwände beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 242.
- Abbildung 71: Montageprozess aussteifende Innenwände beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 242.
- Abbildung 72: Montageprozess aussteifende Innenwände beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 243.
- Abbildung 73: Montageprozess aussteifende Innenwände beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 243.
- Abbildung 74: Montageprozess Deckenträger beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 244.
- Abbildung 75: Montageprozess Deckenträger beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 244.
- Abbildung 76: Montageprozess Deckenträger beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 244.
- Abbildung 77: Montageprozess Deckenträger beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 245.
- Abbildung 78: Montageprozess Deckenträger beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 245.
- Abbildung 79: Montageprozess Nasszellen beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 246.
- Abbildung 80: Montageprozess Nasszellen beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 247.
- Abbildung 81: Montageprozess Nasszellen beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 247.
- Abbildung 82: Montageprozess Nasszellen beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 247.

- Abbildung 83: Montageprozess Deckenelemente beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 248.
- Abbildung 84: Montageprozess Deckenelemente beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 248.
- Abbildung 85: Montageprozess Deckenelemente beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 248.
- Abbildung 86: Montageprozess Deckenelemente beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 249.
- Abbildung 87: Montageprozess Deckenelemente beim Modellvorhaben Fotos: DGJ Architektur, Seite: 249.
- Abbildung 88: Open Architecture - Nachhaltiger Holzbau mit System, Hans Drexler, Jovis Berlin, 2020 Seite: 253.
- Abbildung 89: Case Study 1: dgj223 IBA Heidelberg, 2015-2020, Modell 1/50, Quelle: DGJ Architektur, 2017. Foto: Hans Drexler, 2018. Seite: 254.
- Abbildung 90: Leitbild des Modellprojekts dgj223 Collegium Academicum: Veranschaulichung der flexiblen Grundrisse, Quelle: DGJ Architektur, 2017. Foto: Hans Drexler, 2018. Seite: 255.
- Abbildung 91: Vorangehende Doppelseite: Östliche Fassade des Collegium Academicum. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 256, 257.
- Abbildung 92: Luftaufnahme während der Bauphase, 2022. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 262.
- Abbildung 93: Blick in den Innenhof mit Laubengängen in westlicher Richtung, 2023. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 263.
- Abbildung 94: Innenraum mit Holzwänden. Auf dem Boden sind die Holzschwelle sichtbar, die die Grundrisse für die versetzbaren Innenwände markieren. Nehmen die Schwelle eine Trennwand auf, werden die hier sichtbaren, flachen Schwelle durch Führungsschienen mit entsprechenden Rillen ersetzt. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 264.
- Abbildung 95: Blick in den Innenraum mit versetzbarer Trennwand rechts im Bild und austauschbarer Führungsschiene mit Rillen im Boden. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 266.
- Abbildung 96: Montage der Trenn- und Innenwände im Selbstbau. Foto: Carina Bauer. Seite: 266.
- Abbildung 97: Holzstütze und Raumteiler einer Studierendenwohnung. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 267.
- Abbildung 98: Selbstgebaute Möbel für die Studierendenwohnungen. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 267.
- Abbildung 99 - 101: Aufnahmen des Veranstaltungsraums/der Aula des Collegium Academicum, 2024. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 268, 269.
- Abbildung 102: Case Study 2: dgj228 Wohngruppe ‚Gemeinsam Suffizient Leben‘: Modell im Maßstab 1/50, Frankfurt am Main. Foto: Hans Drexler, 2019. Seite: 270.
- Abbildung 103: Vorangehende Doppelseite: dgj228 Wohngruppe ‚Gemeinsam Suffizient Leben‘, westliche Fassade zur Friedberger Landstraße hin. Die adressbildende hinterlüftete Glas-Fassade wurde von DGJ Architektur speziell entwickelt und wirkt entlang der farblich monotonen Häuserzeile der Friedberger Landstraße als Blickfang: Heiter und lebendig, mit warmen Farbtemperaturen. Beim Rückbau können sowohl Profilgläser als auch das Aluminium leicht getrennt und recycelt werden, weil die Fassade mit lösbaren Schraub- und Steckverbindungen gefertigt ist. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 272, 273.
- Abbildung 104: dgj228 Wohngruppe ‚Gemeinsam Suffizient Leben‘: Modell des Grundrisses einer in der Quadratmeterzahl reduzierten Wohnraums, Maßstab 1/50, Frankfurt am Main. Foto: Hans Drexler, 2019. Seite: 275.
- Abbildung 105: dgj228 Wohngruppe ‚Gemeinsam Suffizient Leben‘, westliche Fassade zur Friedberger Landstraße hin. Dachansicht mit PV-Anlage. Das Gebäude erreicht KfW-Programm 153- sowie Frankfurt-Aktivhaus-Standard, besitzt außerdem eine hochdämmende Gebäudehülle, und, neben der hinterlüfteten Fassade, eine Luft-Wärme-Pumpe. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 278, 279.
- Abbildung 106: Großzügige Fensteröffnungen, Einbaumöbel, ausreichende Stauräume im Keller und reduzierte Verkehrsflächen gewährleisten eine hohe Lebensqualität in den Wohnungen. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 280.
- Abbildung 107: Die Friedberger Landstraße gehört zu den Hauptverkehrsadern von Frankfurt am Main. Entsprechend hoch waren die Ansprüche an den Schallschutz. Die Fassade ist eine einschalige Fensterkonstruktion, die sowohl den Wärme- als auch den Schallschutzanforderungen entspricht und die im Holzbau anspruchsvollen Einbaudetails zur Verhinderung der Flankenschallübertragung technisch umsetzt. Der Einsatz der Profilgläser als schallentkoppelte Schicht vor der vergleichsweise leichten Holz-Außenwand verbessert den Schallschutz wesentlich. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999,

Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 280.

- Abbildung 108: Im EG befindet sich eine Kita, die sich als Angebot an das ganze Quartier richtet, im Bild Aufenthaltsraum mit zukünftiger Küche. Das Gebäude wurde außerdem durch das „Frankfurter Programm für familien- und seniorengerechten Mietwohnungsbau“ gefördert. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 281.
- Abbildung 109: Der Kita angeschlossen ist ebenfalls ein Außenraum mit kleinem Spielplatz und Garten, die von der zur Friedberger Landstraße abgekehrten Seite des Gebäudes erreichbar sind. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 281.
- Abbildung 110: Rückwärtige, der Friedberger Landstraße abgewandte Seite des Gebäudes mit entstehendem Garten, Spielplatz und gemeinschaftlichem Außenraum, rechts im Bild der Tiefparker und die E-Ladestation. Foto: Urheberrecht Thilo Ross Urh. Nr. 4026999, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 282, 283.
- Abbildung 111: X-Fix Verbinder, Fugen ausgestopft mit Mineralwolle. Seite: 284.
- Abbildung 112: Montage der Decken, dgj228. Seite: 285.
- Abbildung 113: Montage der Decken, dgj228. Seite: 285.
- Abbildung 114: Montage der Decken, dgj228. Seite: 285.
- Abbildung 115: dgj253 Wohngruppe Mannheim, 2019, Visualisierung Noisy Owls, Vilnius nach 3D-Modell im Auftrag von DGJ Architektur, 2019. Seite: 286.
- Abbildung 116: Vorangehende Doppelseite: dgj253 Wohngruppe Mannheim. Die Bauherrin, die „WohnWerk Mannheim eG“, will gemeinschaftliches Leben in einer familienfreundlichen und generationsübergreifenden Umgebung fördern. Auch beim „WohnWerk“ wurde die Quadratmeterzahl pro Kopf bewusst zugunsten von Gemeinschaftsflächen reduziert. Foto: Johannes Vogt, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 288, 289.
- Abbildung 117: Das „WohnWerk“ stellt einen Teil des Erdgeschosses dem Quartier zur Mitnutzung zur Verfügung, beispielsweise für ein Angebot von Gesundheitskursen oder für private Feiern. Foto: Johannes Vogt, Quelle: DGJ Architektur GmbH. Seite: 294.
- Abbildung 118: dgj253 während der Bauphase. Für das prominent direkt gegenüber dem BUGA2023 gelegenen Gebäude entwickelte DGJ ein eigenes, preisgünstiges und wartungsarmes System zur Fassadenbegrünung. Seite: 295.

