

BBSR-  
Online-Publikation  
31/2021

# Notunterkünfte aus Papier

Autorinnen und Autoren

Ulrich Knaack  
Alexander Wolf  
Rebecca Bach



## Notunterkünfte aus Papier

Leichte, mobile, einfach zu installierende Wohnräume für Katastrophen und unerwartete demografische Veränderungen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.54

Projektlaufzeit: 05.2019–09.2020

## Impressum

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
Felix Lauffer  
felix.lauffer@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

TU Darmstadt, Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen  
Institut für Statik und Konstruktion ISM+D

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack (Projektleitung)

Rebecca Bach, M.A. (Gruppenleitung)

Alexander Wolf, M.A. Architekt  
wolf@ismd.tu-darmstadt.de

### Stand

Juni 2021

### Gestaltung

journal of facade design and engineering

### Bildnachweis

Titelbild: Wolf, A.

Digitale Nachbearbeitung Titelbild: Biernatek, B.

Bilder: Wilfinger, M.: S.16, 31; Wolf, A.: S. 19, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 32 34, 35, 36, 37, 38; UNHCR Global Report 2019: S. 10.

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Knaack, Ulrich; Wolf, Alexander; Bach, Rebecca: Notunterkünfte aus Papier: Leichte, mobile, einfach zu installierende Wohnräume für Katastrophen und unerwartete demografische Veränderungen. BBSR-Online-Publikation 31/2021, Bonn, Dezember 2021.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>6</b>
1.1	Anlass	6
1.2	Papier als Baustoff	6
1.3	Forschungsfragen	7
1.4	Zielsetzung des Projekts	8
<b>2</b>	<b>Ausgangsbasis</b>	<b>9</b>
2.1	Gesellschaftliche, soziale und politische Zusammenhänge	9
2.2	Anforderungen von Seiten der Hilfsorganisationen	11
2.3	Technische Voraussetzungen/ Stand der Technik	11
<b>3</b>	<b>Forschungsteam</b>	<b>14</b>
3.1	Interne Mitarbeiter	14
3.2	Kooperationspartner	14
3.3	Förderer	15
<b>4</b>	<b>Forschungsmethode</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>18</b>
5.1	Klärung der Anforderungen	18
5.2	Seminararbeiten	18
5.3	Abschlussarbeiten	19
5.3.1	Wandkonstruktionen aus Papier	19
5.3.2	Deckenkonstruktionen aus Papier	20
5.3.3	Papierwandmodule verbinden	22
5.4	Entwürfe	23
5.4.1	Typ 1 – Modulares unabhängiges Haus	23
5.4.2	Typ 2 – Integrierte Trennwandsysteme	24
5.5	Material	26
5.6	Laminieren	26
5.7	Baukonstruktion	27
5.7.1	Schichtaufbau Aussenwand/Dach	27
5.7.2	Schichtaufbau Bodenplatte	27
5.7.3	Schichtaufbau integrierte Trennwandsysteme	28
5.7.4	Gebäudehülle	29
5.8	Segmentverbindungen	30
5.9	Statische Abschätzung	32
5.10	Fertigungstechnik	32
5.10.1	Herstellung der Prototypen	32
5.10.2	Herstellung des Demonstrators	33
5.10.3	Herstellung der Notunterkünfte	33
5.11	Demonstrator	33
5.12	Ergebnisverwertung	39
5.12.1	Lehre	39

5.12.2 Konferenzen	39
5.12.3 Publikationen	39
5.12.4 Folgeprojekte	39
<b>6 Fazit</b>	<b>40</b>
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>41</b>
<b>8 Verzeichnisse</b>	<b>42</b>
8.1 Literaturverzeichnis	42
8.2 Abbildungsverzeichnis	43
<b>9 Anlagen</b>	<b>44</b>

# 1 Problemstellung

## 1.1 Anlass

In Folge von Naturkatastrophen, Krieg, Flucht und Vertreibung tritt immer wieder kurzfristig der Bedarf nach mobilen, einfach zu installierenden Wohnräumen für die hiervor Geflüchteten auf.

Die Folge sind oftmals große „Zeltstädte“, die nur einen geringen Komfort- und Hygienestandard für Ihre Einwohner bieten, welche auch oft länger als vorgesehen in diesen verbleiben müssen.

Solche temporären Konstruktionen sind in der Regel nach Gebrauch als Notunterkunft abgenutzt und nicht für die Wiederverwendung geeignet. Im Falle von Zeltstädten und gedämmten Containermodulen werden nicht trennbare Materialkombinationen eingesetzt, welche nur unter hohem Aufwand recycelt werden können oder sogar als Sondermüll deponiert werden müssen.

Der Bausektor ist für über 50 % des jährlich anfallenden Abfalls verantwortlich (vgl. Umweltbundesamt, 2020) und weist einen hohen Rohstoffbedarf auf (vgl. Valentin Brenner, 2015). Hinzu kommt die voranschreitende Ressourcen-verknappung, welche bereits Auswirkungen auf die Betonherstellung für den Bausektor hat. Es besteht demnach ein hoher Bedarf nach kreislaufgerechten Materialien und Konstruktionen.

Je geringer die Lebensdauer eines Bauwerks ist, umso wichtiger ist die Kreislaufgerechtigkeit der Konstruktion, um den zuvor beschriebenen Problematiken entgegen zu wirken (vgl. Hildebrand, 2014). Notunterkünfte zählen zu den denkbar temporärsten baulichen Anwendungen und sollten somit so kreislaufgerecht wie möglich ausgeführt werden.

Der Einsatz von Papierkonstruktionen bietet das Potential sowohl die Wohnsituation in notbedingten Lagern als auch die ökologischen Eigenschaften der temporären Konstruktionen zu verbessern.

## 1.2 Papier als Baustoff

Papier hat die Vorteile, dass es kostengünstig, schnell und aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird. Es ist global verfügbar und verfügt über stark optimierte Rezyklierprozesse. Papier ist demnach ein kreislaufgerechter Werkstoff.

Bereits in den 1990er Jahren erkannte der japanische Architekt Shigeru Ban dieses Potential und errichtete erste Experimentalgebäude aus Papierwerkstoffen. Diese sogenannten Paper Tube Structures werden zum größten Teil aus Papphülsen in unterschiedlichen Dimensionen und Ausrichtungen gefertigt. Sie dienen diversen Anwendungszwecken: von Ferienwohnungen (Paper House, 1994; Library of a Poet, 1991) über Pavillons (Paper Arch Dome, 1998; Japan Pavillon, Expo 2000) bis hin zu ersten Notunterkünften (Paper Log Houses, 1995, 2000, 2001, 2014) aus Papphülsen. Die Problematik der Wasser- bzw. Feuchteanfälligkeit wurde in Bans Werken hauptsächlich über Beschichtungen bzw. Tränkung des Materials in Polyurethan o.ä. gelöst. Im Bereich des Brandschutzes wurden keine ausreichenden Materialforschungen betrieben, sodass der japanische Pavillon der

Expo 2000 in Hannover nach deutschen Vorschriften nur mit einer zusätzlichen Tragkonstruktion aus Holz gebaut werden durfte.

Für derartige Skelettkonstruktionen sind in der Regel komplizierte Knotenpunkte aus anderen Materialien nötig, um die Verbindung der linearen Elemente untereinander zu ermöglichen.

Seit 1996 gibt es in den Niederlanden das erste kommerziell verfügbare Papierhaus, das Wickelhouse. Auch dieses Projekt entstand aus der Intention, innerhalb kurzer Zeit günstige Unterkünfte für Notsituationen herzustellen. Der Baukörper besteht aus einer Wellpappen-Rahmenkonstruktion, die mittels einer Maschine lagenweise um eine hausförmige Schalung gewickelt wird. Durch diese Wickelprozesse entsteht ein 20 cm dicker Wandkern, der sowohl wärmedämmt als auch Lasten abträgt. Dieser Kern wird zum Feuchteschutz mit einer Holz furnier-Schicht innen und einer wasserdampf-durchlässigen aber wasserdichten Folie (ähnlich einer Regenmantel-Folie) sowie einer hinterlüfteten Fassade außenseitig versehen. Bei dieser Unterkunft stellte sich jedoch schnell heraus, dass der Herstellungsprozess zu kompliziert und schwer reproduzierbar ist, um für Notsituationen eingesetzt zu werden. Aus diesem Grund werden die Wickelhouses seit 2012 als Wohn- und Ferienhäuser vermarktet und verkauft.

Im Rahmen des interdisziplinären Projektes BAMP! (**BA**uen **Mit** **P**apier) haben sich seit 2017 mehrere Institute der TU Darmstadt mit Grundlagenforschung bezüglich der Verwendung von Papier als Baumaterial auseinandergesetzt.

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes werden im Kapitel ‚Technische Voraussetzungen‘ eingehender beschrieben.

### 1.3 Forschungsfragen

Die Hauptforschungsfrage des Projektes lautet:

*Wie muss eine Papierkonstruktion beschaffen sein, die sich nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik als Notunterkunft eignet und baulich umsetzen lässt?*

Unterfragen, die ebenfalls zu klären sind, wären:

- *Welche Anforderungen liegen vor?*
- *Welche Konstruktionstypologie eignet sich?*
- *Wie sieht der Bauteilaufbau aus?*
- *Welche Fügeverfahren sind möglich?*
- *Wie ist die Umsetzbarkeit? Welche Herausforderungen stellen sich im Herstellungsprozess? Welche Parameter sind entscheidend für die Herstellung?*
- *Welche Herausforderungen gibt es während des Aufbaus/ der Errichtung? Welche Parameter sind dazu entscheidend?*
- *Entspricht das gebaute Objekt den ursprünglich festgelegten Anforderungen?*
- *In welchen Gebieten bedarf es weiterer Forschung/ Optimierung?*

## 1.4 Zielsetzung des Projekts

Das Ziel des Projektes war es, kostengünstige und rezyklierbare Konstruktionen aus Papierwerkstoffen zu entwickeln, welche schnell errichtet werden können und zugleich einen komfortablen Wohnraum für Notsituationen gewährleisten. Zu diesem Zweck wurden zwei Konstruktionen entwickelt:

### *Typ 1: Modulares unabhängiges Haus*

Entwicklung eines modularen, unabhängigen Gebäudes bzw. eines Gebäudesystems, das auf einem freien Baufeld autark oder an eine bestehende Infrastruktur angeschlossen, schnell, kostengünstig mit geringem Aufwand hergestellt werden kann und temporär nutzbar ist.

### *Typ 2: integrierte Trennsysteme*

Die Implementierung von Trennsystemen innerhalb bestehender Einrichtungen. Die Entwicklung eines Trennwandsystems, das in geeignet großen Räumen, wie z.B. Sporthallen, leerstehenden Fabrik- oder Militärgebäuden zum Einsatz kommen soll.

## 2 Ausgangsbasis

### 2.1 Gesellschaftliche, soziale und politische Zusammenhänge

Laut UNHCR werden weltweit über 86 Millionen Menschen gewaltsam durch Katastrophen, Kriege und politische Verfolgungen aus ihrer Heimat vertrieben. Etwa die Hälfte von ihnen wird als Binnenvertriebene eingestuft, deren Migration innerhalb ihrer Heimatländer stattfand und oft in großen Lagern endete. Weitere 43 Millionen Menschen sind in die Nachbarländer oder sogar noch weiter weg geflohen und müssen dort versorgt werden (vgl. UNHCR Global Report 2019: 207).

Entsprechend der Zeitspanne wird zwischen 4 Unterkunftstypologien unterschieden:

- Notunterkünfte (Tage)
- provisorische Unterkunft (Wochen)
- temporäre Unterkunft (Monate/ Jahre)
- permanente Unterkunft (Jahre)

In den Flüchtlingslagern vor Ort stehen Zelte als Unterkünfte zur Verfügung, die für einen mittel- bis langfristigen Aufenthalt wenig geeignet sind. Auch die hygienische Situation ist verbesserungsbedürftig, da oft nur kollektive Waschplätze und Gemeinschaftstoiletten zur Verfügung stehen.

Der Bedarf nach weiteren Konstruktionen ist somit in allen Phasen der Unterbringung von geflüchteten Menschen gegeben. Dieser Tatsache soll damit begegnet werden, dass ein modulares System entworfen wird, dessen Konfigurationen sowohl eine kurzfristige Notunterkunft, als auch längerfristige Lösungen zulassen.

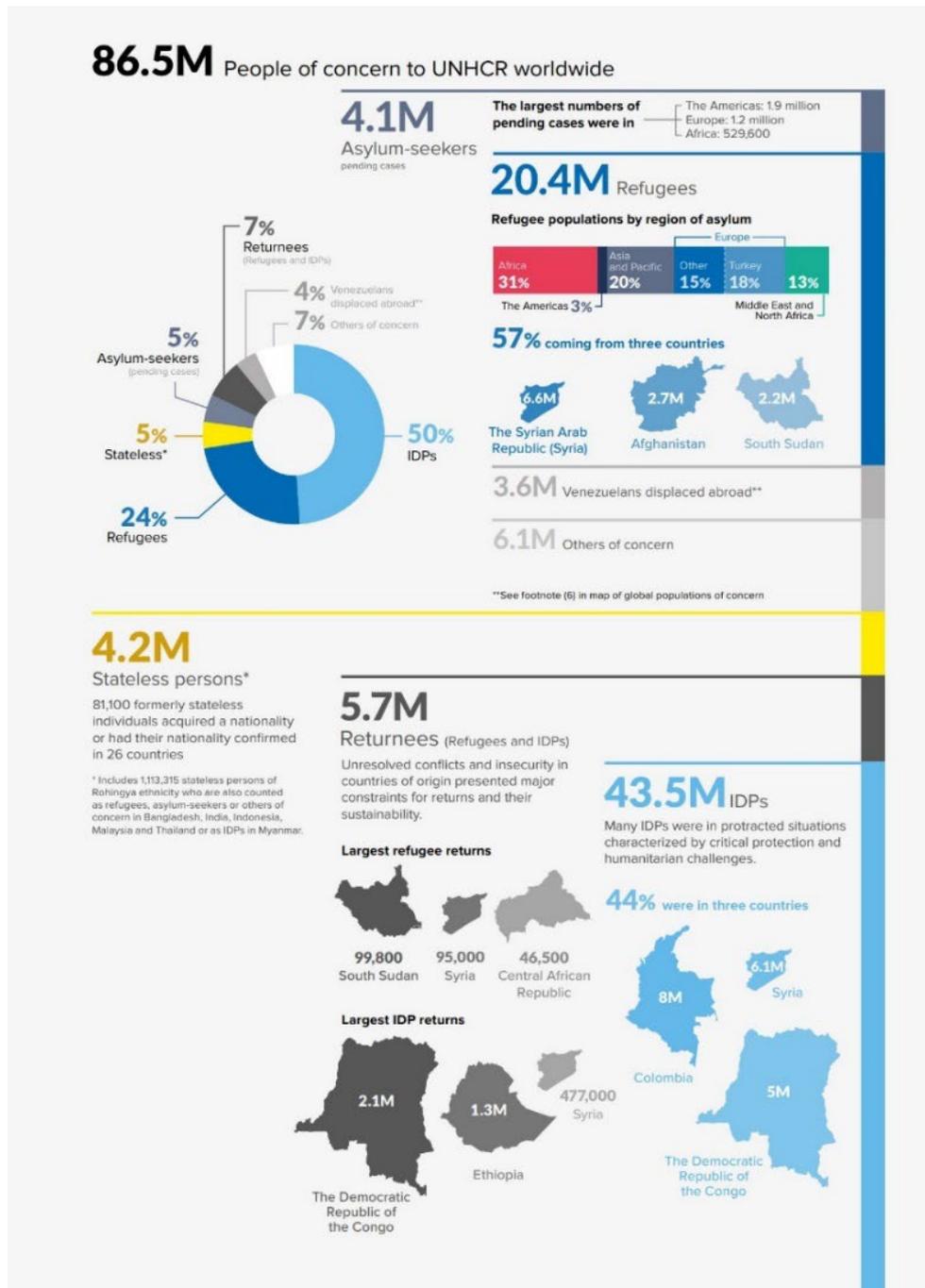


Abb.1: Daten zu Flucht und Vertreibung (aus UNHCR Global Report, 2019)

## 2.2 Anforderungen von Seiten der Hilfsorganisationen

Die Anforderungen von Seiten des Deutschen Roten Kreuzes und des Technischen Hilfswerks, welche hierzulande in Katastrophenfällen in der Regel als erste Organisationen vor Ort sind, ergaben, dass vor allem die einfache Montage, sowie die Transportierbarkeit der Konstruktionen auf LKW oder in Containern wichtige Faktoren sind, auf die Wert zu legen sei.

Nach intensivem Austausch wurde als Hauptkriterium herausgearbeitet, dass im Optimalfall das entwickelte System durch 2-3 ungelernete Kräfte weitestgehend durch Muskelkraft zu errichten sein müsse.

## 2.3 Technische Voraussetzungen/ Stand der Technik

Seit mehreren Jahrhunderten ist Papier ein vielseitig genutzter und weit verbreiteter Werkstoff in unserer Gesellschaft. Allein in Deutschland werden über 3000 verschiedene Papiersorten produziert (vgl. VDP, 2015). Neben der Anwendung als Druckmedium und hygienischen Zwecken ist Papier ein zentraler Werkstoff in der Transport- und Verpackungsindustrie. Für diese verschiedenen Industriezweige wurden Papiere hinsichtlich folgender Funktionen bereits entwickelt und optimiert:

- **Leichtigkeit und Stabilität:** Hohe Steifigkeiten werden entweder durch Vollpappen und Hülsen mit hohen Rohdichten und Verklebungen erreicht oder durch Strukturierungen mit Hohlräumen in Form von Well- und Wabenpappen.
- **Nassfestigkeit:** Papiere zu hygienischen Zwecken (beispielsweise Taschentücher) werden mit sogenannten Nassfestmitteln versehen, sodass sie Feuchtigkeit aufnehmen können und dennoch ihre mechanischen Eigenschaften beibehalten.
- **Feuerwiderstand:** Es gibt bereits Forschungen zu phosphorhaltigen Additiven im Papier, um das Material auf Faserebene vor Feuer zu schützen. (vgl. Ghanadpour, 2018) Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden von der Firma The KatzGroup weitergehende Forschungen zur brandhemmenden Ausrüstung von Papierwerkstoffen in Marktreife betrieben.
- **Rezyklierbarkeit + hochwertiger Einsatz von Rezyklat:** Auch im Bereich der Rezyklierprozesse von Papier werden seit mehreren Jahrzehnten neue Entwicklungen und Optimierungen betrieben, um den Energie- und Wassereinsatz zu minimieren und außerdem ein hochwertiges Rezyklat mit möglichst minimalen Materialverlusten zu erhalten. Es gibt bereits Rezykliertechniken, um Aluminium-Papier-Kunststoff-Verbundwerkstoffe zu trennen und in die einzelnen Materialkreisläufe zurückzuführen.
- **Optische und haptische Eigenschaften:** vor allem im Bereich der Druckpapiere wurden umfangreiche Forschungen zur Transparenz und Opazität sowie zur Oberflächenstruktur von Papieren betrieben, welche vor allem durch mineralische Füllstoffe erzielt werden.