10.2. VERZEICHNIS DER GRAPHIKEN

Wo in Abbildung/Grafik/Tabelle nicht weiter aufgeführt oder explizit erwähnt, kann als Quelle, beziehungsweise als Urheberrechtinhaber angesehen werden: DGJ Architektur GmbH, Frankfurt am Main.

- Graphik 1: The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration (Die Entwicklung des Anthropozäns: Die große Beschleunigung), Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney und Cornelia Ludwig: Trends von 1750 bis 2010 bei global aggregierten Indikatoren für die sozioökonomische Entwicklung. Seite: 10.
- Graphik 2: The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration (Die Entwicklung des Anthropozäns: Die große Beschleunigung), Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney und Cornelia Ludwig: Trends von 1750 bis 2010 bei Indikatoren für die Struktur und Funktionsweise des Erdsystems. Seite: 11.
- Graphik 3: Entwicklung der energetischen Standards. Seite: 20.
- Graphik 4: Measure and Construction of the Japanese House, Bildquelle: Heino Engel, Tokio, North Clarendon, 1985. Seite: 36.
- Graphik 5: Rastermaße und typische Grundrisse in traditioneller japanischer Wohnarchitektur in: Measure and Construction of the Japanese House, Bildquelle: Heino Engel, Tokio, North Clarendon, 1985. Seite: 37.
- Graphik 6: Yatoi hozo sashi, dreidimensionaler Knotenpunkt des Ashikatame Träger (Hauptträger), Sato, Hideo; Nakahara, Yasua; Nii, Koichi Paul (Übersetzer); The Complete Japanese Joinery; Vancouver, 2000. Seite: 37.
- Graphik 7: Zeichnung nach ‚General Panel System‘, Konrad Wachsmann: Axonometrie des Verbindungsstücks (endgültige Fassung), 1946-1947. Bildquelle: Konrad Wachsmann, ‚Wendepunkt im Bauen‘, Krausskopf, Wiesbaden, 1959, mit freundlicher Genehmigung von Ray Wachsmann. Zeichnung DGJ Architektur 2020. Seite: 40.
- Graphik 8: Visualisierung des Bausystems, Lukas Lang Building Technologies GmbH. Seite: 44.
- Graphik 9: Auszug von Beispielkonstruktionen aus dem Detailkatalog, Züblin Timber GmbH LENO®Brettsperrholz, Ed. Züblin AG, ZÜBLIN Timber GmbH, https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/ZUEBLIN_Timber_LENO_Brettsperrholz_2018_DE.pdf Seite: 46.
- Graphik 10: MERK-Verbindungstechnik: Befestigungssystem mit Vollgewindeschrauben MERK Verbindungstechnik und Werkzeug, Ed. Züblin AG, ZÜBLIN Timber GmbH, https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/Z%C3%BCblin%20Timber_MERK_Verbindungstechnik_2016.pdf. Seite: 47.
- Graphik 11: MERK-Verbindungstechnik: Befestigungssystem mit Vollgewindeschrauben MERK Verbindungstechnik und Werkzeug, Ed. Züblin AG, ZÜBLIN Timber GmbH, https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/Z%C3%BCblin%20Timber_MERK_Verbindungstechnik_2016.pdf. Seite: 47.
- Graphik 12: Das Wandelement 4.0 – LENO®, Ed. Züblin AG, ZÜBLIN Timber GmbH, https://www.zueblin-timber.com/fileadmin/downloads/ZUEBLIN_Timber_LENO_ADD_DE.pdf Seite: 49.
- Graphik 13: Modultypen und Anwendungen Renate Breuß; Zuschnitt 67: Raumstapel; Herausgeber: proHolz Austria; Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft zur Förderung der Anwendung von Holz; Obmann Christoph Kulterer; Bauen mit Raummodulen - Ein Überblick; September 2017, Seite 5f. Seite: 51.
- Graphik 14: 3D-Axometrie des Timber Prototype House. Seite: 57.
- Graphik 15: Die Variantenstudie vergleicht CO2-Emissionen und Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus 6 Ein- und Mehrfamiliengebäude Neubau und Sanierung 400 Variantenkombinationen. Quelle EGS Plan, Stuttgart Seite: 63.
- Graphik 16: Konstruktive Hierarchieebenen des Bausystems. Seite: 66.
- Graphik 17: Diese Seite: Geometrische Räume und Strategien, wie für diese Untersuchung definiert. Seite: 68.
- Graphik 18: Rechts: Schematische Darstellung der geometrischen Räume der Subsysteme, Skalierung zwischen „integriert“ und „differenziert“. Seite: 68.
- Graphik 19: Explosionsaxonometrie, Variante 1 – Differenzierte Ausführung. Seite: 71.
- Graphik 20: Schematischer Grundriss und Schnitt der Variante 1 – Differenzierte Ausführung, M 1:20. Seite: 73.
- Graphik 21: Explosionsaxonometrie, Variante 2 – Schichtung. Seite: 75.
- Graphik 22: Schematischer Grundriss und Schnitt der Variante 2 – Schichtung, M 1:20. Seite: 77.
- Graphik 23: Explosionsaxonometrie, Variante 3 - Ausfachung. Seite: 79.
- Graphik 24: Schematischer Grundriss und Schnitt der Variante 3 - Ausfachung, M 1:20. Seite: 81.
- Graphik 25: Explosionsaxonometrie, Variante 4 – Räumliche Überlagerung. Seite: 83.
- Graphik 26: Schematischer Grundriss und Schnitt der Variante 4 – räumliche Überlagerung, M 1:20. Seite: 85.
- Graphik 27: Übergeordnete Konstruktionsprinzipien: a) Skelettbau. b) Hybridkonstruktion. c) Massivbau. Seite: 90 - 92.
- Graphik 28: Eingabe der Gebäudeparameter und Berechnung der Holzvolumina im Planungstool, Primin Jung Deutschland GmbH und DGJ Architektur. Seite: 94.
- Graphik 29: Ergebnisfelder der Bauteilbemessung und Flächenermittlung im Planungstool, Primin Jung Deutschland GmbH und DGJ Architektur. Seite: 94.
- Graphik 30: Schematische Darstellung der bauteilintegrierten Fügung, Anschluß Träger an Stützen. Seite: 97.
- Graphik 31: Grundriss (oben) und Schnitt (unten) des Demonstrationsbaus, Maßstab 1:50. Seite: 99.
- Graphik 32: Schematische Darstellung der Fügung mit Holzverbindungsmiteln, Anschluß Träger an Stützen. Seite: 101.
- Graphik 33: Musterdetail, Anschluss zwischen Deckenelement, Unterzug und aussteifender Wand . Seite: 103.
- Graphik 34: Knotenpunkt zwischen Stützen, Unterzug und Deckenelementen am Geschossübergang. Seite: 105.
- Graphik 35: Schematischer Grundriss und Schnitte der Tragstruktur, Ausschnitt des Modellvorhabens ‚Collegium Academicum‘. 1. Druckbelastete Stützen a) Stützen in zweischaliger Wand. b) Innenstützen. c) Außenstützen. 2. Zugbelastete Stützen. a) Stützen in zweischaliger Wand. b) Innenstützen. c) Außenstützen. 3. Aussteifende Wandscheiben. a) Zweischalige Trennwand (Brandwandersatzwand). b) Aussteifende Außenwand. Seite: 107.
- Graphik 36: Positionen und Details druckbelasteter Innenstützen – Bodenanschluss, Geschossübergang, Dachanschluss. Seite: 109.
- Graphik 37: Positionen und Details zugbelasteter Innenstützen – Bodenanschluss, Geschossübergang, Dachanschluss. Seite: 111.
- Graphik 38: Positionen und Details aussteifender Außenwände – Bodenanschluss, Geschossübergang, Dachanschluss. Seite: 113.
- Graphik 39: Positionen und Details aussteifender Wohnungstrennwände – Bodenanschluss, Geschossübergang, Dachanschluss. Seite: 115.
- Graphik 40: Übersicht Musterdetails Holzverbindungsmitel. Seite: 116, 117.
- Graphik 41: Temperaturen infolge der Temperaturzeitkurve (ETK) in Abhängigkeit von der Zeit. Quelle: <https://www.heissbemessung.net/Infothek/Braende/ETK.html>. Seite: 127.
- Graphik 42: Idealisieretes Temperatur-Zeit-Diagramm eines Zimmerbrandes, nach Karlsson und Quintiere; Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Raumbrand-flashover.svg>; Public domain, via Wikimedia Commons Autor: Chris828. Seite: 129.
- Graphik 43: Schwalbenschwanz, Quelle: NR Ingenieurgesellschaft holztragwerke mbh; Mönchengladbach, <https://www.ing-tools.de/module/schwalbenschwanz>. Seite: 132.
- Graphik 44: Regelgeschoss des Modellvorhabens in Heidelberg Quelle: Meides & Schoop GbR Seite: 140.
- Graphik 45: Positionsplan der Brandschutzanforderungen für einen repräsentativen Ausschnitt des Modellvorhabens. Seite: 141.
- Graphik 46: Bauteilaufbau der Wohnungs- trennwand in Holzmassivbauweise. Seite: 142.
- Graphik 47: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand in Tafelbauweise. Seite: 142.
- Graphik 48: Brandschutzfunktionen der Bauteilschichten der Wohnungstrennwände. Seite: 143.
- Graphik 49: Zugelassener Bauteilaufbau einer Trennwand in Holzmassivbauweise (Quelle: dataholz.eu). Seite: 144.
- Graphik 50: Zugelassener Bauteilaufbau einer Trennwand in Tafelbauweise (Quelle: lignumdata.ch). Seite 144.
- Graphik 51: Bauteilaufbau der Geschosstrenndecken Seite: 147.
- Graphik 52: Brandschutzfunktionen der Bauteilschichten der Wohnungstrennwände. Seite: 147.
- Graphik 53: Zugelassener Bauteilaufbau einer Geschosstrenndecke (Quelle: dataholz.eu). Seite: 147.
- Graphik 54: Bauteilaufbau des Daches. Seite: 148.
- Graphik 55: Detail Anschluss der Brandwand an das Dach zeigt die ausgeführte deckengleiche Brandwandersatzwand. Seite: 149.
- Graphik 56: Bauteilaufbauten aussteifender Außenwände mit Holzfassade (oben) und WDVS (unten). Seite: 150.
- Graphik 57: Bauteilaufbauten nichttragender Außenwände mit Holzfassade (links) und WDVS (rechts). Seite: 150.
- Graphik 58: Vergleichbare zugelassene Außenwandaufbauten: a) Massivholzkonstruktion mit Holzfassade, b) Massivholzkonstruktion mit WDVS, c) Tafelbaukonstruktion mit Holzfassade, d) Tafelbaukonstruk-

- tion mit WDVS Seite: 151.
- Graphik 59: Brandschutzfunktionen der Außenwandkonstruktionen mit WDVS (links) und vorgelagertem Laubengang und Holzfassade (rechts) mit Ausbildung einer Brandschürze. Seite: 152.
 - Graphik 60: Bauteilaufbau der Brandwand- ersatzwand mit Integration der Stützen. Seite: 153.
 - Graphik 61: Brandschutzfunktionen der Brandwandersatzwand, Horizontalschnitt des Außenwandanschlusses Dachanschlussdetail. 1.) Vertikale Brandschürze, Überstand >20mm. 2.) A1-Dämmung, druckfest, z.B. Schaumglas. 3.) Zusätzliche Verkleidung mit Gipsfaserplatten. Seite: 154.
 - Graphik 62: Schematische Darstellung der Entkopplung der Tragelemente (links) und der erhöhten Steifigkeit der Tragstruktur durch kraftschlüssige Verbindungen (rechts). Seite: 160.
 - Graphik 63: Axonometrie Trennwand. Seite: 162.
 - Graphik 64: Schalltechnische Trennung der Konstruktion im Bereich der Wohnungstrennwände. Seite: 163.
 - Graphik 65: Schallschutztechnisch wirksame Schichten der Geschosstrenndecken. Seite: 164.
 - Graphik 66: Anschluss der Wohnungsinnenwände an Unterzüge und auf dem Fußbodenaufbau. Seite: 165.
 - Graphik 67: Bodenanschluss für flexible Wohnungsinnenwände (Schiebewand). Seite: 166.
 - Graphik 68: Ausschnitt aus der Planung des Studierendenwohnheims Collegium Academicum. Seite: 169.
 - Graphik 69: Schematischer Aufbau des Teststands. Einbauposition der Testwände. Seite: 171.
 - Graphik 70: Bauteilaufbau der zweischaligen Ständerwand mit einfachem Ständerwerk. Seite: 173.
 - Graphik 71: Bauteilaufbau der zweischaligen Ständerwand mit doppeltem Ständerwerk. Seite: 174.
 - Graphik 72: Bauteilaufbau der offenen Regalwand. Seite: 175.
 - Graphik 73: Bauteilaufbau der sandbefüllten Regalwand. Seite: 176.
 - Graphik 74: Bauteilaufbau der ausgedämmten Regalwand. Seite: 176.
 - Graphik 75: Bauteilaufbauten der einfachen und doppelten Schiebewand. Seite: 177.
 - Graphik 76: Bewertungstabelle zu den subjektiven Wahrnehmungstests. Seite: 187.
 - Graphik 77: Regeldetails Fassade beim Modelvorhaben Collegium Heidelberg Quelle: DGJ Architektur GmbH Seite: 199.
 - Graphik 78: Regeldetails Fassade Fensteranschluss beim Modelvorhaben Collegium Heidelberg Quelle: DGJ Architektur GmbH Seite: 199.
 - Graphik 79: Regeldetails Fassade und Dachanschluss beim Modelvorhaben Collegium Heidelberg Quelle: DGJ Architektur GmbH Seite: 200.
 - Graphik 80: Regeldetails Dachaufbau und Dachrand beim Modelvorhaben Collegium Heidelberg Quelle: DGJ Architektur GmbH Seite: 202.
 - Graphik 81: Degressiver Einfluss der Dicke des Dämmstoffs mit $\lambda = 0,035 \text{ W/(m2K)}$ auf den U-Wert des Dachaufbaus, die einen U-Wert im ungedämmten Zustand von $0,94 \text{ W/(m2K)}$ besitzt. Quelle: ina Planungsgesellschaft mbH. Seite 203.
 - Graphik 82: Anschlussdetails Bausystem für Außenwand/Bodenplatte Quelle: DGJ Architektur Seite: 206.
 - Graphik 83: Variantenuntersuchung Feuchteschutz Bodenplatte Quelle INA Planungsgesellschaft Seite: 212.
 - Graphik 84: Prinzipskizze: Nicht belüftete Dächer mit Dachabdichtung Quelle INA Planungsgesellschaft Seite: 213.
 - Graphik 85: Ausbildung von Montagemodulen für massive Wandkonstruktionen (oben) und Außenwand-aufbauten in Tafelbauweise (unten) im Modellvorhaben ‚Collegium Academicum‘. Seite: 218, 219.
 - Graphik 86: Montageprozess der Vorfertigungsmodule im Modellvorhaben ‚Collegium Academicum‘. Seite: 218.
 - Graphik 87: Bodengleiche Ausführung der Schiebewand (mit Überströmelement). Seite: 228.
 - Graphik 88: Optimierte Anschlusslösung der flexiblen Schiebewand. Seite: 229.
 - Graphik 89: 3D-Diagramme der Fallstudien, ohne Maßstab, DGJ Architektur, 2019. Seite: 253.
 - Graphik 90: Grundriss-Varianten der Wohnungen im Modellvorhaben Collegium Academicum. Seite 259.
 - Graphik 91: Grundriss Regelgeschoss Modellvorhaben Collegium Academicum. Seite 260, 261.
 - Graphik 92: Querschnitt, o.M. Wohngruppe ‚Gemeinsam Suffizient Leben‘. Seite 271.
 - Graphik 93: Ausbauvarianten der Geschosse und Grundrisse, dj228. Seite: 276.
 - Graphik 94: Rechts oben: Unterschiedliche, mögliche Grundrisse für Wohnungszuschnitte, dj228. Seite: 276.
 - Graphik 95: Rechts unten: Fassadenansicht, dj228. Seite: 277.
 - Graphik 96: Grundriss 2. OG. Seite: 284.
 - Graphik 97: Möblierungsschablone für Wohnnutzung Seite: 290.
 - Graphik 98: Vergleichende Untersuchung zu Rastergrößen, Nutzungen und Möblierungen Seite: 291.
 - Graphik 99: Wohnungstypen Wohnwerk Mannheim Seite: 292, 293.