Zudem gibt es schon erste Bauprodukte aus Papier. Häufig sind Papiere im Bau in Materialkombinationen wie Dachpappen, Gipskarton oder mit Holz furnier im Möbelbau zu finden. Es gibt jedoch auch reine Papierwerkstoffe wie Zelluloseeinblasdämmungen und Wellpappen-Dämmungen (vgl. Betz-Dämmelemente, o.D.).

Wie bereits im Kapitel ‚Papier als Baustoff‘ beschrieben, gibt es außerdem Pilotprojekte in denen Gebäude und bauliche Konstruktionen entwickelt wurden, welche hauptsächlich aus

Papier bestehen. Eine umfassende Übersicht und Analyse der bestehenden Pilotprojekte ist in der Doktorarbeit „*Paper in architecture: Research by design, engineering and prototyping*“ (Latka, 2017) zu finden. In dieser Arbeit werden die Anforderungen an Notunterkünfte aus Papierwerkstoffen definiert, diskutiert und durch Prototypen überprüft. Der Autor, Dr. Jerzy Latka, unterstützte das vorliegende Forschungsprojekt im Jahr 2019 als Gastwissenschaftler mit seiner Expertise im Bereich der Notunterkünfte aus Papier.

Des Weiteren konnte auf die weitestgehend noch unveröffentlichten Daten und Erkenntnisse des BAMP!-Projektes, in dessen Rahmen die Grundlagenforschung zur bautechnischen Anwendung von Papierwerkstoffen betrieben wurde, zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse dieses Projektes bilden die empirische Datengrundlage für die Berechnungen und Auslegungen der Konstruktion. (vgl. Kanli et al., 2019; Kiziltoprak et al., 2019)

Neben den materialtechnischen Forschungen im Bereich der Chemie und des Maschinenbaus sowie neben der Optimierung der Herstellungsprozesse von Papieren und Halbzeugen wurden im BAMP!-Projekt bauphysikalische und statische Daten generiert, auf die dieses Forschungsprojekt aufbaut.

Die wesentlichen Erkenntnisse sind:

- **Wärmedämmung:** Wellpappen weisen mit  $0,052 \text{ [W/mK]}$  die geringsten Wärmeleitfähigkeiten von Papierwerkstoffen auf. In Bezug auf Materialgewicht und Dämmfähigkeit weisen Wellstegpappen mit  $0,08\text{-}0,09 \text{ [W/mK]}$  ebenfalls gute Dämmwirkung bei geringem Gewicht und Materialeinsatz auf. Papierwerkstoffe dämmen jedoch generell sehr gut. Selbst Vollpappen mit hoher Rohdichte weisen geringe Wärmeleitfähigkeiten von  $0,07 \text{ [W/mK]}$  auf. Somit sind Papierwerkstoffe bereits ohne Optimierungsprozesse vergleichbar mit herkömmlichen Dämmstoffen. (vgl. Bach, 2020)
- **konstruktiver Feuchteschutz:** Eine Hinterlüftungsebene und eine wasserabweisende äußere Schutzschicht sind anzuraten, um einen ausreichenden Schutz vor Regen und anderen Wassereinflüssen zu gewährleisten. Schutz vor aufsteigender Feuchte kann durch wasserdichte Folien oder Aufständungen im Bodenbereich oder als Fundament erzielt werden. (vgl. Bach, 2020)
- **Schutz vor wasserdampfbedingtem Tauwasserausfall im Bauteil:** Es sollten möglichst dichte Pappen im Innenbereich und wasserdampfdiffusionsoffene Pappen im Außenbereich verwendet werden, sodass ein Dichtigkeits-Gefälle entsteht und der Wasserdampf nach außen heraus diffundieren kann. Pappen weisen eine große Bandbreite an Wasserdampfdiffusionsdichten (von  $2 \mu$  bis zu  $200 \mu$ ; vgl. Bach, 2020) auf, sodass ein solches Gefälle mit einer reinen Papierkonstruktion erzielt werden kann. Der Einsatz von verschiedenen Leimen kann die Wasserdampfdiffusionsdichte in der Konstruktion zudem enorm beeinflussen. Beispielsweise erhöhen Dispersionsleime die Wasserdampfdichte wohingegen Dextrinleime wasserdampfdurchlässig bleiben. (vgl. Bach, 2020)
- **Fügungen:** Betrachtet man die Fügetechniken für Papier (vgl. Kanli, voraussichtlich 2021) und die bauphysikalischen Eigenschaften (vgl. Bach, 2020) so wird deutlich, dass mechanische Fixierungen wie beispielsweise Verschraubungen kritisch für Papierkonstruktionen sind, da sie zu lokalen Wärmebrücken und somit zu einer Ansammlung von Feuchtigkeit entlang des Fügemediums führen. Papier verliert seine mechanischen Eigenschaften mit erhöhter Feuchtigkeit, sodass das Fügemedium schnell an Halt verliert, sobald sich dort Feuchtigkeit ansammelt. Aus diesem Grund sind Verklebungen als dauerhafte Fügetechnik für Papier in Außenwandkonstruktionen zu bevorzugen. (vgl. Bach, 2020)
- **Brandschutz:** Papier bildet, ähnlich wie Holz, während des Brandprozesses eine Kohleschicht aus wodurch man einen ausreichenden Brandschutz durch eine Über-

dimensionierung der Bauteile erzielt. Erste Versuche im Rahmen des Grundlagenforschungsprojektes BAMP! bestätigen: Je höher die Rohdichte der eingesetzten Pappe, desto stabiler wird diese Kohleschicht und umso besser schützt sie das Material. Intumeszierende Beschichtungen (wie beispielsweise Ammoniumphosphate) unterstützen die brandhemmenden Eigenschaften, indem sie im Brandfall eine zusätzliche Schutzschicht ausbilden. Der Einsatz von leicht entflammbaren Papierwerkstoffen, wie beispielsweise unbeschichtete Wellpappe, Wabenpappe o.ä. mit geringer Rohdichte, ist baurechtlich nicht zulässig. Allerdings kann durch die Kombination mit Vollpappen mit hoher Rohdichte oder mit brandhemmenden Additiven der Einsatz solcher Werkstoffe ermöglicht werden. (vgl. Bach, 2020)

- Konstruktionstypologien Papier: Wie zuvor beschrieben gibt es diverse Skelettkonstruktionen aus Papierhülsen (vor allem von Shigeru Ban) und Schalenkonstruktionen (Pavillons). Für Notunterkünfte braucht es jedoch flächige, leicht zu transportierende und schnell errichtbare Strukturen mit einfachen Fügungen.

Die Forschungslücke, die es mit dem vorliegenden Projekt zu schließen gilt, besteht also in der Entwicklung einer flächigen, möglichst einfach zu errichtenden Konstruktion und vor allem in der Umsetzung auf Basis der zuvor beschriebenen Daten und Erkenntnisse. Theoretisch müsste eine Konstruktion, welche auf dieser Basis konstruiert wird, langlebig sein und ein komfortables sowie hygienisches Raumklima gewährleisten. Diese Hypothese gilt es jedoch praktisch anhand eines Demonstrators zu überprüfen.

## 3 Forschungsteam

### 3.1 Interne Mitarbeiter

Das Projekt auf von Seiten des ISM+D unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing Ulrich Knaack durchgeführt. Die Projektbearbeitung oblag von Mai 2019 bis Februar 2020 Martin Wilfinger, M.Sc., welcher im März 2020 von Alexander Wolf, M.A. Architekt abgelöst wurde. Hinzu kamen Dr. Jerzy Latka, der bis Februar 2020 als Gastwissenschaftler an der TU Darmstadt tätig war und Rebecca Bach, M.A., die als Teamleiterin die Forschung unterstützte.

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter wurden zudem durch mehrere studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräfte unterstützt.

### 3.2 Kooperationspartner

Als Kooperationspartner, die das Projekt schon in der Antrags- und Bewilligungsphase unterstützt haben, traten auf:

Katz GmbH&Co. KG: Hersteller von Vollpappen, der das Projekt mit der Bereitstellung von Material und Beratungsleistungen unterstützt hat.

Die Firma Katz hat in jüngster Vergangenheit eine B2-zertifizierte Pappe entwickelt und diese zu Testzwecken dem ISM+D zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden eine Stellungnahme der Fa. Katz zum Produkt:

*KATZ unlined no burn ist eine Ammoniumfreie schwer entflammbare Holzschliffplatte. Bei Kontakt mit einer Wärmequelle oder einer Flamme sublimiert die auf Natrium und Phosphor basierende Formulierung und verhindert den Zugang von Sauerstoff zur Befeuerung der Flamme. Ohne Sauerstoff gibt es keine Verbrennung und keine Ausbreitung der Flamme. Die Platte verkohlt, aber sie verbrennt nicht.*

SWAP (Sachsen) GmbH Verbundwerkstoffe: Hersteller von Wellstegpappen, der das Projekt mit der Bereitstellung von Material und Beratungsleistungen unterstützt hat.

Unger-Diffutherm GmbH: Hersteller von Dämmsystemen, der das Projekt mit Beratungsleistungen unterstützt hat.

Transsolar Energietechnik GmbH: Planungsbüro für Energietechnik, welches das Projekt mit Beratungsleistungen unterstützt hat.

Ingenieurbüro Langner: Planungsbüro für Bauphysik, welches das Projekt mit Beratungsleistungen unterstützt hat.

Imagine Computation GmbH: Planungsbüro für digitale Bauplanung, welches das Projekt mit Beratungsleistungen unterstützt hat.

### 3.3 Förderer

Im Laufe des Projekts ist es gelungen eine Reihe weitere Firmen als Förderer für das Projekt zu akquirieren und zu integrieren.

Hierbei handelt es sich um:

Bauverein AG: Das kommunale Wohnungsbauunternehmen der Stadt Darmstadt hat uns seine Bereitschaft signalisiert ein Grundstück zur Verfügung zu stellen, auf dem ein Papierhaus errichtet werden könnte (vgl. 2.7), sowie nach Errichtung für die Vermietung und den Betrieb zu sorgen.

Easy2trade GmbH: Firma für Spezialfräser, die das Projekt mit Tests zur Verfahrenstechnik bei der Zerspanung von Pappe unterstützt hat.

Im folgenden eine Stellungnahme der Fa. Easy2trade zu den Versuchen:

*Das Material hat eine gute Steifigkeit, was den Zuschnitt begünstigt. Leider war das Material aber auch leicht verzogen bzw. wellig. Dies hatte zur Folge, dass das Material vom Vakuumbett nicht sauber festgehalten werden konnte und daher mittels Holzschrauben befestigt werden musste.*

*Des Weiteren haben wir festgestellt, dass die einzelnen Schichten nicht mehr ganz sauber laminiert waren.*

*Nichtsdestotrotz können wir positive Testresultate vorweisen.*

*Mit unserem Fräser-Typ 2091-4724-20 haben wir in mehreren Durchgängen von jeweils 25mm das Material im Gegenuhzeigersinn und mit einer Geschwindigkeit von 12'000 u/min und einer Vorschubgeschwindigkeit von 1'500mm/min geschnitten.*

*Aus unserer Sicht waren die Testschnitte erfolgreich und stimmen uns sehr positiv. In den nächsten Tagen werden wir Ihnen die geschnittenen Muster zukommen lassen, damit Sie sich anhand dieser ein noch klareres Bild machen können.*



Abb. 2: Fräsversuch Fa. Easy2trade

B&O Wohnungswirtschaft GmbH: Generalunternehmer aus der Bauwirtschaft, der Interesse daran zeigt, mit Häusern aus Papier ein weiteres Geschäftsfeld zu eröffnen und das Projekt mit Beratungsleistungen unterstützt hat.

Eurowell GmbH & Co. KG: Hersteller von Wellpappen, der das Projekt mit der Bereitstellung von Material und Beratungsleistungen unterstützt hat.

Yamaton Paper GmbH: Hersteller von Wabenpappen, der das Projekt mit der Bereitstellung von Material und Beratungsleistungen unterstützt hat.

Papier- u. Kartonfabrik Varel GmbH & Co. KG: Hersteller von Vollpappen, der das Projekt mit der Bereitstellung von Material und Beratungsleistungen unterstützt hat.

## 4 Forschungsmethode

Bei dem vorliegenden Forschungsprojekt handelt es sich um experimentelle Forschung.

Anhand bestehender Grundlagen und deren Analyse (siehe Kapitel ‚Technische Voraussetzungen/ Stand der Technik‘) wurde die Forschungslücke im Bereich der detaillierten Ausführungsplanung und Umsetzung der Papierkonstruktion identifiziert.

Anhand der Anforderungen seitens der Hilfsorganisationen fand die Entwurfsentwicklung basierend auf architektonischen Planungsmethoden statt.

Anschließend erfolgte der Bau von Prototypen im Rahmen von Seminararbeiten und Vorversuche im Rahmen von Bachelorthesen zur Validierung, Detaillierung und Optimierung des Entwurfs.

Anhand dieser Ergebnisse wurde der Entwurf optimiert und es erfolgte die detaillierte Ausarbeitung mit Planunterlagen zur Bauteilherstellung.

Zu Beginn der Herstellung erfolgten weitere Vorversuche zur optimalen Leimung der Bauteile. Diese Herstellungsprozesse wurden durch den Einsatz von Sprüh-Klebeverfahren und Trocknungs- sowie Pressprozessen mittels Vakuum optimiert.

Anschließend erfolgte der Aufbau des Demonstrators und abschließend die Analyse der Erkenntnisse aus der Herstellung und dem Aufbau des Demonstrators.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Klärung der Anforderungen

Die Grundlagen für die Durchführung des Projektes wurden ermittelt. Diese umfassten einerseits die technischen Aspekte betreffend der verwendeten Papiermaterialien, andererseits aber auch die Anforderungen der Hilfsorganisationen, sowie nach Erstellung des ersten Entwurfs auch die baurechtlichen Aspekte.

Mit Unterstützung von DRK und THW wurde eine Outline mit Anforderungen definiert, die eine Notunterkunft leisten muss, um sich im Einsatz als praktikabel zu erweisen.

Hinzu kam die Klärung technischer Rahmenbedingungen, vor allem unter Rückgriff auf die Ergebnisse aus BAMP! und die Dissertation von Dr.Latka (vgl. 2.3).

### 5.2 Seminararbeiten

Im Rahmen des interdisziplinären Moduls "experimentelle Fassadentechnik" haben Studenten der Fachbereiche Bauingenieurwesen und Architektur der TU Darmstadt im Sommersemester eigene Wand-, Decken- und Bodenkonstruktionen aus Papierwerkstoffen entwickelt.

Es wurden jeweils zwei Wand-, Boden- und Dachaufbauten, sowie zwei Eckanschlüsse entwickelt. Die Gruppen wurden dabei von den Projektverantwortlichen betreut.

Im Juli 2019 wurde ein erster Rahmen im Maßstab 1:1 hergestellt, für den dem jeweils zwei unterschiedliche Bodenaufbauten, Wandaufbauten und Traufpunkte konzipiert wurden. Dieses Mock-Up diente der Untersuchung in welcher Weise die Tragkonstruktion hergestellt werden könnte. Der Fokus des Versuches lag darin die Eigenschaften von Skelettkonstruktionen mit den Eigenschaften von mehrfach laminierten Pappen zu vergleichen.

Im darauffolgenden Wintersemester 19/20 behandelte das Modul "experimentelle Fassadentechnik" ebenfalls das „Bauen mit Papier“. Die Semesteraufgabe beinhaltete die Entwicklung einer wasserdichten Fassadenbekleidung aus Papierwerkstoffen. Besonders hervorzuheben haben sich hierbei zwei Gruppen die - einmal mit Hilfe einer Wachsträngung und einmal mit der Verwendung von Polyethylen-imprägniertem Papier („TetraPak“) – Schindelsysteme als vorgehängte hinterlüftete Fassade entwickelten.

Das System der „Tetra-Pak“-Schindel wurde für die Konzeption des gebauten Demonstrators übernommen.

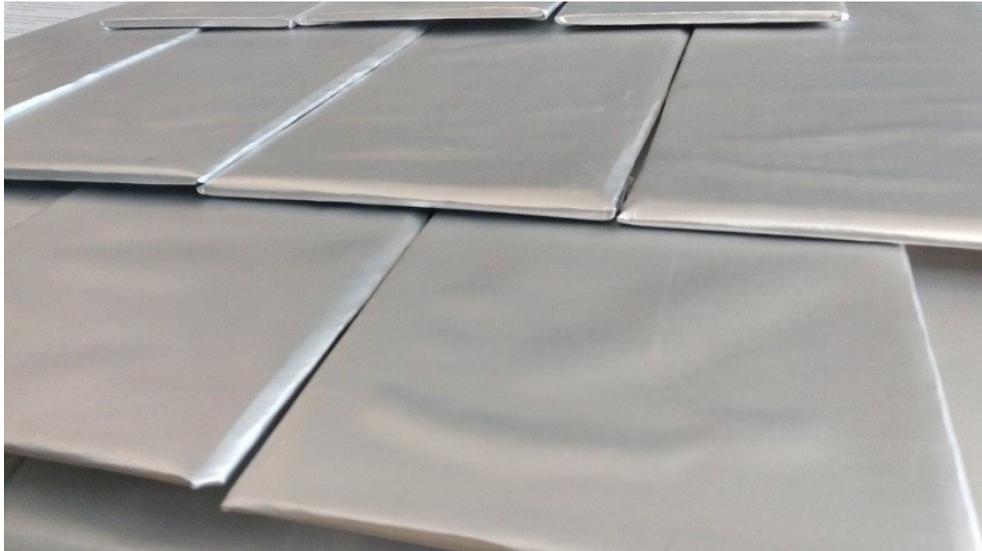


Abb. 3: Seminararbeit „TetraPak“-Schindel

### 5.3 Abschlussarbeiten

Im Rahmen des Projektes wurden am ISM+D drei experimentelle Bachelor-Thesen absolviert, die sich mit den folgenden Themen befassen:

#### 5.3.1 Wandkonstruktionen aus Papier

Experimentelle Herstellung und Untersuchung von Wandkonstruktionen aus Papier.