10.3. TABELLENVERZEICHNIS

Wo in Abbildung/Grafik/Tabelle nicht weiter aufgeführt oder explizit erwähnt, kann als Quelle, beziehungsweise als Urheberrechtinhaber angesehen werden: DGJ Architektur GmbH, Frankfurt am Main.

- Tabelle 1: Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2 und 3. Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN). Seite: 120.
- Tabelle 2: Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen DIN 4102-2. Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN). Seite: 121.
- Tabelle 3: Übersicht nach der Musterbauordnung, Stand: 2019: Anforderungen an Bauteile im Bezug auf den Brandschutz. Quelle: <https://www.bauministerkonferenz.de>. Seite: 123.
- Tabelle 4: Relevante Anforderungen an die Ausführung der Bauteile nach Landesbauordnung Baden-Württemberg. Seite: 139.
- Tabelle 5: Übersicht der konstruktiven Ausführungsvarianten der Brettsperrholzelemente entsprechend dem AbP P-SAC02/III-705. Seite: 146.
- Tabelle 6: Anforderungen an Bauteile laut DIN 4109. Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN). Seite: 156.
- Tabelle 7: Übersicht über die für das Collegium Academicum untersuchten Varianten der Innenwandkonstruktionen. Seite: 178.
- Tabelle 8: Ergebnisse der Luftschallmessungen der Trenndecke im Pilotprojekt Collegium Academicum. Seite: 179.
- Tabelle 9: Ergebnisse der Trittschallmessungen (vertikal) auf Rohestrich; Pilotprojekt Collegium Academicum. Seite: 180.
- Tabelle 10: Ergebnisse der Trittschallmessungen (vertikal) auf Bodenbelagsmuster; Pilotprojekt Collegium Academicum. Seite: 180.
- Tabelle 11: Ergebnisse der Trittschallmessungen (horizontal); Pilotprojekt Collegium Academicum. Seite: 181.
- Tabelle 12: Trittschallmessung: Ergebnisse der Wiederholungsmessungen im Vergleich zur Erstmessung. Seite: 182.
- Tabelle 13: Luftschallübertragung bei verschiedenen Trennwandaufbauten, Messergebnisse. Seite: 183.
- Tabelle 14: Luftschallübertragung bei verschiedenen Trennwandaufbauten, Messergebnisse. Seite: 184.
- Tabelle 15: Muster zur verbalen Einordnung akustischer Phänomene. Quelle: Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Seite: 186.
- Tabelle 16: Für die vorliegende Studie maßgebliche DIN-Normen im Bereich Bauphysik, beziehungsweise den Wärmeschutz betreffende technische Baubestimmungen gemäß MBO 2016. Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN). Seite: 190.
- Tabelle 17: Mindestwerte für Wärmedurchlasswiderstände von flächigen Bauteilen gem. DIN 4108-2, Nr. 5 (Auszug). Quelle: Deutsche Institut für Normung (DIN). Seite: 193.
- Tabelle 18: Randbedingungen zur Wärme- brückenberechnung gemäß DIN 4108-2:2012-02 Nr. 6. Seite: 194.
- Tabelle 19: Maximale Transmissionswärme- koeffizienten U und Wärme- brückenzuschläge verschiedener Gebäudestandards im Vergleich zum Modellvorhaben. Seite: 195.
- Tabelle 20: Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden gemäß EnEV 2014 Anlage 4. Seite: 197.
- Tabelle 21: Schlagregen- beanspruchungsgruppen nach DIN 4108-3. Seite: 197.
- Tabelle 22: Qualitative Bewertung der Interaktion zwischen den Einflussfaktoren und Systemvarianten Seite: 299.
- Tabelle 23: Interaktion: Betrachtungsebene Tragwerk in Interaktion mit anderen Dimensionen Seite: 301.
- Tabelle 24: Interaktion: Betrachtungsebene Brandschutz in Interaktion mit anderen Dimensionen Seite: 304, 305.
- Tabelle 25: Interaktion: Betrachtungsebene Schallschutz in Interaktion mit anderen Dimensionen Seite: 308, 309.
- Tabelle 26: Interaktion: Betrachtungsebene Wärmeschutz in Interaktion mit anderen Dimensionen Seite: 312, 313.
- Tabelle 27: Interaktion: Betrachtungsebene Luftdichtheit in Interaktion mit anderen Dimensionen Seite: 312, 313.

10.4. LITERATURLISTE

- Albus, Jutta, and Hans Drexler. 'Prefab Max: Die Potentiale vorgefertigter Konstruktions-systeme im Kostengünstigen Wohnungsbau.' In 'Wohnraum für Alle?!: Perspektiven auf Planung, Politik und Architektur', edited by Barbara Schönig, Justin Kadi, and Sebastian Schipper. Bonn: transcript, 2017.
- Altuna, Gaizka. 'Housing for the Billions (By the Billions): The Relevance of Open Building in the Age of Digital Networks.' In *Open Building 2.0*, edited by Almudena Ribot, Ignacio Borrego, Javier García-Germán, and Diego García-Setién. Berlin: TU Berlin FG Architekturdarstellung und Gestaltung, 2017.
- American Institute of Architects (AIA). 'D200-1995 Project Checklist.' Washington, 1995. Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. 'Anteil der Einpersonenhaushalte an allen Haushalten Im Jahr 2018 (Regionaldaten Berlin-Brandenburg),' 2018. https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/regionalstatistiken/r-gesamt_neu.asp?Pty-p=410&Sageb=12011&creg=BBB&anzwer=5.
- Archipendium. 'Architektur-Lexikon: CIAM.' Accessed August 22, 2019. <https://archipendium.com/architekturwissen/architektur-lexikon/ciam/>.
- Auer, Thomas, and Laura Franke. 'Lowtech im Gebäudebereich.' In *Robuste Architektur*, 46.
- Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2019.
- Wikipedia. 'Autochthone Art.' Accessed March 31, 2020. https://de.wikipedia.org/wiki/Autochthone_Art.
- Awan, Nishat, Tatjana Schneider, and Jeremy Till. *Spatial Agency: Other Ways of Doing Architecture*. London: Routledge, 2011.
- Baier, Franz Xaver. *Der Raum: Prolegomena Zu einer Architektur des gelebten Raumes*. 2nd ed. Köln: König, 2000.
- Banham, Reyner. *Megastructure: Urban Futures of the Recent Past*. London: Harper and Row, 1976.
- Basile, Salvatore. *Cool: How Air Conditioning Changed Everything*. New York: Fordham University Press, 2014.
- BauNetz. 'In der Wüste der Moderne: Über die Wurzeln europäischer Trabantenstädte.' *BauNetzWoche*. Heinze GmbH, 2008.
- BeL Sozietät für Architektur. 'Neubau: Über die Königsberger Straße und den Aleppoer Weg.' *ARCH+*. Berlin, December 2017.
- Bennett, Jonathan. 'Space and Subtle Matter in Descartes's Metaphysics.' *New Essays on the Rationalists (Oxford University Press)* 1 (1999): 3–25.
- Bergson, Henri. 'Das Mögliche und das Wirkliche.' In 'Denken und schöpferisches Werden', 8th ed., 110–25. Hamburg: Europäische Verlagsanstalt, 1993.
- 'Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB): Kriterium Nachhaltige Materialgewinnung / Biodiversität.' Bundesministerium Für Umwelt, Naturschutz, Bau Und Reaktorsicherheit, 2015.
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI). 'Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB).' Accessed March 25, 2020. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/>.
- Borrego, Ignacio. 'Open Building: Material vs. Information.' In *Open Building 2.0*, edited by Almudena Ribot, Ignacio Borrego, Javier García-Germán, and Diego García-Setién. Berlin: TU Berlin FG Architekturdarstellung und Gestaltung, 2017.
- Boudon, Philippe. *Die Siedlung Pessac: 40 Jahre Wohnen à Le Corbusier*. Bauwelt-Fundamente. Gütersloh: Bertelsmann, 1971.
- Bourgeois, Viktor, Le Corbusier, Pierre Jeanneret, Siegfried Giedion, Walter Gropius, Ernst May, and Hans Schmidt. *Die Wohnung für das Existenzminimum*. Frankfurt/M.: Englert & Schlosser, 1930.
- Brand, Stewart. *How Buildings Learn: What Happens After They're Built*. London: Penguin Books, 1995.
- Building Research Establishment. 'BREEAM: The World's Leading Sustainability Assessment Method for Masterplanning Projects, Infrastructure and Buildings,' 2020. <https://www.breeam.com/>.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). 'Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes): Programm Zur Nachhaltigen Nutzung Und Zum Schutz Der Natürlichen Ressourcen.' Berlin, February 2012.
- Churkina, Galina, Alan Organschi, Christopher P O Reyer, Andrew Ruff, Kira Vinke, Zhu Liu, Barbara K Reck, T E Graedel, and Hans Joachim Schellnhuber. 'Buildings as a Global Carbon Sink.' *Nature Sustainability*, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>.
- Canadian Centre for Architecture, Montreal. 'Collection: Cedric Price.' Accessed January 14, 2019. <https://www.cca.qc.ca/en>.
- Colomina, Beatriz, and Mark Wigley. *Are We Human? Notes on an Archaeology of Design*. Zürich: Lars Müller Publishers, 2019.
- Conrads, Ulrich. *Le Corbusier 1929: Feststellungen*. Berlin, Frankfurt, Wien: Ullstein, 1964. Corboz, André. 'Auf Der Suche Nach 'Dem' Raum.' *Werk, Bauen + Wohnen* 83, no. 3 (1996): 6–13.
- Corbusier-Saugnier, Le. 'Des Yeux Qui Ne Voient Pas ... Les Avions.' *L'Esprit Nouveau*. Paris, 1921.

- Corbusier, Le. *Vers Une Architecture*. Paris: Éditions Crès, 1923.
- Creswell, John W., and J. David Creswell. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. 5th ed. Thousand Oaks: Sage, 2018.
- Daniel Khazzoom, J. 'Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances.' *The Energy Journal* 1, no. 4 (October 1980): 21–40.
- 'Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm.' United Nations Environment Programme, 1972.
- Deleuze, Gilles, and Félix Guattari. *A Thousand Plateaus: Capitalism and Schizophrenia*. University of Minnesota Press, 1987. *Mille Plateaux*. Paris: Éditions de minuit, 1980.
- Deplazes, Andrea. *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures*. Basel: Birkhäuser, 2005.
- Descartes, René. *Principles of Philosophy: Principia Philosophiae*, 1644.
- Deutsche Energie-Agentur (dena). 'Dena-Gebäudereport Kompakt 2018: Statistiken Und Analysen Zur Energieeffizienz Im Gebäudebestand.' Berlin, 2018.
- DGNB GmbH. 'Ökobilanz des Gebäudes.' In *Kriterienkatalog Gebäude Neubau*. DGNB GmbH, 2018.
- Diamond, Jared. *How Societies Choose to Fail or Succeed*. New York: Viking Penguin, 2005. Dietrich, Richard J. 'Metastadt und erstes Metastadt-Bausystem, 1965 bis 1975.' Accessed March 31, 2020. <http://www.dietrich-ingenieur-architektur.de/AS-1-start.htm>.
- Dömer, Klaus, Hans Drexler, and Joachim Schultz-Granberg. *Affordable Living: Housing for Everyone*. Berlin: Jovis, 2014.
- Dömer, Klaus, Hans Drexler, Joachim Schultz-Granberg, and Jovis Verlag GmbH. *Bezahlbar. Gut. Wohnen. Strategien für Erschwinglichen Wohnraum*. Berlin: Jovis, 2016.
- Dörner, Dietrich. *Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen*. Hamburg: Rowohlt, 1988.
- Drexler, Hans. *Minimum Impact House: Forschungsprojekt zur Entwicklung eines Prototyps für Nachhaltiges Bauen*. Düsseldorf: Müller + Busmann, 2008.
- ———. 'Press-Fit Timber Building Systems for Flexible Housing.' In *Rethinking Wood: Future Dimensions of Timber Assembly*, edited by Markus Hudert and Sven Pfeiffer. Berlin: De Gruyter, 2019.
- Drexler, Hans, Marie Deilmann, Frederik Ehling, and Philip von Rüdiger. 'Form- und kraftschlüssiges Holzbau-System.' DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt), 2020. https://www.dbu.de/123artikel37808_2430.html.
- Drexler, Hans, Marie Deilmann, Frederik Ehling, Philip von Rüdiger, Tobias Götz, Tobias Riehle, and Tobias Brüggemann. 'Holz: Form- Und kraftschlüssig – Entwicklung eines Vollholz-Bausystems mit form- Und kraftschlüssigen geometrischen Verbindungen.' Accessed January 22, 2020. [https://www.dropbox.com/preview/res022_Holz Form und Kraftschlüssig/res022_HFKS_BBSR_PUBLIC_ACCESS/res022_HFKS_BBSR_Bericht_2019.03.10_dx_11.1_FINAL.pdf?role=work](https://www.dropbox.com/preview/res022_Holz%20Form%20und%20Kraftschl%C3%BCssig/res022_HFKS_BBSR_PUBLIC_ACCESS/res022_HFKS_BBSR_Bericht_2019.03.10_dx_11.1_FINAL.pdf?role=work).
- Drexler, Hans, and Daniel Jauslin. 'DePositionierung: Polymorphismus und die Supereffizienz von Wanderameisen-Teamwork.' *TransPosition*, 1997.
- Drexler, Hans, and Sebastian El Khouli. *Nachhaltige Wohnkonzepte: Entwurfsmethoden und Prozesse*. München: DETAIL, 2012.
- Druot, Frédéric, Anne Lacaton, and Jean-Philippe Vassal. *Plus: La Vivienda Colectiva. Territorio de Excepción*. Edited by Gustavo Gili. Barcelona: GG, 2007.
- Duffy, Francis. *Design for Change: The Architecture of DEGW*. Basel: Birkhäuser, 1998. Eco, Umberto. *Das offene Kunstwerk*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1977.
- ———. 'Form a Social Commitment.' In *The Open Work*, 1st ed., 123–57. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- Isabelle Henricot. 'École Provisoire de Villejuif, Jean Prouvé,' 1957. <https://www.parisart-now.com/jean-prouve-ecole-provisoire-de-villejuif-1957-patrick-seguin/>.
- Eisenhardt, Peter, Dan Kurth, and Horst Stiehl. *Du Steigst Nie Zweimal in Denselben Fluss: Die Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis*. Hamburg: Rowohlt, 1988.
- Engel, Heino. *The Japanese House: A Tradition for Contemporary Architecture*. 1st ed. North Clarendon: Charles E. Tuttle, 1964.
- Engels, Friedrich. *Die Lage der arbeitenden Klasse in England*. 1st ed. Leipzig: Otto Wigand, 1845.
- Europäische Kommission. 'Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor.' Brüssel, 2014.
- Feldhusen, Sebastian. 'Entwurfsbasiert Forschen: Ralf Pasel Und Jürgen Weidinger Über Promotionsprogramm Der TU Berlin.' *BauNetz.De*, July 2018.
- Fondation Le Corbusier. 'Le Corbusier: Maison Dom-Ino, 1914.' Accessed March 31, 2020. <http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysld=13&IrisObjec-tid=5972&sysLanguage=en-en&itemPos=102&itemCount=215&sysParentId=65&sys-ParentName=home>.
- Free Software Foundation. 'Freie Software: Was Ist Das?' Accessed March 22, 2020. <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>.