Frau Lia Birmele hat in ihrer Arbeit diverse mehrschichtige Wandaufbauten aus Papierlaminaten konzipiert, hergestellt und anschließend auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Ihre Ergebnisse wurden bei der Optimierung des Wandaufbaus für den Demonstrator angewandt.

Ihr Fazit lautet:

*„Die Praxis zeigt, dass es nicht einfach ist, einheitliche Exemplare der Wandaufbauten herzustellen. Solange der Produktionsprozess von Papierbauteilen nicht technisiert ist, ist es schwierig, die Qualität der Bauteile sicherzustellen. Wie die Untersuchungen der Tragfähigkeit zeigen, stellt die gleichmäßige Verklebung der einzelnen Papiere und Schichten aktuell eines der größten Probleme für den Einsatz von Papier in lastabtragenden Wänden dar. Es muss sichergestellt werden, dass erst Materialversagen eintritt, bevor die Klebeschicht versagt. Dann können Modelle entwickelt werden, mit denen die Tragfähigkeit des Gesamtquerschnitts anhand der einzelnen Werte für die Schichtmaterialien kalkuliert werden kann. Für die einzelnen Schichtmaterialien sind zwar in der Literatur schon Steifigkeits- und Festigkeitswerte zu finden, jedoch fehlen Materialkennwerte, die unter einheitlichen, genormten Bedingungen ermittelt wurden. Diese werden benötigt um den Widerstand der Wände berechnen und mit ausreichender Sicherheit angeben zu können. Es wird daher noch etwas Zeit und Aufwand in Anspruch nehmen, bis Papier seine Zulassung als Baustoff erhält und genormte Berechnungsverfahren zur Verfügung stehen. Für den Einsatz von Papier in Wandkonstruktionen spricht jedoch die Besonderheit, dass Papier den Lastabtrag und die Wärmedämmung vereinen kann. Die übliche Trennung von tragender und dämmender Schicht in unterschiedliche Baumaterialien ist nicht notwendig. Durch geschickte Kombination der Schichten kann ein Querschnitt gänzlich aus Papierwerkstoffen beide Funktionen erfüllen. Trotz Optimierungspotential haben dies die*

experimentellen Untersuchungen der Wandkonstruktionen hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit und der Tragfähigkeit bewiesen. Um auch den weiteren bauphysikalischen Anforderungen gerecht zu werden, muss eine Untersuchung bezüglich des Schallschutzes, des Brandschutzes und insbesondere des Feuchteschutzes folgen. Zudem wird empfohlen, die wärmeschutztechnischen Untersuchungen fortzusetzen. Diese sollten aufgrund der Unsicherheiten im eingesetzten Messsystem sowohl die Überprüfung der Wärmedurchlasswiderstände als auch die Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände umfassen. Die verwendete Heat-Box eignet sich dazu nur bedingt. Um die wärmeschutztechnischen Eigenschaften der Wände wirklichkeitsnah zu erfassen, müssen die Wände als Bestandteil eines vollständigen Gebäudes über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. Die Untersuchungen der Tragfähigkeit erfordern ebenfalls eine Weiterführung. Die Stabilitätsuntersuchungen sind mit zunehmender Bauteillänge fortzusetzen und die Wände zusätzlich auf Biegung zu prüfen. Hierbei ist die Vergrößerung der Anzahl der Probekörper ratsam, um die Streuung der Materialwerte zu erfassen. Zur Verbesserung der Tragfähigkeit sollte zudem an der Klebtechnik gearbeitet und alternative Klebstoffe in Betracht gezogen werden. Der Ausblick auf die zahlreichen weiteren Untersuchungen zeigt, dass Wandkonstruktionen aus Papier noch am Anfang der Entwicklung stehen. In dieser Bachelorarbeit konnten jedoch Grundlagen gelegt werden, um die Anwendung von Papier für Mehrschichtwandaufbauten zu öffnen und das vorhandene Potential in Zukunft ausschöpfen zu können.“ (aus Birmele, 2020)

### 5.3.2 Deckenkonstruktionen aus Papier

Experimentelle Entwicklung, Herstellung und Prüfung von Decken- und Bodenkonstruktionen aus Papier

Herr Walid Saggaf hat in seiner Arbeit diverse mehrschichtige Boden- und Deckenaufbauten aus Papierlaminaten konzipiert, hergestellt und anschließend auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Seine Ergebnisse wurden bei der Optimierung des Bodenaufbaus, sowie des Abdichtungskonzepts für den Demonstrator angewandt.

Sein Fazit zur mechanischen Festigkeit eines Papierbodens lautet:

*„The compression strength of the floor will be determined by that of a single honeycomb panel. The arrangement of cardboard in a floor will help reduce the reduction of compression stiffness to improve the compression strength of the floor. In the honeycomb panel, the compression forces are taken by the ribbon. To increase the compression stiffness of a single honeycomb the surface area of the ribbon will need to be increased. The area of the ribbon can be increased by increasing the thickness of the ribbon and minimizing the voids in the honeycomb core. To avoid possible failures due to shear stress, the relation between the height of the solid fiberboard between the honeycomb panels and the size of the cell need to be optimized This will ensure the easy transfer of the vertical forces inside the floor. Also, the effect of adding solid fiberboards between every honeycomb to bending stiffness should be investigated. This will help increase the compression stiffness of the floor, without affecting the bending stiffness. The relation between the decrease of honeycomb panels and an increase in the reduction of stiffness should be further investigated. And it should be confirmed through more test s If this were the case, then it would affect positively the bending stiffness. This means, to increase the compression stiffness more honeycomb panels would be placed in between the facings fiberboards of the floor in return the bending stiffness will automatically increase. The bending stiffness increases with the increase of distance between the tension and compression forces in fiberboards.“*

(aus Saggaf, 2020)

Sein Fazit zur Abdichtung eines Papierbodens lautet:

*„The results show that the foils with the vapor permeability ( $S_d$  above 240 m) started to show some resistance to water attacks. Their degree of resistance was different from each other. Since the same tape was used for all the foils, then the water penetration has to do with their physical properties like thickness. The Eltete Alu pap foil showed a total blockage of water penetration. Additionally, the foil provides thermal insulation. This is due to the layers of paper and aluminum which gives the foil good thermal insulation. However, more tests on the foil should be done to find out how does it affect the strength of the samples before the application of the foil in the building of the house. The foil protected the samples from water diffusion and other water types. But the effect of water condensation that might have formed inside the floor was not observed. The formation of water condensation inside the floor is influenced by the heat transfer between the layers of cardboards on the floor. For further Research the formation of water condensation both inside and on the surface of the floor should be investigated and possible ways to reduce or avoid it. The sides of the cardboards were prone to water attack. Possible ways to avoid this or protect the cardboards from the water attacks should be researched. The effect of repeatedly losing and gaining of water moisture in the paper floor should also be investigated. And to what extent does it affect the swelling and quelling of the paper floor.“*

*(aus Saggaf, 2020)*

Sein Fazit zur Wärmedämmung eines Papierbodens lautet:

*„It is clear that despite its lightweight nature, cardboard has better thermal properties than most other building materials. This shows that cardboard itself is sufficient to act as an insulating material. Furthermore, unlike most other insulating material, cardboard can bear loads. For further research the following question can be investigated:  
Heat transfer in cardboards is direction dependent how can a heat flow in a joint be realized?  
It is important to understand this to avoid the formation of water condensation inside the floor.“*

*(aus Saggaf, 2020)*

### 5.3.3 Papierwandmodule verbinden

Experimentelle Entwicklung, Herstellung und Prüfung von Verbindungssystemen für Papierwandkonstruktionen.

Herr Marvin Eikam hat in seiner Arbeit diverse Verbindungsmethoden für elementirere Papier-Konstruktionen konzipiert, hergestellt und anschließend auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Seine Ergebnisse wurden bei der Konzeption der Elementverbindungen für den Demonstrator angewandt.

Sein Fazit lautet:

*„Die Verbindungen aus Stahl verfügen über gute Zugfestigkeiten, jedoch hat Stahl eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Bei den Verbindern, die hauptsächlich aus Kunststoff bestehen, ist dies genau andersherum. Die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoff passt gut zu der Wärmeleitfähigkeit von Papier, sodass die Entstehung von Wärmebrücken gemindert wird. Dafür weisen diese Verbinder deutlich schlechtere Zugfestigkeiten auf. Der Lamello Clamex S Verbinder, welcher verschraubt und verleimt ist, zeigt die besten Zugfestigkeiten der Kunststoffverbinder auf. Da der Verbinder kaum Toleranzen zulässt, ist dieser sehr schwierig zu verbauen und eignet sich nicht für den Bau eines Hauses. Der aus Zinkdruckguss bestehende Verbinder Hettich Rastex 15 ist im Bezug auf Zugfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit nicht geeignet. Der Unterschied der Zugfestigkeiten zwischen den Verbindern aus Stahl und den Kunststoffverbindern ist mit mindestens 3kN sehr groß. Daher ist die Eigenschaft der Wärmeleitfähigkeit der Zugfestigkeit hintenanzustellen. Die Festool Domino Verbinder weisen mit rund 4,5kN gute Zugfestigkeiten auf. Jedoch können nur wenige Herstellungsungenauigkeiten ausgeglichen werden, weswegen auch dieser Verbinder nicht geeignet ist. Die Verbindung aus Gewindestange und Flachverbinder zeigten die besten Zugfestigkeiten. Hiermit gibt es aber keine Möglichkeit die übereinanderliegenden bzw. vertikal zueinander angeordneten Module aneinanderzuziehen. Somit eignet sich diese Verbindung nur als Ergänzung zu anderen Verbindern, die diese Eigenschaft aufweisen. Trotzdem kann diese Art der Verbindung für das Zusammenhalten der einzelnen*

*Module in horizontaler Ebene genutzt werden. Die Hettich Arbeitsplattenverbinder AVB 5 eignen sich am Besten. Hierbei ist nur zwischen den getesteten Einbauweisen zu unterscheiden. Die höchsten Zugfestigkeiten haben die in Faserrichtung des Holzes eingebauten Verbinder aufgewiesen. Hierfür müssen bei der Produktion passende Taschen für die Holzklötze gefräst werden. Das Fräsen von Taschen und das spätere Einsetzen der Verbinder sind produktionstechnisch aufwendig. Diese Variante birgt das Risiko eines Versagens der verleimten Flächen. Praktikabler für die Produktion ist der Einbau einer Rahmenkonstruktion aus Holz, in der das Holz direkt in das Wandmodul eingebaut werden kann. Hinterher werden die Fräsungen für die Verbinder vorgenommen.“*

*(aus Eikam, 2020)*

Es ist beabsichtigt die gewonnenen Erkenntnisse in Form von wissenschaftlichen Publikationen in einem Fachjournal zu veröffentlichen.

## 5.4 Entwürfe

Anhand der ermittelten Grundlagen wurden die beiden Systeme „modulares unabhängiges Haus“ und „integrierte Trennwandsysteme“ im architektonisch entworfen.

### 5.4.1 Typ 1 – Modulares unabhängiges Haus

Was die Gestaltung betrifft, so spiegeln die Modularen unabhängigen Häuser den Archetyp eines Hauses wider, da das Satteldach fast kulturunabhängig als bildliche Assoziation des Wohnens verstanden wird. Um diesen Gestaltungsansatz mit dem Anspruch der Modularität in Einklang zu bringen, wurde diese Form auch auf das Modul übertragen. So wurden zunächst diverse, je nach Nutzungszweck unterschiedlich ausgestattete, Elemente des Hauses entwickelt aus deren Addition jeweils unterschiedliche Unterkunftstypen erstellt werden können. Diese Typen reichen von einer Variante für den mehrtägigen bis mehrwöchigen Aufenthalt in akuten Notsituationen bis hin zu Lösungen für einen längerfristigen Aufenthalt mit integrierter Küche und entsprechen so den Nutzungsszenarien aus Kap. 2.1.

Allen gemein sind hierbei die festgelegten Dimensionen eines einzelnen Rahmenmoduls mit einer Breite von 5,14m, einer Traufhöhe von 2,80m und einer Firsthöhe von 4,70m, die sich aus der Dachneigung von 37,5° ergibt. Die Gebäudebreite entwickelte sich hierbei aus den geometrischen Anforderungen mehrerer entworfenen Typen und wurde für ein gemeinsames System gemittelt. Die Traufhöhe gewährleistet eine zum Stehen noch ausreichende lichte Höhe an der Innenwand, da dort in den meisten Zonen die Verkehrsflächen liegen.

Diese Rahmen wiederum sollen mit einer Modultiefe von 0,625m ausgeführt werden, welches ein im Holzbau übliches Rastermaß ist. Die Segmente A-I haben eine jeweilige Tiefe von  $n \times 0,625\text{m}$ , in jeweiliger Abhängigkeit von Ihrem Nutzungszweck.

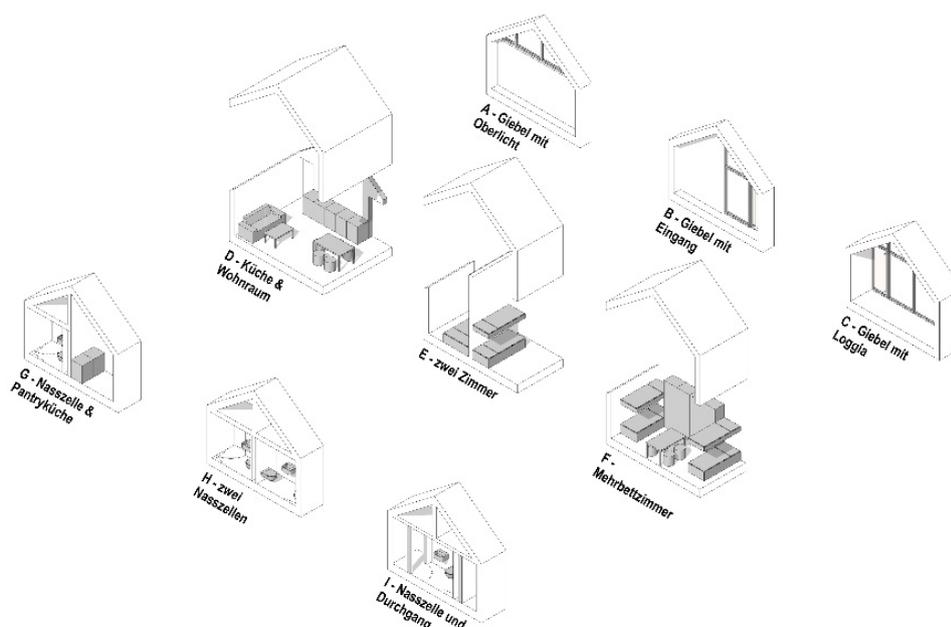


Abb.4: Zusammensetzbare Einzelmodule mit verschiedenen Nutzungen

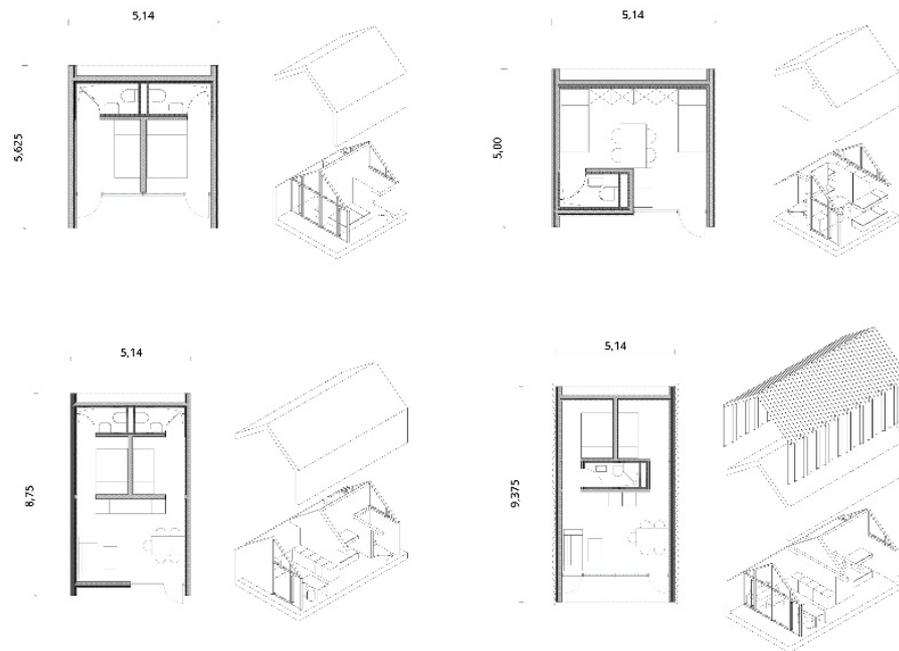


Abb.5: Verschiedene Varianten des Modulsystems

Zusammengefasst bieten die Entwürfe die Möglichkeit, diverse Funktionsbereiche zu bedarfsgerecht angepassten Notunterkünften zu kombinieren und somit trotz einer Standardisierten Fertigung ein gewisses Maß an individualisierter Nutzung zu ermöglichen. Die aufgezeigte Zahl und Kombination ist hierbei jedoch nicht als erschöpfend zu betrachten, da bei wechselnden oder angepassten Anforderungen weitere Iterationen des Systems denkbar bleiben.

#### 5.4.2 Typ 2 – Integrierte Trennwandsysteme

Unter Berücksichtigung der im Vergleich zum Modulhaus geringen technischen Anforderungen, wurde ein integriertes Trennwandsystem entwickelt. Im Einsatzszenario des Ausbaus einer Sporthalle zu einer Notunterkunft ist weder muss das System lediglich eine Luftfeuchtigkeit von 85% bei 20°C widerstehen, unter Eigengewicht tragfähig bleiben und der Brandschutzklasse B1 entsprechen.

Die integrierten Trennwände bestehen aus einem mit Vollpappen beplankten Holzrahmen und werden von einer innen liegenden Wabenpappe ausgesteift. Die Montage der Einzelsegmente zum Trennwandsystem lässt Verbindungen in Längsrichtung, sowie T- und L- Stöße zu. Zur Realisierung von Türstationen wäre ein weiteres Bauteil als Ober- oder Untergurt erforderlich, um die gegenseitig wirkende Aussteifung der Elemente zu gewährleisten.

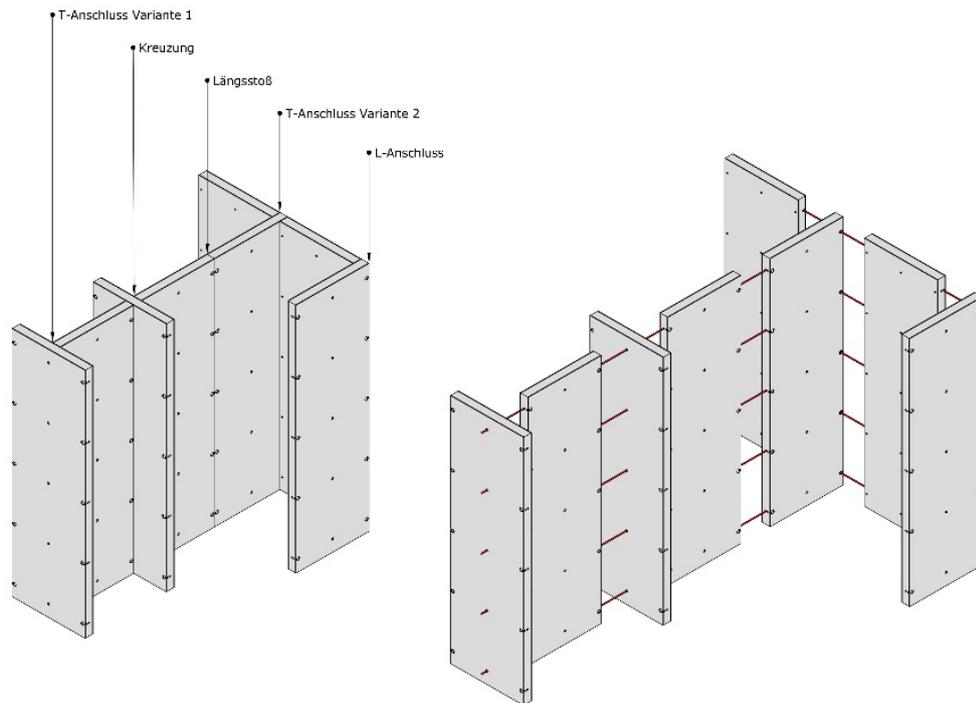


Abb.6: Verbindungsvarianten der integrierten Trennwandsysteme

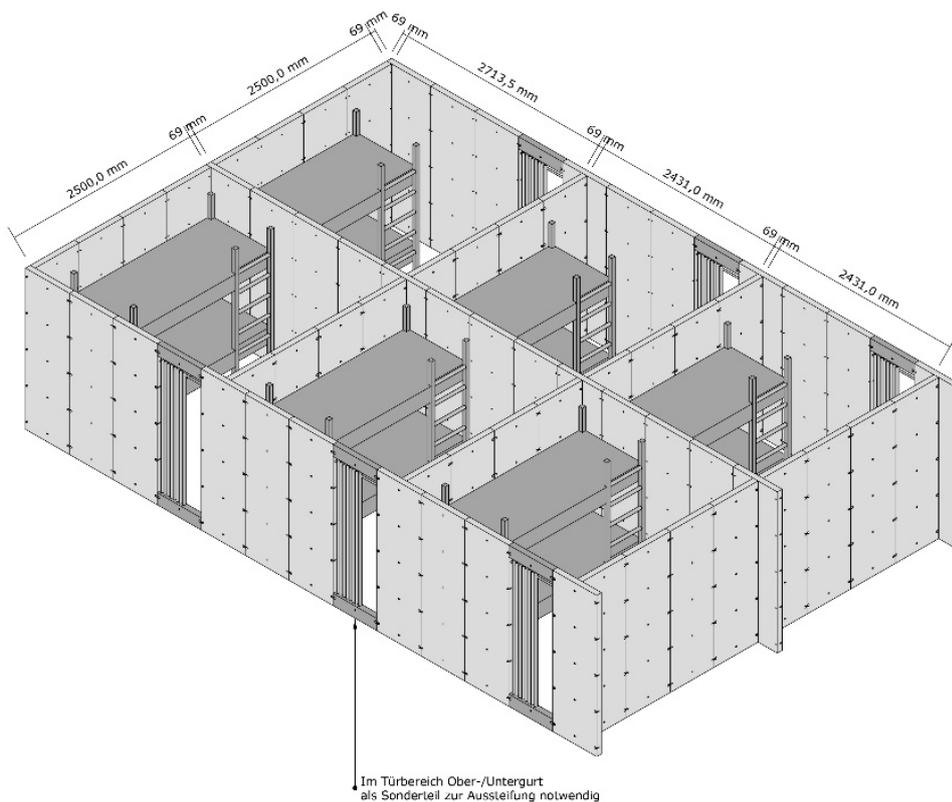


Abb.7: Anwendungsbeispiel integrierte Trennwandsysteme

Zusammengefasst wäre es möglich, mit Hilfe eines Standardisierten Bauteils verschiedene Situationen zur räumlichen Abtrennung in größeren Hallengebäuden zu realisieren. Lediglich für die Türen zu den jeweiligen Wohnzellen wäre ein weiteres Bauteil notwendig.

## 5.5 Material

Als Konstruktionsmaterial werden vor allem Well- und Vollpappen eingesetzt, zu einem kleineren Anteil auch Wabenpappen, sowie Kanthölzer zur Aussteifung der Verbindung, da sich Papierwerkstoffe aufgrund ihres geringen Kantenstauchwiderstandes beim Festziehen der Verbinder verformen. Um eine Brandschutzwirkung in den äußeren Schichten zu erzielen, wird vom Projektpartner *Katz Group* eine neu entwickelte Vollpappe zur Verfügung gestellt, welche mit brandhemmenden Additiven behandelt wurde. Diese wurde kürzlich für die Baustoffklasse B2 zertifiziert. Ebenfalls von der *Katz Group* wurde ein hydrophobiertes Material beige gesteuert, wie man es von Getränkeuntersetzern kennt.

Die jeweils äußersten Schichten wurden aus Polyethylen-imprägniertem Papier gefertigt, das sonst als Getränkekarton Verwendung findet und so einen direkten Wassereintrag verhindern soll.

Zusammenfassend war es vorgesehen den Demonstrator zu einem möglichst hohen Anteil aus Papierwerkstoffen und Spezialpapieren zu fertigen. Lediglich an Stellen, an denen die Stabilität von Papierwerkstoffen einen Einsatz nicht zuließ, wurde Holz als ebenfalls hochgradig rezyklierbares Ersatzmaterial verwendet.

## 5.6 Laminieren

Mit Hilfe diverser Versuchsmuster konnten die Annahmen zum Material, der Klebtechnik und der Elementverbindungen überprüft werden.

Das zunächst durchgeführte flächige Bestreichen mit wasserbasiertem Leim führte zu einer dauerhaft konvexen Verformung der frisch geklebten Segmente, weshalb diese für eine Weiterverarbeitung ungeeignet waren. Diverse Versuche diesem Effekt mit Hilfe eines unter Druck stattfindenden Pressvorganges, beispielsweise durch Stahlgewichte und Holzplatten, entgegenzuwirken, scheiterten.

Ausreichend Druck konnte lediglich mit einem Vakuum-Pressverfahren erzielt werden. Hierbei wurde ein elastischer Kunststoffsack mit den Werkstücken befüllt, abgedichtet und diesem anschließend mittels einer Vakuumpumpe die Luft entzogen. Unter Verwendung dieses Verfahrens ließe sich, unter Annahme eines Umgebungsdruckes von 1 bar und der vollständigen Evakuierung des Kunststoffsackes, ein Flächendruck von bis zu 100 kN/m<sup>2</sup> erzeugen. Aufgrund der herrschenden Werkstattbedingungen wurde jedoch keine vollständige Evakuierung erreicht, weshalb in der Fertigung ein Restdruck von 0,3 bar im Vakuumsack verblieb. Daher ist von einem Flächendruck von ca. 70 kN/m<sup>2</sup> auszugehen.

Da der verwendete Holzleim nur an der Luft aushärtete, war es erforderlich einen Klebstoff zu finden, bei dem eine Aushärtung auch unter Luftausschluss gewährleistet ist. Zu diesem Zweck eignen sich vor allem zwei-Komponenten-Kleber, sowie einige ein-komponenten-Lösungen. Für die Fertigung des ersten Prototypen wurde ein zwei-komponentiges Epoxidharz mit einer Verarbeitungszeit von 60 Minuten verwendet, womit eine stabile und flächige Verklebung der Schichten erreicht werden konnte. Nachteilig wirkte sich hierbei aus, dass der Klebstoff händisch aufgespachtelt werden musste und die Lamine bis zum vollständigen Abbinden des Klebstoffes etwa 12 Std. im Vakuum verbleiben mussten.

Da das Epoxidharz zur geplanten Errichtung des Demonstrators nicht mehr zur Verfügung stand, wurde als Alternative ein Naphtha-basiertes Produkt gefunden, welches dank seiner Verarbeitbarkeit mittels Sprühpistolen und einer Abbindezeit von nur 30 Minuten eine zeitlich effektivere Fertigung zulässt.

Zusammenfassend stellte das Laminieren eine der größten Herausforderungen im Projekt dar. Auch nachdem ein Verfahren gefunden wurde, was die Produktion des Demonstrators ermöglicht, ist dieses aufgrund seiner ökologischen Bedenklichkeit noch nicht als eine zufriedenstellende Lösung zu betrachten.

## 5.7 Baukonstruktion

### 5.7.1 Schichtaufbau Aussenwand/Dach

Der überwiegende Teil des Aufbaus, bezogen auf das Volumen, besteht aus Wellpappe, deren kleinzellige Struktur eine gute Dämmwirkung hat.

Der Schichtaufbau der Wandsegmente lässt sich in 3 Bereiche unterteilen, die innere und äußere Schutzschicht und die dazwischen liegende Kernschicht.

Während die Schutzschichten die Konstruktion vor Umwelteinflüssen schützen, dient die Kernschicht in erster Linie zur Sicherung der Stabilität der Konstruktion und wird als einzige für die statischen Berechnungen verwendet. Sie besteht aus mehreren Lagen Well- und Vollpappe sowie einem Kern aus Wabenpappe. Die symmetrisch aufgebauten Schutzschichten bestehen ebenfalls überwiegend aus Wellpappe und sind mit Phosphor-impregnierter Vollpappe bekleidet, die für den Brandschutz in Klasse B2 zugelassen ist. Ein erster Prototyp des geplanten Wand-Schichtaufbaues wurde im August 2019 hergestellt und auf der BAMP!-Konferenz im November 2019 präsentiert (vgl. 5.12.2).

Zusammengefasst bestehen Wände und Dächer des Demonstrators aus drei Schichten, wobei sich die äußeren Schichten spiegelsymmetrisch gleichen und für den Schutz der inneren, tragenden, Schicht sorgen.

### 5.7.2 Schichtaufbau Bodenplatte

Es wurde ein mehrschichtiger Bodenaufbau entwickelt, welcher in Folie gekleidet wird, um ihn vor aufsteigender Bodenfeuchte zu schützen. Bei der Konstruktion der Bodensegmente war die Biegesteifigkeit des Bauteils und sein Widerstand gegen aufsteigende Feuchtigkeit von besonderer Bedeutung. Im Gegensatz zur Verwendung von Wellpappe, wie bei den Wänden, macht die Wabenplatte den größten Teil des Volumens der Bodensegmente aus. Ihre quer zur Segmentrichtung liegende Zellstruktur gewährleistet eine hohe Drucksteifigkeit in Dickenrichtung der Platte, wobei der durch den Kern gegebene Abstand der Deckschichten eine hohe Biegesteifigkeit sicherstellt und zur Dämmwirkung des Bauteils beiträgt. Da an die Bodenplatte keine Brandschutzanforderungen gestellt werden, werden an dieser Stelle keine B2-Platten verwendet. Vielmehr steht hier die Vermeidung von Feuchteschäden im Vordergrund, die mit Hilfe eines speziellen wasserabweisenden Kartons verhindert werden sollen.

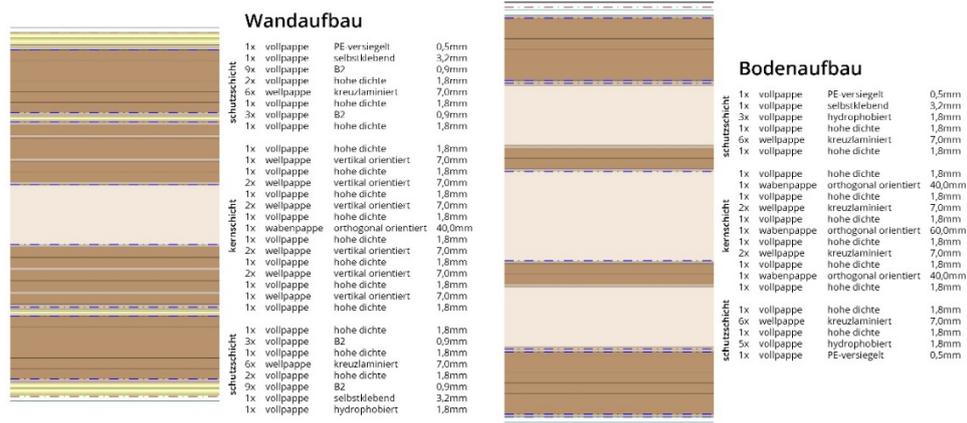


Abb. 8: Schichtaufbauten Wand, Dach und Bodenplatte

Zusammenfassend lag bei der Konstruktion der Bodenplatte das Hauptaugenmerk auf der Biegesteifigkeit der Konstruktion, sowie ihrem Widerstand gegen aufsteigende Feuchtigkeit.

### 5.7.3 Schichtaufbau integrierte Trennwandsysteme

Da im Falle der integrierten Trennwandsysteme nur geringe Anforderungen an den Brand- und Feuchteschutz gestellt wurden und auch aus statischer Sicht nur die Eigenlast und die Aussteifung des Gesamtsystems zu berücksichtigen ist, konnte hier ein schlanker Aufbau gewählt werden.

Der Kern der Segmente besteht aus Wabenpappen, die symmetrisch mit zwei Lagen Vollpappe, sowie einer Lage B2-Platten verkleidet sind. Dies sorgt für ein Mindestmaß an Feuerwiderstand, sowie eine gute Biegesteifigkeit.

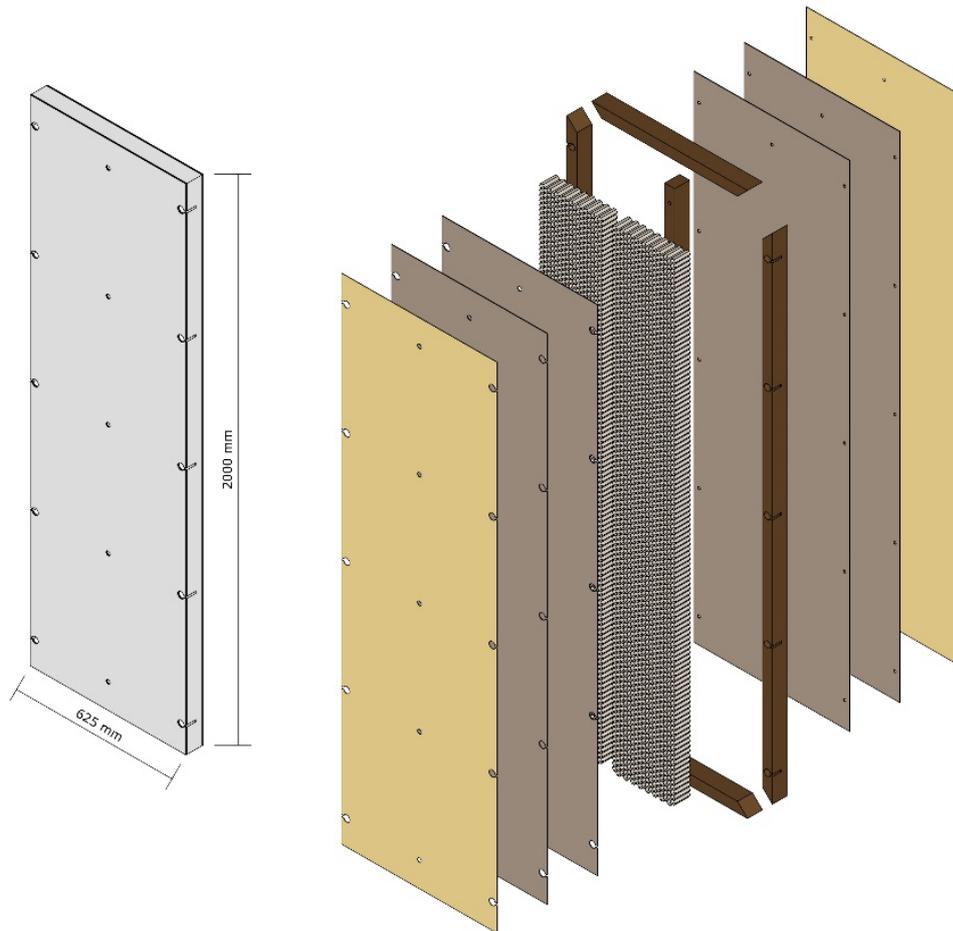


Abb. 9: Schichtaufbau Trennwandsysteme

Zusammengefasst ermöglichten die geringen Anforderungen an die integrierten Trennwände die Konzeption einer schlanken und leichten Konstruktion.

#### 5.7.4 Gebäudehülle

Für die äußere Schicht wurde ein System aus polyethylen-impregnierten Papier-Schindeln entwickelt (vgl. 5.2). Durch ihre Wasserdichtigkeit gewährleisten sie den Schutz vor Schlagregen oder der Einwirkung einer auf dem Dach liegenden Schneeschicht. Die Schindeln werden längs im Halbversatz auf eine Latten-Unterkonstruktion aufgebracht. Hierdurch gleicht das System einer konventionellen hinterlüfteten Vorhangfassade.