- Frey, Pierre Alain, and Patrick Bouchain. *Learning from Vernacular: Pour Une Nouvelle Architecture Vernaculaire*. Arles: Actes Sud, 2013.
- Friedman, Avi. *The Adaptable House: Designing Homes for Change*. New York: McGraw-Hill, 2002.
- Galliker, Mark. *Psychologie der Gefühle und Bedürfnisse: Theorien, Erfahrungen, Kompetenzen*. Stuttgart: Kohlhammer, 2009.
-
- García-Germán, Javier. 'On the Potential of Open-Building to Unfold a More Intense Interaction with the Environment: Towards an Inclusive View.' In *Open Building 2.0*, edited by Almudena Ribot, Ignacio Borrego, Javier García-Germán, and Diego García-Setién. Berlin: TU Berlin FG Architekturdarstellung und Gestaltung, 2017.
- 'General Panel System.' Accessed August 19, 2019. http://www.axxio.net/waxman/content/General_Panel/General-Panel.htm.
- Geraedts, Rob. 'FLEX 4.0: A Practical Instrument to Assess the Adaptive Capacity of Buildings.' *Energy Procedia*. Vol. 96. Amsterdam: Elsevier, September 2016.
- Gesterkamp, Thomas. 'Der schiefe Turm von Wulfen: Am Rande des Ruhrgebiets wird zum erstenmal ein heruntergekommenes Wohnsilo abgerissen.' *Zeit*. 1986.
- Giedion, Sigfried. *Raum, Zeit, Architektur: Die Entstehung einer neuen Tradition*. Zürich: Artemis, 1976.
- Gordon, James Edward. *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*. Cambridge: Da Capo Press, 2003.
- Grodk, Steven. *The Idea of Building: Thought and Action in the Design and Production of Buildings*. London: E & FN Spon, 1992.
- Habraken, N. J. *De Draggers En de Mensen: Het Einde van de Massawoningbouw*. Amsterdam: Scheltema & Holkema, 1961.
- ———. *Die Träger und die Menschen: Das Ende des Massenwohnungsbaus*. Den Haag: Arch-Edition, 2000.
- ———. *The Structure of the Ordinary: Form and Control in the Built Environment*. Edited by Jonathan Teicher. Cambridge: MIT Press, 2000.
- Haller, Fritz. 'Allgemeine Lösungen in der Bautechnik.' *Bauen + Wohnen* 11 (1962): 456–75.
- ———. 'Ein offenes System für mehrgeschossige Bauten mit integrierter Medieninstallation.' *Werk, Bauen + Wohnen* 11 (1975): 431–38.
- ———. 'Gedanken zum Bauen.' *Bauen + Wohnen* 10 (1964): 381–412.
- ———. 'Totale Stadt: Ein Globales Modell, Zweite Studie'. Olten: Walter, 1975.
- ———. 'Totale Stadt: Ein Modell.' Olten: Walter, 1968.
- ———. 'Über die Notwendigkeit Wandelbarer Gebäude.' *Werk, Bauen + Wohnen* 79 (1992): 9–15.
- ———. 'Von Eigenschaften Ausgezeichneter Punkte in Regulären Geometrischen Systemen.' *Bauen + Wohnen* 21 (1967): 425–38.
- Haller, Fritz, and Hans Wichmann. *System-Design Fritz Haller: Bauten, Möbel, Forschung*. Basel: Birkhäuser, 1989.
- Hardingham, Samantha. *Cedric Price Works 1952-2003: A Forward-Minded Retrospective*. Edited by Samantha Hardingham. Band 2. London: Architectural Association Publications, 2016.
- Hegger, Manfred. *Sonnige Aussichten: Das SurPLUSHome Des Team Germany Zum Solar Decathlon 2009*. Düsseldorf: Müller + Busmann, 2010.
- Hegger, Manfred, Matthias Fuchs, Thomas Stark, and Martin Zeumer. *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur*. München: DE GRUYTER, 2007.
- Hegger, Manfred, Joost Hartwig, Michael Keller, Tobias Lode, Dirk Mathes, Hans Drexler, and Anne Bauer. 'EcoEasy: Entwicklung einer Methode Z'zur Bewertung der potentiellen Umweltwirkungen von Gebäuden in frühen Planungsphasen (Abschlussbericht),' July 2012.
- Hegger, Manfred, Katrin Spitzner, Sebastian El khouli, Michael Keller, and Nikola Mahal. 'Wohnwertbarometer: Erfassungs- und Bewertungssystem nachhaltiger Wohnqualität.' Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2010.
-
- Herdt, Tanja. *The City and the Architecture of Change: The Work and Radical Visions of Cedric Price*. Zürich: Lars Müller Publishers, 2016.
- Huber, Benedikt, and Jean-Claude Steinegger. 'Jean Prouvé: Prefabrication: Structures and Elements'. London: Praeger, 1971.
- Jacobs, Jane. *The Death and Life of Great American Cities*. New York: Random House, 1961. Centre Pompidou, MNAM-CCI Bibliothèque Kandinsky. 'Jean Prouvé (1901-1948).' Accessed April 18, 2020. <https://www.photo.rmn.fr/archive/>.
- Jocher, Thomas, Erika Mühlthaler, and Pia Gerhards. 'Ready: Vorbereitet für Altern-gerechtes Wohnen. Neue Standards Und Maßnahmensets Für Die Stufenweise, Altengerechte Wohnungsanpassung Im Neubau.' *Forschung Für Die Praxis*. Vol. 1. Bonn, 2016.
- Kant, Immanuel, and Jens Timmermann. *Kritik Der reinen Vernunft*. Hamburg: Franz Meiner, 1998.
- Kaufmann, Hermann, Stefan Krötsch, and Stefan Winter. *Atlas: Mehrgeschossiger Holzbau*. München: DETAIL, 2017.