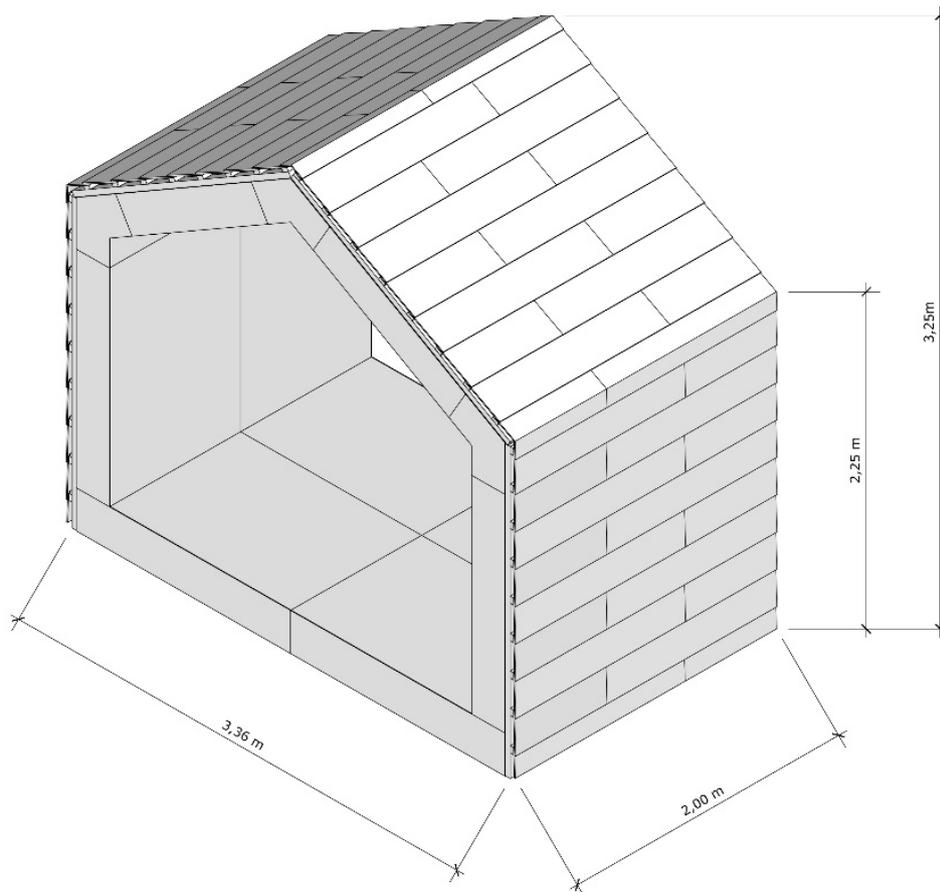


Abb.10: Demonstrator mit Schindelfassade

Zusammenfassend bietet das verwendete, vorgehängte hinterlüftete, Fassadensystem zwei Vorteile: Die Möglichkeit, im Fall von Beschädigungen einzelnen Platten auszutauschen, sowie die Chance, für aus der Konstruktion heraus diffundierenden Wasserdampf auszutreten, ohne von einer dichten Außenschicht gebremst zu werden.

## 5.8 Segmentverbindungen

Die vorproduzierten Segmente werden mit Hilfe eines Nut-Feder-Systems zusammengefügt. Hierbei übernimmt die Tragschicht die Funktion der Feder, während die Schutzschichten die Nut ausbilden. Dies erfolgt durch Verschieben der mittleren Schicht um 15cm sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Ausrichtung. Um die Dichtigkeit an den Übergängen zwischen den einzelnen Segmenten zu gewährleisten, ist es zudem notwendig die Fugen unter Zuhilfenahme von expandierendem Schaumstoff-Dichtband zu verschließen.

Entsprechend der hygrischen Anforderungen an Außenbauteile ist darauf zu achten, dass die Konstruktion an der Raumseite wasserdampfdiffusionsdichter als zur Außenoberfläche ist, sodass ein Herausdiffundieren von möglichem Wasserdampf im Bauteil gewährleistet ist.

Im Falle der integrierten Trennwandsysteme ist eine Nut-Feder-Verbindung nicht vorgesehen, hier soll die Verbindung lediglich durch die Möbelverbinder erfolgen.

Es wurden zwei Vorserien-Wandsegmente erstellt, um die Annahmen zu Schichtaufbau und Bauteilfügung im Maßstab 1:1 zu überprüfen. Diese wurden im Februar 2020 auf dem Messestand der Forschungsinitiative Zukunft Bau auf der Bautech ausgestellt.



Abb. 11: Prototypen auf der Bautech in Berlin

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus diesem Mock-Up konnte ein detaillierter Produktionsplan für die Herstellung des Demonstrators (siehe Anhang C) ausgearbeitet werden.

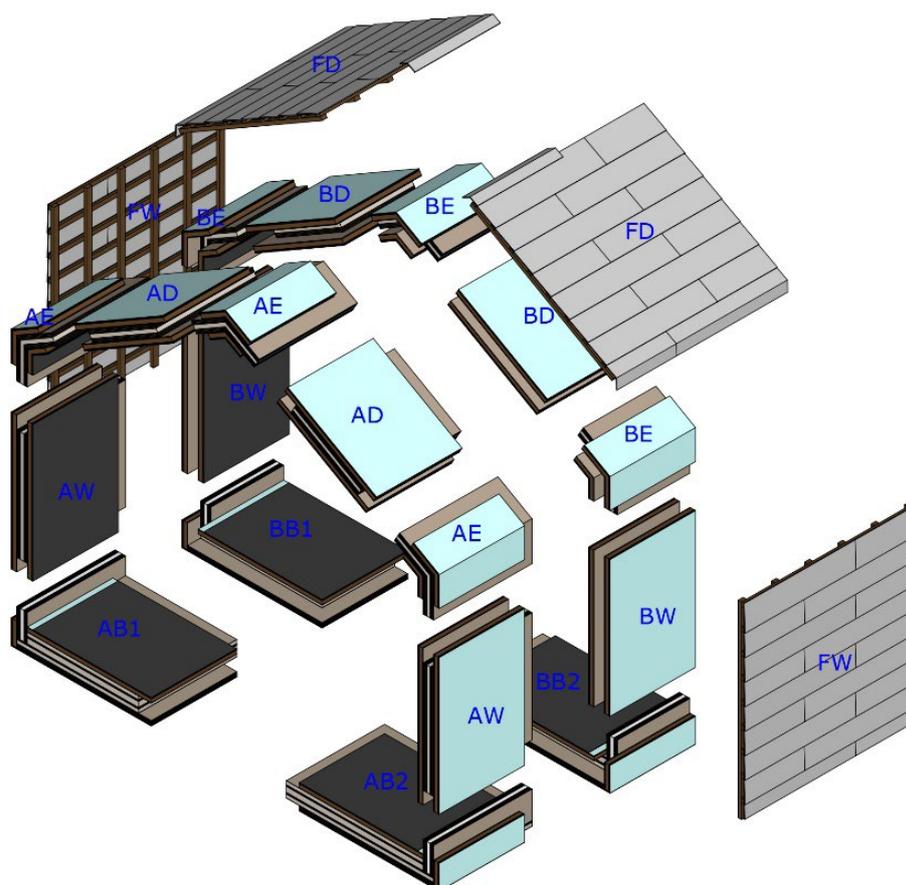


Abb.12: Nut-Feder-System am Demonstrator

Zusammengefasst konnte durch die Herstellung der beiden Wand-Prototypen nachgewiesen werden, dass das durch Möbelverbinder unterstützte Nut-Feder-System hinsichtlich Stabilität und Montierbarkeit geeignet für das Forschungsvorhaben ist.

## 5.9 Statische Abschätzung

Der Entwurf wurde unter Zuhilfenahme von Ergebnissen aus dem BAMP!-Projekt auf sein Tragverhalten hin überprüft. Mit Hilfe der vorhandenen Daten zu Druck-, Zug- und Biegestabilität der verwendeten Materialien konnte berechnet werden, dass das entwickelte System unter Eigengewicht, sowie der Einwirkung von Wind- und Schneelasten in den jeweiligen Zonen 1, die auf Darmstadt anzuwenden sind, tragfähig bleibt. Hierbei wurde nur die Kernschicht für den Nachweis der Tragfähigkeit herangezogen, da Papierwerkstoffe bei zunehmender Durchfeuchtung ihre Stabilität verlieren und somit nicht garantiert werden kann, dass von den "Schutzschichten" zu jedem Zeitpunkt eine Tragwirkung ausgehen kann.

## 5.10 Fertigungstechnik

### 5.10.1 Herstellung der Prototypen

Die Herstellung der ersten Probekörper erfolgte weitestgehend händisch. Erst durch den Erwerb einer CNC-Fräse war es möglich die personalintensive Fertigung etwas zu optimieren, wobei die Verklebung als aufwendigster Schritt weiterhin manuell erfolgen musste.

### 5.10.2 Herstellung des Demonstrators

Um die Fertigung des Demonstrators so effizient wie möglich zu gestalten, wurde ein Montageplan erstellt (siehe Anhang), welcher zunächst das Laminieren der Halbzeuge vorsah. Diese wurden in einem nächsten Schritt zu den jeweiligen Schichten (Kernschicht, Schutzschicht,...) gefügt und auf der CNC-Fräse präzise besäumt. Anschließend wurde aus diesen Schichten das jeweilige Segment/Bauteil zusammengesetzt.

Nach Herstellung der Segmente konnten diese vor Ort zu den Rahmenmodulen des Demonstrators zusammengefügt und bekleidet werden.

### 5.10.3 Herstellung der Notunterkünfte

Zur wirtschaftlichen Herstellung der Notunterkünfte wäre es vor allem notwendig den Klebprozess der Halbzeuge zu optimieren. Die Halbzeuge könnten weiterhin mittels einer CNC-Fräse besäumt werden. Die vor-Ort-Montage könnte durch angelernte Helfer erfolgen. Lediglich das Einsetzen der Fertigteil-Sanitärzelle und der Einbau der Fenster erfordert die Mitarbeit von Fachkräften.

## 5.11 Demonstrator

Ende Februar 2020 wurde mit der Produktion eines Demonstrators im Umfang von zwei Rahmenmodulen des Typs 1 begonnen. Durch die Umstände der CoViD-19-Pandemie kam es zu Verzögerungen in der Materialbereitstellung durch die Projektpartner, sowie Einschränkungen im Forschungsbetrieb.

Das Projekt wurde in Folge dessen durch das BBSR kostenneutral bis zum 30.09.2020 verlängert.

Die Produktion konnte erst Ende Juli 2020 wieder im normalen Umfang aufgenommen werden.

Vor Beginn der Errichtung wurde die Aufstellfläche zunächst 40cm tief ausgehoben und anschließend 50cm Schotter eingebracht und verdichtet. Dies dient einerseits dazu, den Abfluss und die Versickerung anfallenden Wassers im direkten Umfeld des Demonstrators zu gewährleisten, andererseits sollen dadurch durch Bodenfrost ausgelöste Bewegungen im Untergrund vermieden werden.

Wegen immer wieder aufkommendem Regen war es erforderlich den Aufbau unter einem schützenden Zelt durchzuführen, da eine Wasserdichtigkeit der Konstruktion erst nach aufbringen der Schindelfassade gegeben ist und die Elemente bis dahin vor starker Feuchteinwirkung zu schützen waren.

Der Aufbau des ca. 3,50 x 2,50 x 3,25m großen Demonstrators geschah innerhalb von drei Tagen und erforderte ein Team von sieben Mitarbeitern. Geschuldet war dies auch dem höher als erwartet ausgefallenem Gewicht der einzelnen Module (siehe Tabelle).

Bezeichnung		Gewicht	Anzahl
AB1	Boden Feder/Nut	89,0 kg	1 Stck
AB2	Boden Feder/Feder	95,0 kg	1 Stck
AW	Wand Feder	101,1 kg	2 Stck
AD	Dach Feder	74,5 kg	2 Stck
AE	Ecke Feder	51,4 kg	3 Stck
BB1	Boden Nut/Nut	77,0 kg	1 Stck
BB2	Boden Nut/Feder	82,0 kg	1 Stck
BW	Wand Nut	93,5 kg	2 Stck
BD	Dach Nut	68,5 kg	2 Stck
BE	Ecke Nut	46,0 kg	3 Stck
FW+FD	Schindeln	105,0 kg	insg.
<b>Summe</b>		<b>1.415,4 kg</b>	

Abb.13: Tabelle mit Elementgewichten

Zunächst wurde über der Schotterschicht eine Lage aus Polyethylen-imprägiertem Papier ausgebreitet, um die Bauteile vor spitzen Steinen aus dem Untergrund zu schützen. Auf dieser wurde im Anschluss bahnenweise Aluminiumversiegelte Dampfsperrbahnen ausgelegt, welche den Demonstrator später vor aufsteigender Feuchtigkeit schützen sollen.



Abb. 14: Bodenplatte auf Folien

Im Anschluss an die Verlegung der Bodenplatten wurden die Wände eingesetzt und die bis dahin errichteten Elemente mit Hilfe der Verbinder festgezogen und justiert. Die Aluminiumversiegelte Dampfsperrbahn wurde mit einer Andichthöhe von 50cm über

Oberkante Gelände an den Bauteilen fixiert und übernimmt die Funktion einer Sockelabdichtung.



Abb. 15: Wandelemente und Sockelabdichtung

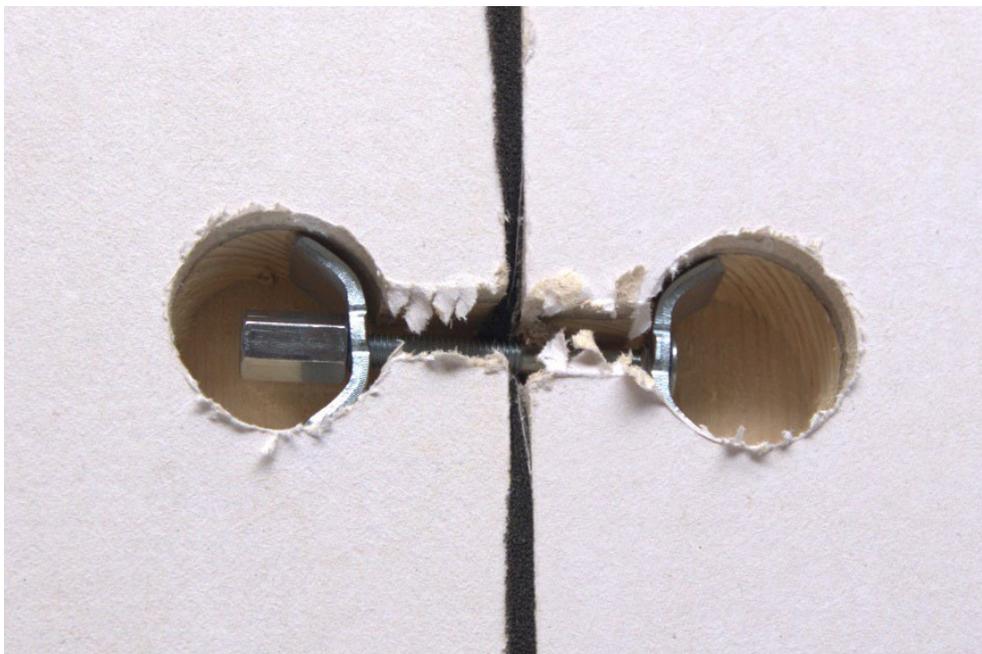


Abb. 16: Elementstoß mit Möbelverbinder

Die Montage der Dachelemente fand am Boden statt, woraufhin das gesamte Dach mit Hilfe eines Gabelstaplers angehoben und in die bestehende Konstruktion eingesenkt werden musste. Ein zu diesem Zeitpunkt angebrachter Spannungsgurt funktionierte als Ringanker um ein auseinanderbrechen der Dachflächen im angehobenen Zustand zu vermeiden. Er soll,

zunächst lose eingebaut, in der Konstruktion verbleiben und im Falle einer während des Monitorings auftretenden Verformung wieder gespannt werden um diese zu begrenzen.



Abb. 17: Einsetzen der Dachkonstruktion

Nach dem Errichten der Tragkonstruktion konnte mit dem „Ausbau“ begonnen werden. Dieser umfasste das Schützen der noch offen liegenden Stirnseiten mit einer, beidseitig ca. 15cm auf die Konstruktion überlappenden, Bahn aus Polyethylen-imprägniertem Papier, sowie dem Aufbringen der Innenbekleidung. Auch diese besteht aus Polyethylen-imprägniertem Papier, welches auf doppelseitig klebenden Vollpappen angebracht und an allen Innenflächen fixiert wurde.



Abb. 18: Die fertige Tragkonstruktion



Abb. 19: Unterkonstruktion und Schindeln

Auf den Aussenseiten wurde eine 40mm starke Konterlattung aufgebracht, die als Hinterlüftung der Fassade wirkt. Hierauf wurde die 24mm starke Traglattung befestigt, an der die Fassadenschindeln im Halbversatz mit doppelter Überlappung fixiert wurden.



Abb. 20: Dachdeckung und Innenbekleidung

Die offenen Giebelseiten wurden durch eine Konstruktion aus extrudierten Polystyrolplatten verschlossen, welche durch Holzpfosten in Position gehalten werden. Der U-Wert dieser Giebelwände entspricht hierbei dem U-Wert der Papierkonstruktion, wodurch ein in alle

Richtungen gleichermaßen gut gedämmtes Volumen errichtet wurde, was wiederum dem anschließenden Monitoring zu Gute kommt.



Abb. 21: Der fertige Demonstrator

## 5.12 Ergebnisverwertung

### 5.12.1 Lehre

Das Projekt stand im dauerhaften Austausch mit der Lehre am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften (vgl. 5.2). Die gewonnenen Erkenntnisse werden nach Abschluss des Projektes weiterhin in die Lehre im Fach experimentelle Fassadentechnik einfließen, in welchem von Studierenden der Fachbereiche Architektur und Bauingenieurwesen neuartige Fassadenkonzepte in experimenteller Weise entwickelt werden.

### 5.12.2 Konferenzen

Bereits im November 2019 konnte mit einem ca. 45-minütigen Vortrag auf der BAMPI-Konferenz auf das Projekt aufmerksam gemacht werden. Auch auf der kommenden BAMPI-Konferenz ist es geplant, das bis dahin abgeschlossene Projekt zu präsentieren.

Hinzu kam der durch Zukunft Bau geförderte Messeauftritt auf der Bautec in Berlin im Februar 2020 (vgl. 5.8).

Im Rahmen der Biennale 2020 in Venedig war eine gemeinschaftliche Ausstellungsfläche der TU Darmstadt zum Thema Bauen mit Papier vorgesehen, auf der auch dieses Projekt zu sehen sein sollte. Aufgrund der CoViD-19-Pandemie wurde dieser Auftritt abgesagt. Ein Ausweichtermin ist für Sommer 2021 vorgesehen.