- Kendall, Stephen. 'Notes Toward a History of the Matura Infill System Development.' Philadelphia, 2015. <http://drstephenkendall.com/wp-content/uploads/2017/03/An-Oral-History-of-the-Matura-Infill-System-Development.pdf>.
- ———. 'Open Building: An Approach to Sustainable Architecture.' *Journal of Urban Technology*, 1999.
- ———. 'Reflections on the History and Future of the Open Building Network,' 2015. <http://open-building.org/>.
- Kendall, Stephen, and Jonathan Teicher. 'A Survey of Infill Systems, Products and Companies.' In *Residential Open Building*. London: E & FN Spon, 1999.
- ———. *Residential Open Building (Cib)*. London: E & FN Spon, 1999.
- Kwinter, Sanford. 'Das Komplexe und das Singuläre.' *ARCH+* 119/120 (December 1993): 77–90.
- Lacaton, Anne, and Jean-Philippe Vassal. 'Der Tour Bois-Le Prêtre in Paris.' *ARCH+* 203 (June 2011): 110–15.
- U.S. Green Building Council. 'LEED Rating System (Leadership in Energy and Environmental Design),' 2020. <https://www.usgbc.org/leed>.
- Leverentz, Sigurd. 'Flower Shop.' seier+seier, 1969. <https://www.flickr.com/photos/seier/2348583304>.
- Liu, Edward T. H. 'Shapes of Sustainability (Lecture Recording 11.11.2011),' 2011. <https://www.youtube.com/watch?v=7oosbtTx8&feature=youtu.be>.
- ———. 'The Shape of Sustainability.' In *Building The Future: Maßstäbe des Nachhaltigen Bauens*, edited by Hans Drexler and Adeline Seidel. Berlin: Jovis, 2012.
- Lüchinger, Arnulf. *2-Komponenten-Bauweise: Struktur Und Zufall*. Den Haag: Arch-Edition, 2000.
- Lynn, Greg. 'Leicht Und Schwer.' *ARCH+* 124/125 (December 1994): 38–43.
- Maslow, Abraham H. 'A Theory of Human Motivation.' *Psychological Review* 50 (1943): 370–96.
- ———. *Motivation and Personality*. New York: Harper & Row, 1954.
- McDonough, William, and Michael Braungart. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. 1st ed. London: North Point Press, 2002.
- Meadows, Donella, Dennis Meadows, Jorgen Randers, and William W. Behrens III. *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books, 1972.
- Meadows, Donella, Jorgen Randers, and Dennis Meadows. *Limits to Growth: The Thirty-Year Update*. London: Earthscan, 2005.
- Merz, Konrad. 'Konstruieren: Vom Stab zur Platte.' *ARCH+* 193 (September 2009): 16–17. Mietshäuser Syndikat. 'Mietshäuser Syndikat: Finanzierung.' Accessed August 19, 2019. <https://www.syndikat.org/de/finanzierung/>.
- Mitscherlich, Alexander. *Die Unwirtlichkeit unserer Städte: Anstiftung zum Unfrieden*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1965.
- Morado Nascimento, Denise. 'N. J. Habraken Explains the Potential of the Open Building Approach in Architectural Practice.' *Vitruvius* 52, no. 4 (2012).
- Müller, Felix, Christian Lehmann, Jan Kosmol, Hermann Keßler, and Til Bolland. 'Ressourcenschonung im Anthropozän.' Dessau-Roßlau, 2017.
- Mumford, Eric Paul. *The CIAM Discourse on Urbanism: 1928-1960*. Cambridge: MIT Press, 2000.
- Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau e.V. 'NaWoh: Nachhaltiger Wohnungsbau,' 2019. <https://www.nawoh.de/>.
- Neufert, Ernst. *Bauentwurfslehre*. 1st ed. Berlin: Ullstein / Bau-Welt, 1936.
- Newton, Isaac. *Isaac Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Edited by Alexandre Koyré and Ierome Bernard Cohen. 3rd ed. Cambridge: Harvard University Press, 1972.
- Noever, Peter. *Architektur im Aufbruch: Neun Positionen zum Dekonstruktivismus*. München: Prestel, 1991.
- OKAL Haus GmbH. 'OKAL: Unternehmensgeschichte.' Accessed February 28, 2020. <https://www.okal.de/unternehmen/geschichte/>.
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. 'ÖKOBAUDAT: Ökobilanzierung Im Bauwesen.' Accessed January 13, 2020. <https://www.oekobaudat.de/>.
- Ott, Konrad, and Ralf Döring. *Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit*. Marburg: Metropolis, 2008.
- Panofsky, Erwin. 'Die Perspektive als "Symbolische Form."' In *Aufsätze zu Grundfragen der Kunstwissenschaft*, edited by Hariolf Oberer and Egon Verheyen, 99–176. Berlin: Volker Spiess, 1980.
- Peters, Nils. *Jean Prouvé 1901-1984: Die Dynamik Der Schöpfung*. Köln: Taschen, 2013. Pevsner, Nikolaus. *An Outline of European Architecture*. Harmondsworth; New York: Penguin Books, 1942.
- Price, Cedric. '12 Demountable Houses.' *Galerie Patrick Seguin, Paris*. Accessed January 4, 2019. <https://www.patrickseguin.com/fr/news/galerie-patrick-seguin-i-paris-4-oct-2016-21-jan-2017/>.
- ———. 'Generator Project, White Oak, Florida: Design Thoughts Used as Reminders within Office B.' MoMA, New York Archive, 1977. https://www.moma.org/collection/works/879?artist_id=7986&locale=en&page=1&sov_referrer=artist.