Zudem soll das Projekt auf der PowerSkin-Konferenz, welche im April 2021 in München stattfindet präsentiert werden. Hierzu wurde ein wissenschaftliches Paper verfasst (vgl. 5.9.3).

### 5.12.3 Publikationen

Für die PowerSkin-Konferenz 2021 in München wurde ein Paper zum Projekt verfasst. Zudem ist es vorgesehen die Ergebnisse der Bachelorarbeiten (vgl. 5.3) in Form von wissenschaftlichen Artikeln in einer Fachzeitschrift zu publizieren.

Außerdem ist ein Artikel im Buch ‚Bauen mit Papier‘, welches vom Birkhäuserverlag 2021 veröffentlicht wird, geplant.

### 5.12.4 Folgeprojekte

In der letzten Zukunft Bau Antragsrunde wurde im Oktober 2020 ein Forschungsantrag eingereicht, welcher sich mit der Überwachung des Prototypen unter realen Bedingungen befasst.

Der Antrag mit dem *AZF20-19-1-178* hat sich für die zweite Stufe der Förderung qualifiziert.

Es ist vorgesehen einen weiteren Forschungsantrag zu stellen, der sich mit der Errichtung eines bewohnbaren Gebäudes aus Papier befasst. Erste Vorverhandlungen bezüglich Standort und Genehmigungsfähigkeit wurden bereits geführt, ein Antrag hierzu jedoch noch nicht eingereicht.

## 6 Fazit

Um als Notunterkunft geeignet zu sein, muss eine Papierkonstruktion konstruktive Stabilität, Schutz vor Wetter, ein behagliches Raumklima, sowie einen ausreichenden Brandschutz bieten. Zudem soll eine einfache Montage möglich sein, um in Notsituationen eine Errichtung auch durch ungelernete Kräfte zu ermöglichen.

Eine elementierte Massivkonstruktion wie die vorliegende gewährleistet gute Stabilitäts- und Dämmeigenschaften und begünstigt durch ihre simple Nut-und-Feder-Fügetechnik einen schnellen Aufbau.

Das Laminieren von Papierschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften ermöglicht es, Aufbauten zu realisieren, die verschiedene Funktionalitäten eines Bauteiles in sich vereinen.

Die Frage nach der Klebtechnik ist dringend weiter zu untersuchen. Die im Projekt verwendeten Klebstoffe verhindern eine Rezyklierung der Konstruktion und müssen durch Umwelt- und Prozessfreundlichere Alternativen ersetzt werden.

Bei der Konzeption der Elemente ist darauf zu achten, dass diese handlich und leicht bleiben. Die im Demonstrator verwendeten Elementgrößen erforderten bis zu 4 Personen zum Montieren der bis zu 100kg schweren Einzelteile (vgl. 5.11 Abb. 13). Das Ziel sollte ein Gewicht von maximal 50kg je Element sein.

Die Vorfabrikation der Elemente unter Werkstattbedingungen sorgt für niedrige Maßtoleranzen im Bauteil, ist zur Zeit aber noch extrem zeitintensiv. Um eine industrielle Produktion zu ermöglichen ist eine Optimierung der Prozesse unabdingbar.

Die Dauerhaftigkeit von Papierkonstruktionen dieser Art muss noch geprüft werden (vgl. 5.12.4).

## 7 Zusammenfassung

Für das Projekt "Notunterkünfte aus Papier" wurden zunächst die technischen und nutzungsbezogenen Grundlagen ermittelt. Anhand dieser Informationen wurden zwei Bautypen entwickelt, ein modulares unabhängiges Haus, sowie integrierte Trennwandsysteme für den Einsatz in Hallen. Unter Zuhilfenahme von kleineren Versuchskörpern wurden Annahmen zu Fügung und Schichtaufbau überprüft. Nach der Fertigung eines ersten Prototypen aus zwei Wandsegmenten wurde, unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus dem Prototyp, ein Demonstrator gefertigt. Dieser hat den Umfang von zwei Rahmenmodulen des modularen unabhängigen Hauses und soll auf dem Gelände der TU Darmstadt unter freiem Himmel errichtet werden. Im Rahmen eines Folgeprojekts werden die Umweltauswirkungen auf diesen in einen Zeitraum von 2 Jahren überwacht.

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Literaturverzeichnis

Bach, R. (2020): Papier Fassaden - Entwicklung konstruktiver Prinzipien für Fassaden aus Papierwerkstoffen mit Fokus auf Brandschutz, Wärmedämmung, Feuchteschutz und ökologische Eigenschaften. Doktorarbeit. RWTH Aachen (voraussichtliche Veröffentlichung: 12/2020)

Betz Dämmelemente GmbH (o.D.): FairWell-ZVE – Die umweltfreundliche und ökologische Dämmung, [online] <https://www.betz-daemmelemente.de/> [20.11.2019].

Friedrich, S. und Kappen, J. (2012): LWF aktuell 89/2012. Freising: Bay. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft und für das Zentrum Wald-Forst-Holz Weihenstephan. [https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf\\_aktuell/012307/index.php](https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf_aktuell/012307/index.php) [24.08.2020]

Ghanadpour, Maryam (2018): Phosphorylated Cellulose Nanofibrils: A Nano-Tool for Preparing Cellulose-Based Flame-Retardant Materials, PhD dissertation, Stockholm, [online] <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-224226> [20.11.2019].

Hildebrand, Linda (2014): *Strategic investment of embodied energy during the architectural planning process*, Delft University of Technology, Rotterdam.

Kanli, E., Bach, R., Götzinger, R., Kiziltoprak, N., Knaack, U., Schabel, S., Schneider, J. (2019): Case study: development and evaluation methods for bio-based construction realized with paper-based building materials. In: 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials (ICBBM). Belfast, United Kingdom

Kiziltoprak, N., Kanli, E., Schneider, J., Knaack, U., Bach, R. (2019): Load capacity testing method for non-conventional nodes joining linear structural paper components. In: International Conference on Structures and Architecture 2019. Lissabon, Portugal

Latka, J. (2017): Paper in architecture. Retrieved from Open access PhD thesis series on Architecture and the Built Environment <https://journals.open.tudelft.nl/abe/issue/view/547> [24.08.2020]

Niskanen, K., Berglund, L., Carlsson L., Coffin, D. Gustafsson, P., Hägglund, R., Kulachenko, A., Mäkelä, P., Nygard, M., Östlund, S., Uesaka, T. (2012). *Mechanics of Paper Products*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH

Umweltbundesamt (2020): Abfallaufkommen – Deutschlands Abfall. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> [30.09.2020]

UNHCR The UN Refugee Agency (2019): UNHCR Global Report. <https://www.unhcr.org/globalreport2019/> [24.08.2020]

Valentin Brenner (2015): Gebäude als Rohstoffdepots - Chancen für die Bau- und Immobilienbranchen mit Cradle to Cradle. [https://www.oebu.ch/admin/data/files/section\\_asset/file\\_de/1890/150619\\_valentinbrenner\\_galsrdd.pdf?lm=1493383519](https://www.oebu.ch/admin/data/files/section_asset/file_de/1890/150619_valentinbrenner_galsrdd.pdf?lm=1493383519) [30.09.2020]

Verband Deutscher Papierfabriken (2015): Papier kompakt – Papier: Ein genialer Werkstoff. [https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07\\_Dateien/7\\_Publikationen/Papier\\_kompakt\\_DE.pdf](https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07_Dateien/7_Publikationen/Papier_kompakt_DE.pdf) [30.09.2020]

Birmele, L.,(2020) Wandkonstruktionen aus Papier, Bachelorthesis TU Darmstadt

Saggaf, W.,( 2020) Deckenkonstruktionen aus Papier, Bachelorthesis TU Darmstadt

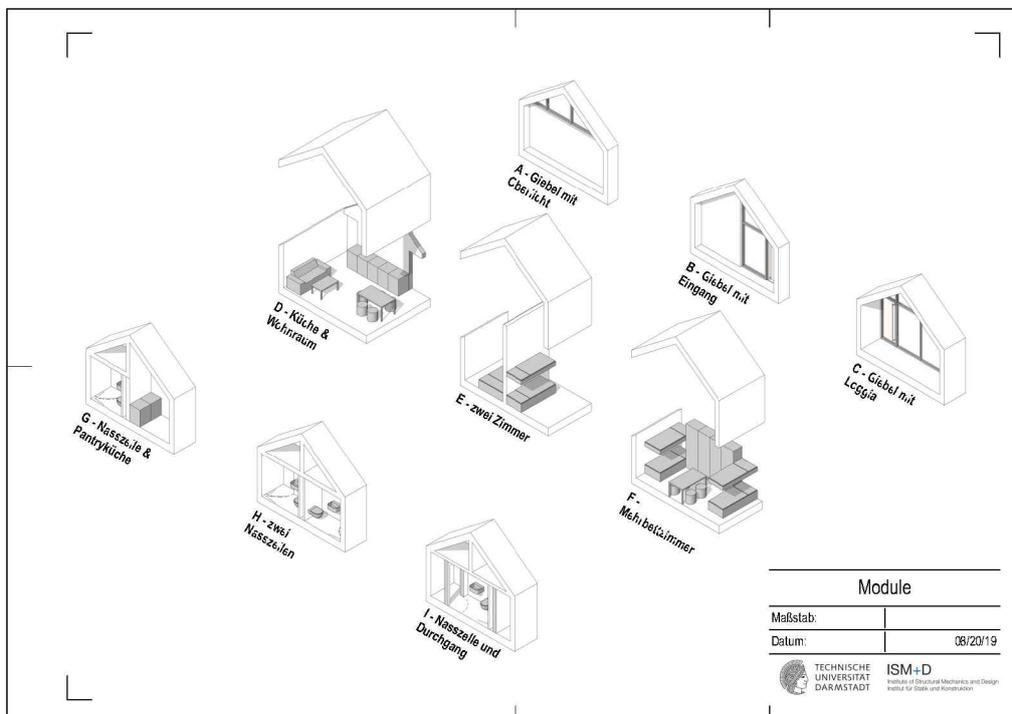
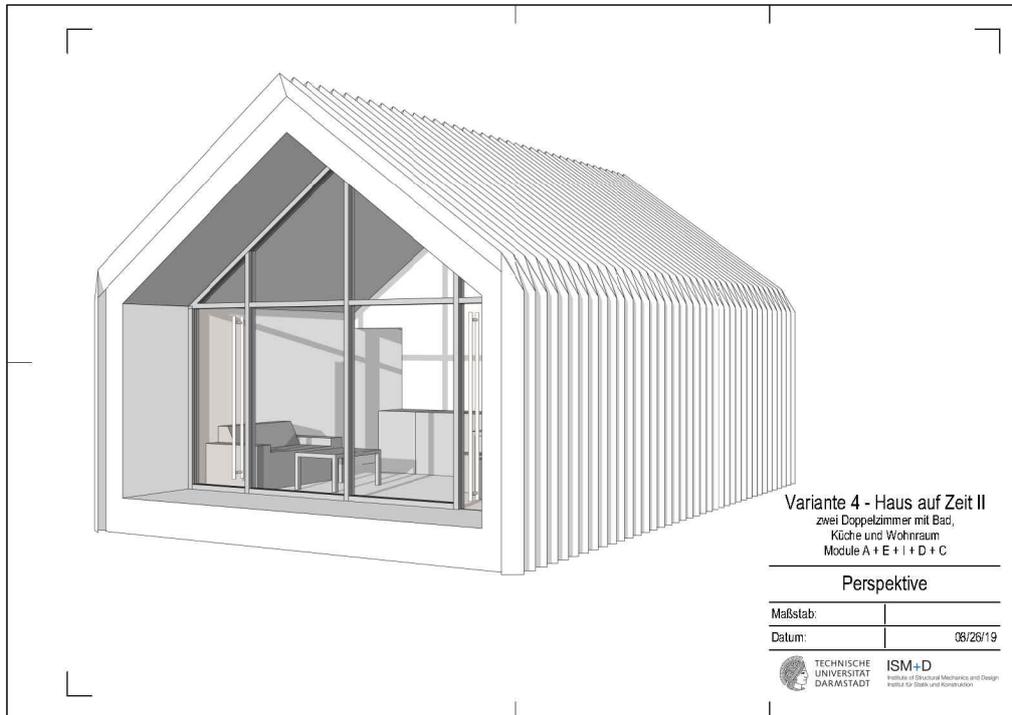
Eikam, M.,( 2020) Papierwandmodule verbinden, Bachelorthesis TU Darmstadt

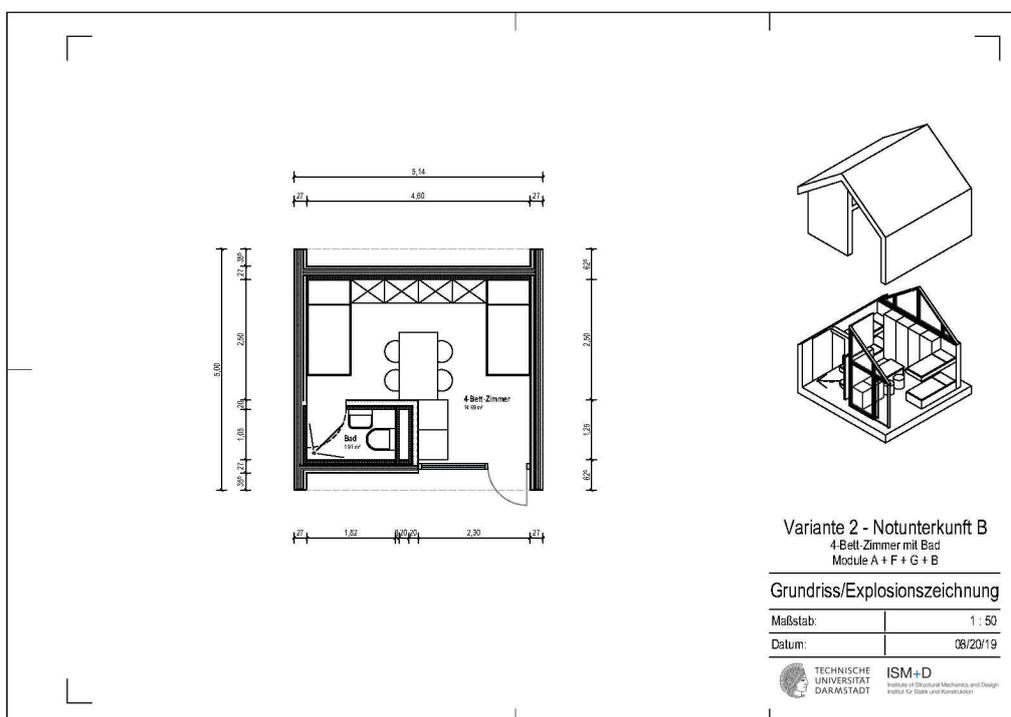
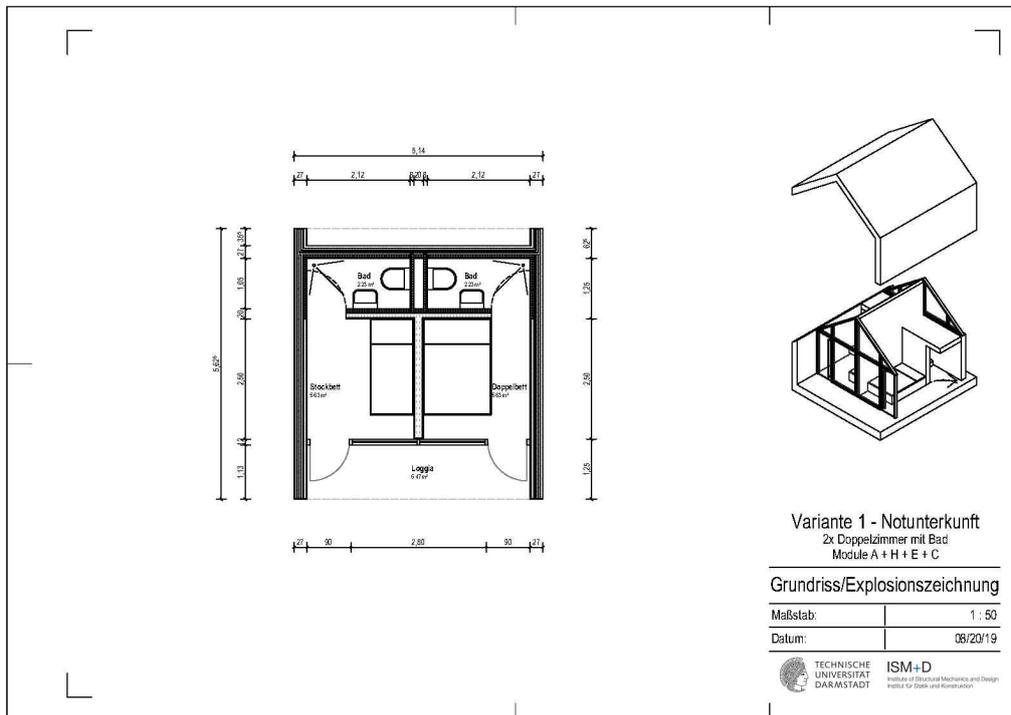
## 8.2 Abbildungsverzeichnis

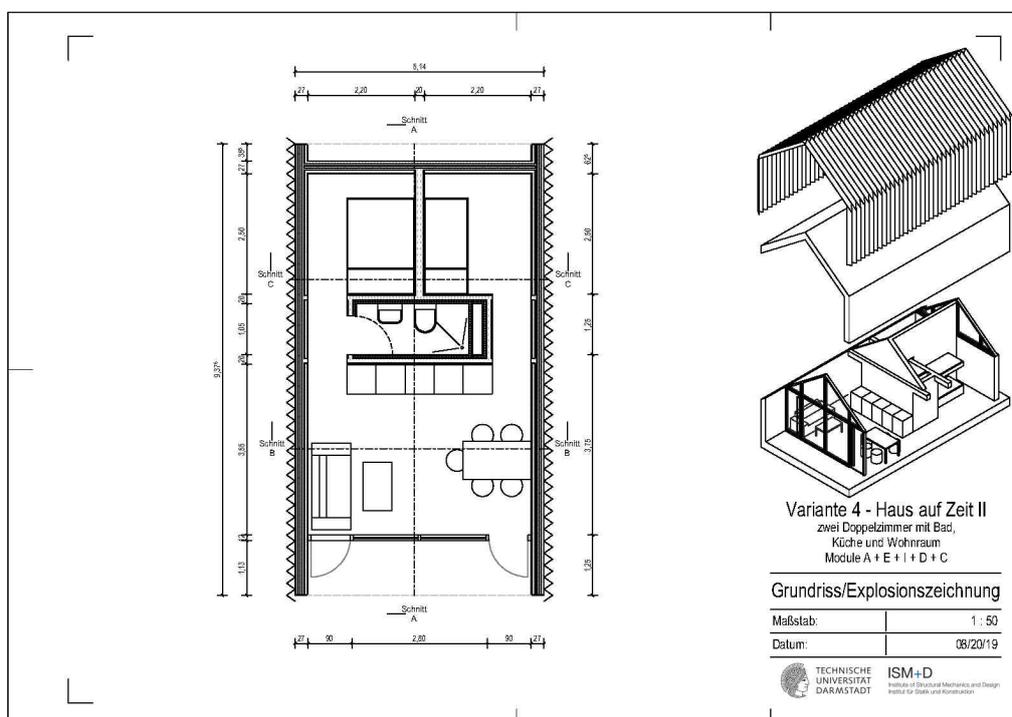
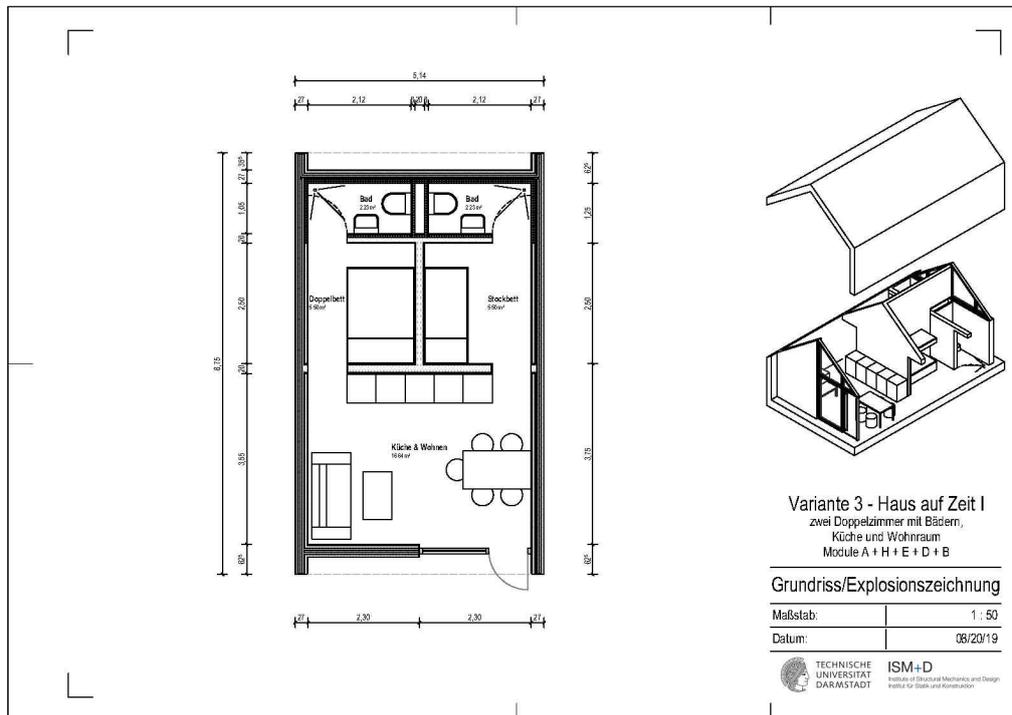
Abb.1	Daten zu Flucht und Vertreibung	S. 10
Abb.2	Fräsversuch Fa. Easy2Trade	S. 16
Abb.3	Seminararbeit „TetraPak“-Schindel	S. 19
Abb.4	Zusammensetzbare Einzelmodule mit verschiedenen Nutzungen	S. 23
Abb.5	Verschiedene Varianten des Modulsystems	S. 24
Abb.6	Verbindungsvarianten der integrierten Trennsysteme	S. 25
Abb.7	Anwendungsbeispiel integrierte Trennwandsysteme	S. 25
Abb.8	Schichtaufbauten Wand, Dach und Bodenplatte	S. 28
Abb.9	Schichtaufbau Trennwandsysteme	S. 29
Abb.10	Demonstrator mit Schindelfassade	S. 30
Abb.11	Prototypen auf der Bautec in Berlin	S. 31
Abb.12	Nut-Feder-System am Demonstrator	S. 32
Abb.13	Tabelle mit Elementgewichten	S. 34
Abb.14	Bodenplatte auf Folien	S. 34
Abb.15	Wandelemente und Sockelabdichtung	S. 35
Abb.16	Elementstoß mit Möbelverbinder	S. 35
Abb.17	Einsetzen der Dachkonstruktion	S. 36
Abb.18	Die fertige Tragkonstruktion	S. 36
Abb.19	Unterkonstruktion und Schindeln	S. 37
Abb.20	Dachdeckung und Innenbekleidung	S. 37
Abb.21	Der fertige Demonstrator	S. 38

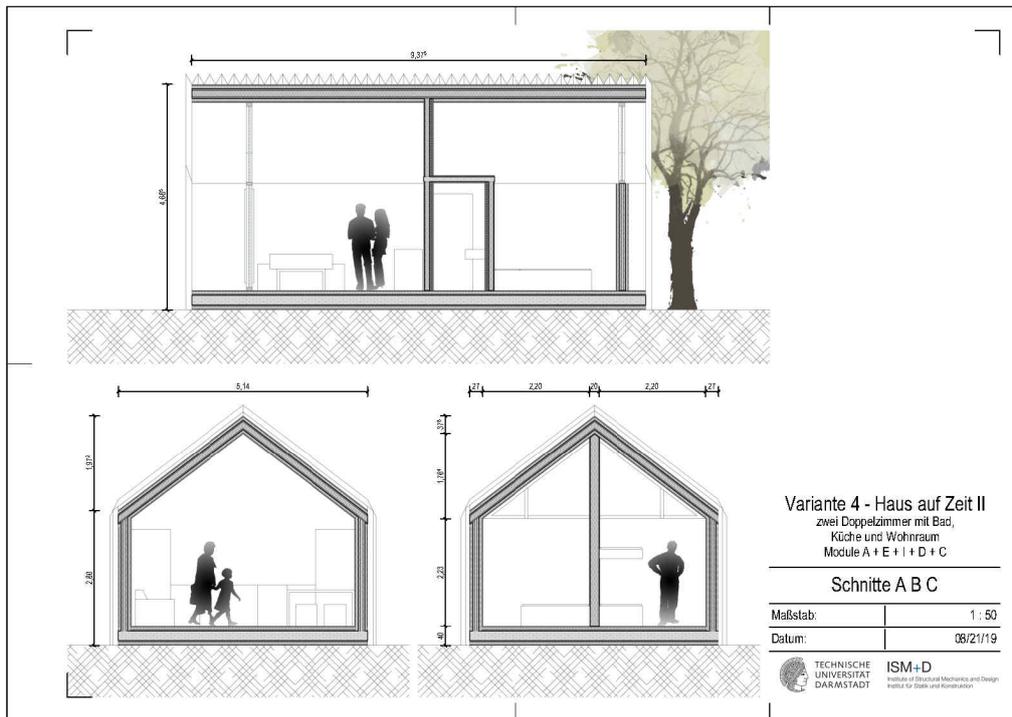
# 9 Anlagen

## Anlage A Entwurfszeichnungen Modulsystem

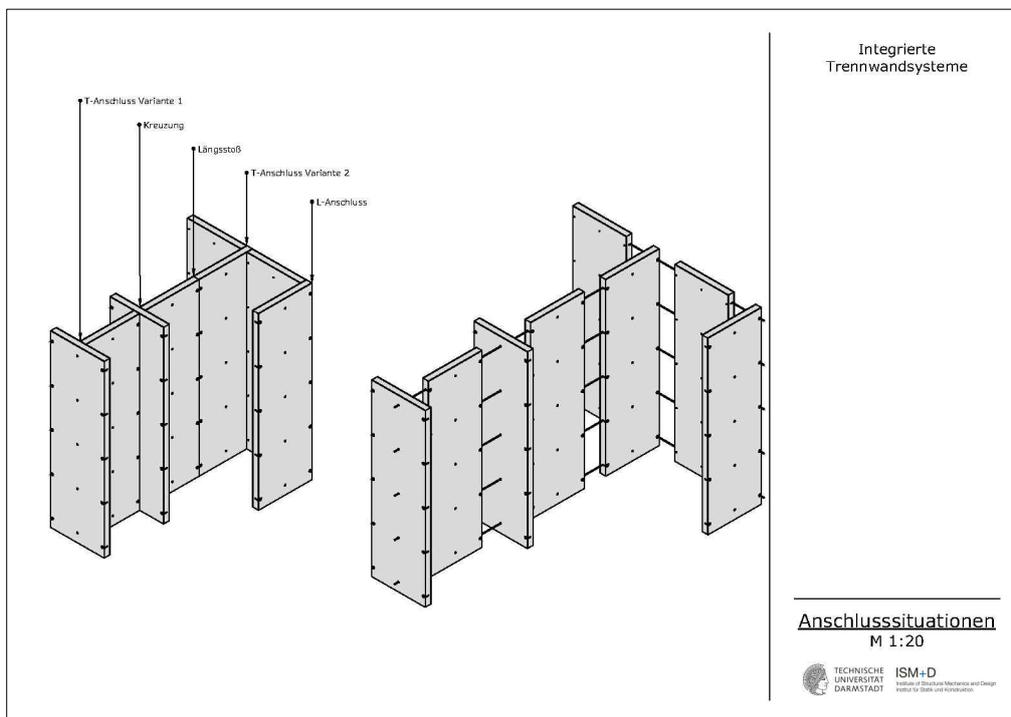
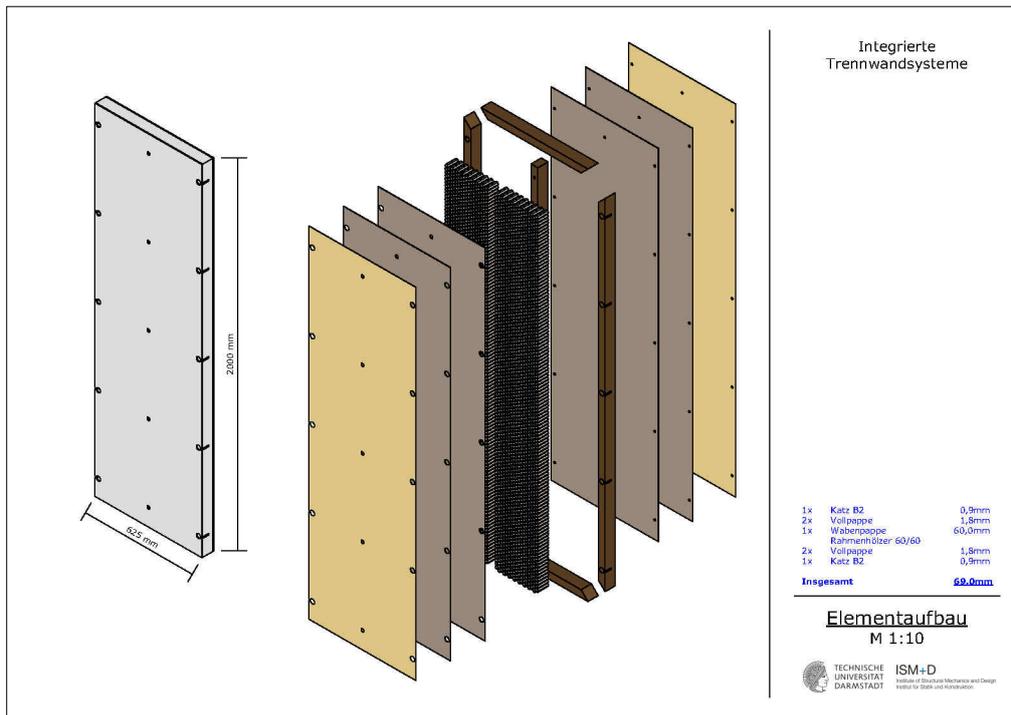


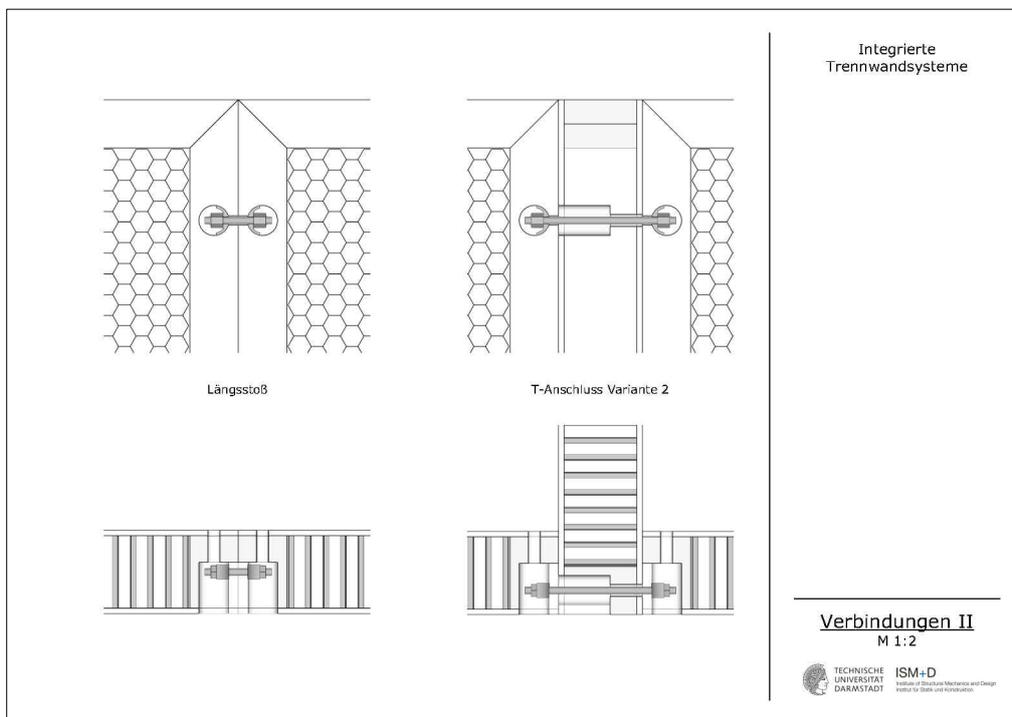
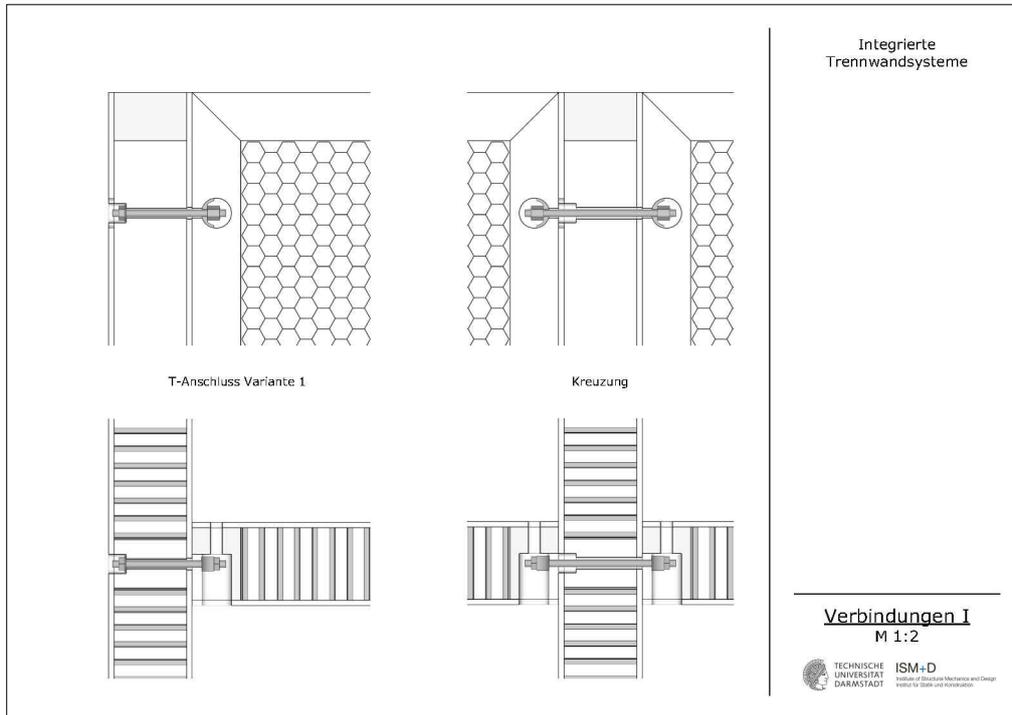