- Price, Cedric, and Hans Ulrich Obrist. *The Conversation Series: Hans Ulrich Obrist & Cedric Price*. Edited by Hans Ulrich Obrist. 21st ed. Köln: Walther König, 2009.
- Quinn, Andrea, Brandon Mooi, Matthew Barker, and Hayley Sykes. 'Construction: Maison Tropicale and The Assembly Line.' Accessed August 19, 2019. <http://maison-tropicale.blogspot.com/p/construction.html>.
- Referat für Stadtplanung und Bauordnung. 'Prognose Der Münchner Privathaushalte: Haushaltsvorausberechnung 2014 Bis 2030.' München, 2015.
- VDI Ressourceneffizienz Zentrum GmbH. 'Ressourceneffizienz Im Bauwesen.' Accessed August 14, 2019. <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/>.
- Ritchie, Hannah and Max Roser. 'Urbanization: Our World in Data.' *Our world in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/urbanization>.
- Rudofsky, Bernard. *Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*. Albuquerque: University of New Mexico Press, 1987.
- Sabatto, Steeve. 'Zur Frage von Massstab Und Ökonomie: Totipotenz Und Automation Bei Konrad Wachsmann Und Fritz Haller.' In *Fritz Haller: Architekt und Forscher*, 140–61. Zürich: gta, 2015.
- Architekturmuseum TU München. 'Sammlung: Richard Dietrich.' Accessed April 18, 2020. <http://mediatum.ub.tum.de/897679>.
- Sato, Hideo, and Yasua Nakahara. *The Complete Japanese Joinery*. Vancouver: Hartley & Marks, 2000.
- Schneider, Tatjana, and Jeremy Till. *Flexible Housing*. London: Routledge, 2007.
- Schulze, Gerhard. 'Gehen ohne Grund. Eine Skizze zur Kulturgeschichte des Denkens.' In *Philosophische Ansichten der Kultur der Moderne*, edited by Andreas Kuhlmann, 93ff. Frankfurt: Fischer, 1994.
- Schumacher, Ernst Friedrich. *Small Is Beautiful: A Study of Economics as If People Mattered*. London: Blond & Briggs, 1973.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (sia). 'Modell Bauplanung: Verständigungsnorm.' Zürich, 2014.
- Seguin, Patrick. 'Jean Prouvé Architecture: Available Houses.' *Galerie Patrick Seguin*, Paris. Accessed August 19, 2019. <https://www.patrickseguin.com/en/designers/architect-jean-prouve/available-houses-jean-prouve/>.
- Siemon, Klaus D., and Ralf Averhaus. 'Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen.' In *Die HOAI 2009 Verstehen Und Richtig Anwenden*, 1–4. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- Skidelsky, Robert, and Edward Skidelsky. *How Much Is Enough?: Money and the Good Life*. London: Penguin Books, 2012.
- Spreng, Daniel, and Marco Semadeni. 'Energie, Umwelt Und Die 2000 Watt Gesellschaft.' *CEPE Working Paper*, no. 11 (2001). <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004300072>.
- Staib, Gerald, Andreas Dörrhöfer, and Markus Rosenthal. *Elemente + Systeme: Modulares Bauen: Entwurf, Konstruktion, Neue Technologien*. München: DETAIL, 2008.
- Stalder, Laurent, and Georg Vrachliotis. *Fritz Haller: Architekt Und Forscher*. Edited by Georg Vrachliotis. Zürich: gta, 2015.
- 'Statistik: Pearson Produkt-Moment Korrelation.' Accessed April 9, 2020. <https://statistik-guru.de/>.
- Statistisches Bundesamt. 'Abfallaufkommen.' *Umweltbundesamt*, 2018.
- ———. 'Bautätigkeit und Wohnungen: Bestand an Wohnungen.' Vol. 5, 2018.
- ———. 'Entwicklung der Privathaushalte bis 2035: Ergebnisse Der Haushaltsvorausberechnung, 2017.' <https://www.destatis.de/Migration/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/HaushalteMikrozensus/EntwicklungPrivathaushalte.html>.
- ———. 'Haushalte nach Zahl der Personen.' *Bundeszentrale für politische Bildung (bpb)*, 2012.
- ———. 'Privathaushalte nach Haushaltsgröße im Zeitvergleich, 2018.' <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Tabellen/Irbev05.html>.
- ———. 'Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen: Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Umweltschutzmaßnahmen, 2017.
- ———. 'Wohnungsbestand nach Anzahl und Quadratmeter Wohnfläche, 2019.' <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Tabellen/wohnungsbestand-deutschland.html>.
- Steffen, Will, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney, and Cornelia Ludwig. 'The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration.' *Anthropocene Review*, January 2015, 1–18.
- Strauch, Dietmar, and Bärbel Högner. *Konrad Wachsmann: Stationen eines Architekten*. Berlin: Progris, 2013.
- Sustainable By Design. 'Symposium: Klima Und Raum. Autochthone und Kybernetische Strukturen.' *Münster School of Architecture*, 2011.
- Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft. 'Richtlinie für die Förderung des sozialen Mietwohnungsbaus in besonderen Gebietskulissen zur Innenstadtabstabilisierung im Freistaat Thüringen für die Programmjahre 2018 bis 2020 (Innenstadtabstabilisierungsprogramm – ISSP).' Erfurt, December 2018.

- Till, Jeremy. *Architecture Depends*. Cambridge: MIT Press, 2009.
- ———. 'Spatial Agency: Beyond Fountainhead.' New York: Studio-X Rio, Columbia GSAPP, 2014. <https://deznark.com/blog/jeremy-till-spatial-agency-beyond-fountain-head-studio-x-rio/>.
- UN-Habitat. 'Habitat III Issue Papers 22: Informal Settlements.' *United Nations Conference on Housing and Sustainable Urban Development*. Quito, 2015.
- Veasey, Nick. 'Rayos X (I)'. Accessed March 31, 2020. http://www.processuscreatus.com/articulos/artes/41-rayos_x_de_nick_veasey_i/.
- Vegeasack, Alexander von. *Jean Prouvé: Die Poetik des technischen Objekts*. Edited by Alexander von Vegeasack and Bruno Reichlin. 1st ed. Basel: Vitra Design Museum, 2006.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ). 'Zementindustrie Im Überblick 2016 / 2017.' Berlin, 2016.
- Vielhauer, Cordula. 'Vertikale Nischen: Miniwohnungen in Megacities von Gary Chang.' *DETAIL*, July 2013.
- Vrachliotis, Georg. *Geregelte Verhältnisse*. Wien: Ambra Verlag, 2011.
- Wachsmann, Konrad. *The Turning Point of Building Structure and Design*. New York: Reinhold, 1961.
- ———. *Wendepunkt Im Bauen*. Wiesbaden: Krauskopf, 1959.
- Wegener, Bernd, Hans Drexler, Moritz Fedkenheuer, Luisa Maria Matz, and Fraunhofer IRB-Verlag. *Wohnformen: Vergleichende Untersuchung zu gemeinschaftlichen und individuellen Wohnbedürfnissen (Abschlussbericht)*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2019. <https://www.baufachinformation.de/wohnformen-vergleichende-untersuchung-zu-gemeinschaftlichen-und-individuellen-wohnbeduerfnissen/fb/252718>.
- Wigley, Mark. 'AA Lectures Online: An Afternoon with Cedric Price No. 2.' *AA Lectures Online*. Architectural Association Inc, London, February 9, 2017. <https://www.aaschool.ac.uk/VIDEO/lecture.php?ID=3637>.
- ———. 'The Low-Flying Architecture of Jean Prouvé.' In *Architect for Better Days*, 137–59.
- Berlin: Phaidon, 2017.
- WikiHouse. 'WikiHouse.' Accessed August 19, 2019. <https://www.wikihouse.cc/>.
- Woetzel, Jonathan, Sangeeth Ram, Jan Mischke, Nicklas Garemo, and Shirish Sankhe. 'A Blueprint for Addressing the Global Affordable Housing Challenge,' October 2014.
- Zentralverband Deutsches Baugewerbe. '50 Jahre beträgt das Durchschnittsalter eines deutschen Wohngebäudes, 2014.' <https://www.zdb.de/zdb-cms.nsf/id/50-jahre-durchschnittsalter-eines-deutschen-wohngebaeudes-de>.

10.5. LISTE DER ABKÜRZUNGEN

- **AbP:** Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
- **AG:** Aktiengesellschaft
- **BIM:** Building Information Modeling: Bauwerksinformationsmodellierung
- **BSP:** Brettspertholz
- **BSH:** Brettschichtholz
- **CAD:** Computer-Aided Design
- **CAM:** Computer-Aided Manufacturing
- **CNC:** Computerized Numerical Control
- **DBU:** Deutsche Bundesstiftung Umwelt
- **DIN:** Deutsches Institut für Normung
- **EJ:** Exajoule
- **ETK:** Einheitstemperaturkurve
- **EN:** Europäische Norm
- **Eurocode 5:** Europäische Norm für Holzbauwerke
- **F 30:** Feuerwiderstandsklasse 30 Minuten
- **F 60:** Feuerwiderstandsklasse 60 Minuten
- **F 90:** Feuerwiderstandsklasse 90 Minuten
- **GKF:** Gipskarton Feuerschutzplatte
- **IBA:** Internationale Bauausstellung
- **K2i:** Modellbezeichnung einer Abbundmaschine von Hundegger
- **LBO:** Landesbauordnung
- **MBO:** Musterbauordnung
- **MHFHHolzR:** Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise
- **MSA:** Münster School of Architecture
- **P-SAC:** Project-Specific Acoustic Classification
- **REI 30/60/90:** Resistance, Integrity, Insulation (30/60/90 Minuten)
- **R90:** Feuerwiderstandsklasse 90 Minuten
- **SMA:** Structural Mechanics Analysis
- **SPF:** Sägefurnierplatten
- **STB:** Stahlbeton
- **VDI:** Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- **VOB:** Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
- **WDVS:** Wärmedämmverbundsystem
- **ZPF:** Zentralverband des Deutschen Pfandbriefmarktes