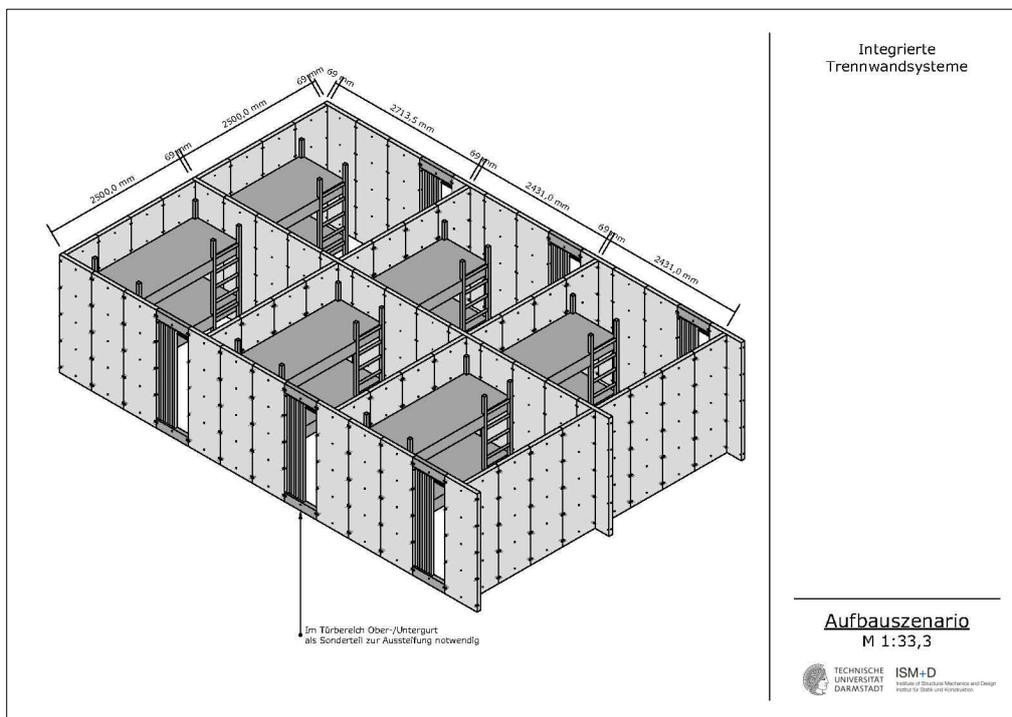
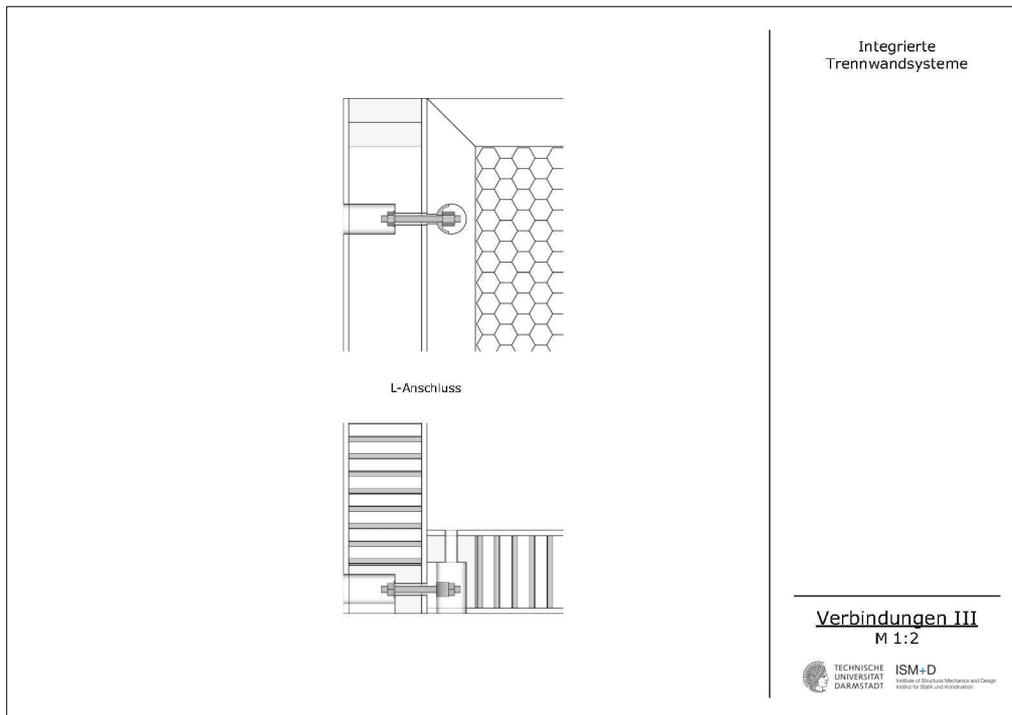




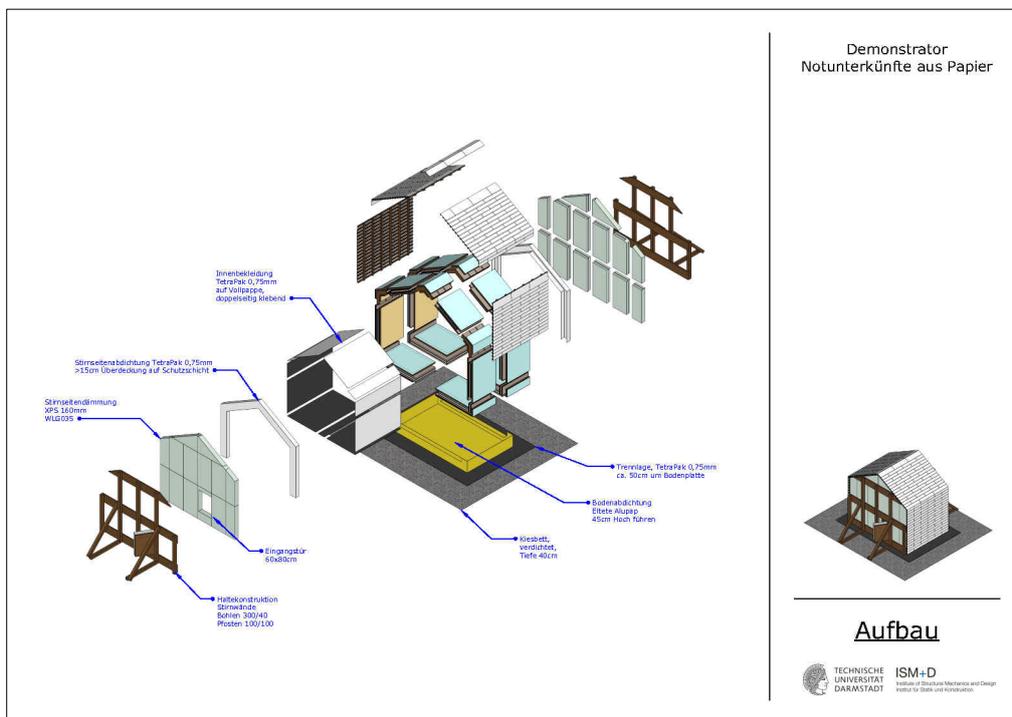
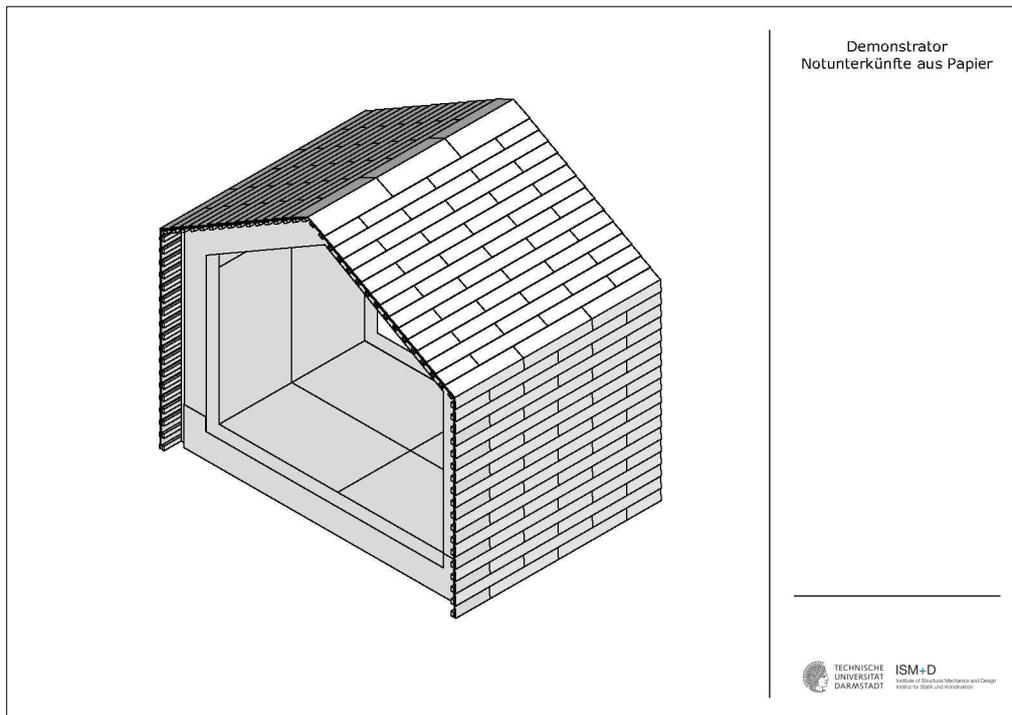
Anlage B Konstruktionszeichnungen integrierte Trennwandsysteme

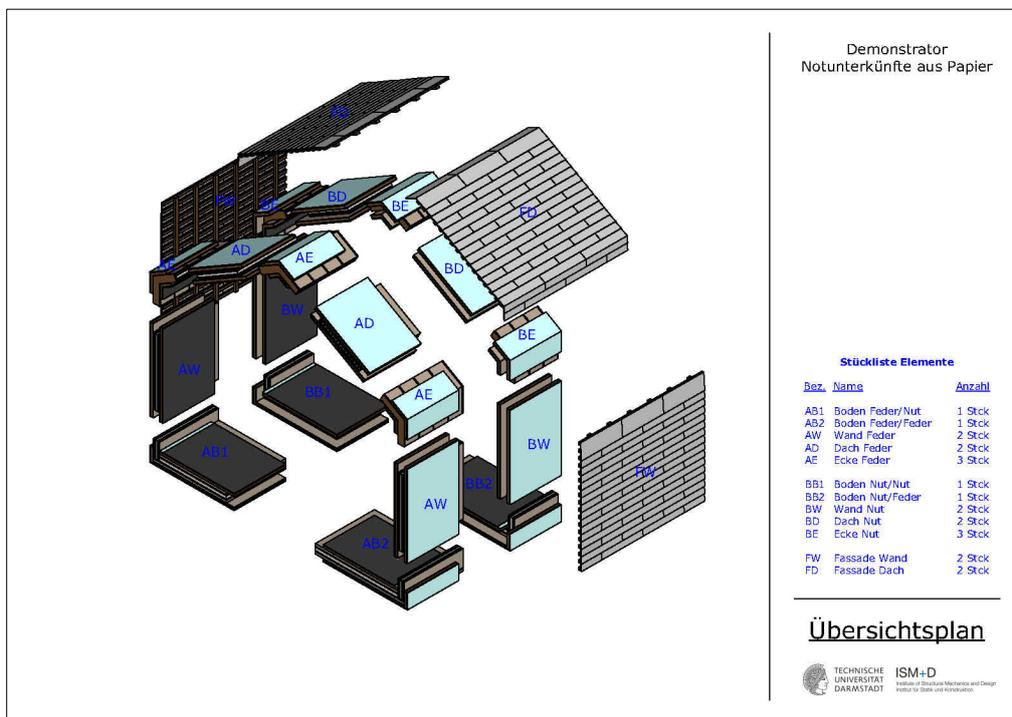
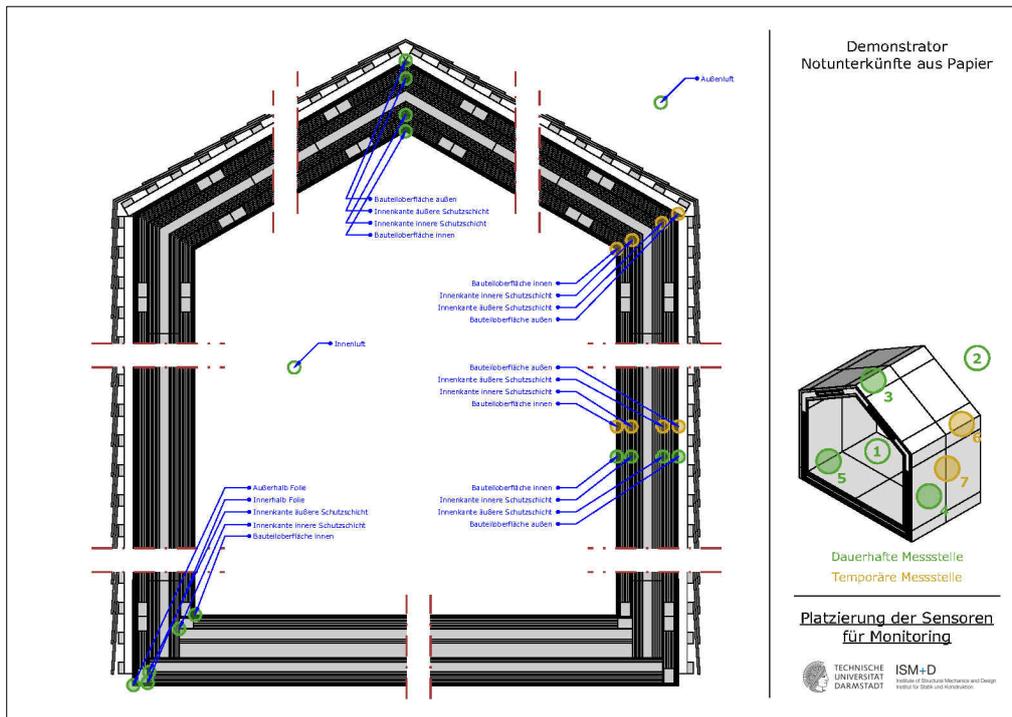


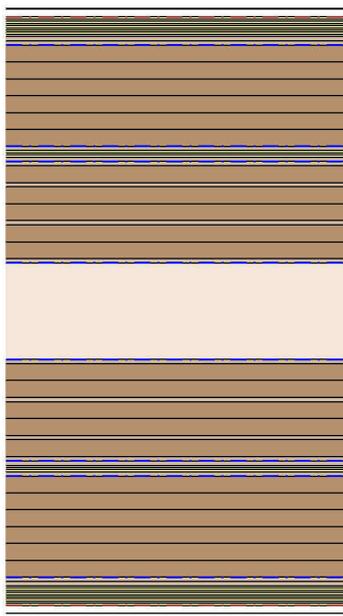




Anlage C Montageplan Demonstrator



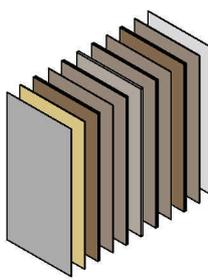




**ABBILDUNG IM MAßSTAB 1:1!**

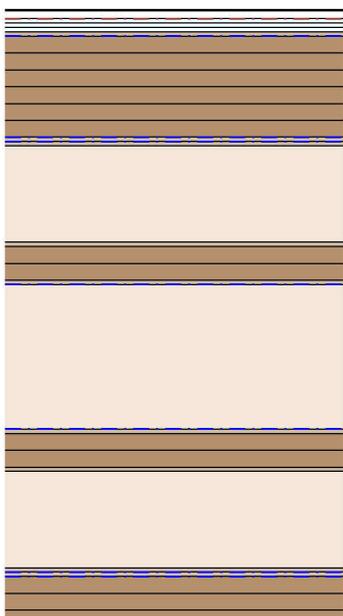
Schicht	Material	Sollstärke
<b>W-I</b>	<u>Oberflächenschicht Innen</u> -Montage erst nach Errichtung des Demonstratorst- 1x Tetrapak 0,5mm 1x Katz doppels. Klebend 3,2mm	<u>3,7mm</u>
<b>W-B</b>	<u>Brandschutzschicht</u> 9x Katz B2 0,9mm 2x Vollpappe 1,8mm	<u>11,7mm</u>
<b>W-D</b>	<u>Dämmschicht</u> 6x Wellpappe kreuzlam. 7,0mm	<u>42,0mm</u>
<b>W-S</b>	<u>Schutzschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm 3x Katz B2 0,9mm 1x Vollpappe 1,8mm	<u>6,3mm</u>
<b>W-T</b>	<u>Tragschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm 1x Wellpappe stehend 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm 2x Wellpappe stehend 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm 2x Wellpappe stehend 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm	<u>42,2mm</u>
<b>W-K</b>	<u>Kernschicht</u> 1x Wabenpappe 40,0mm	<u>40,0mm</u>
<b>W-T</b>	<u>Tragschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm 2x Wellpappe stehend 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm 2x Wellpappe stehend 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm 1x Wellpappe stehend 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm	<u>42,2mm</u>
<b>W-S</b>	<u>Schutzschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm 3x Katz B2 0,9mm 1x Vollpappe 1,8mm	<u>6,3mm</u>
<b>W-D</b>	<u>Dämmschicht</u> 6x Wellpappe kreuzlam. 7,0mm	<u>42,0mm</u>
<b>W-B</b>	<u>Brandschutzschicht</u> 2x Vollpappe 1,8mm 9x Katz B2 0,9mm	<u>11,7mm</u>
<b>W-A</b>	<u>Oberflächenschicht Außen</u> -Montage erst nach Errichtung des Demonstratorst- 1x Katz doppels. Klebend 3,2mm 1x Katz doppels. Klebend 1,8mm	<u>5,0mm</u>
<b>Insgesamt:</b>		<b>253,1mm</b>

Demonstrator  
Notunterkünfte aus Papier



**Wandaufbau**

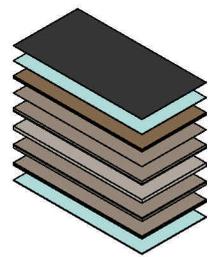




**ABBILDUNG IM MAßSTAB 1:1!**

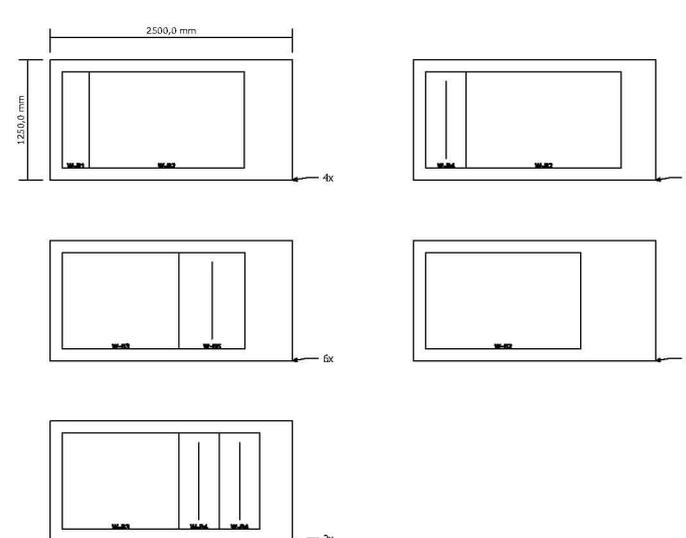
Schicht	Material	Sollstärke
<b>B-I</b>	<u>Oberflächenschicht Innen</u> -Montage erst nach Errichtung des Demonstratorst- 1x Tetrapak 0,5mm 1x Katz doppels. Klebend 3,2mm	<u>3,7mm</u>
<b>B-S</b>	<u>Schutzschicht</u> 3x Katz Hygrotec 1,8mm 1x Vollpappe 1,8mm	<u>7,2mm</u>
<b>B-D</b>	<u>Dämmschicht</u> 6x Wellpappe kreuzlam. 7,0mm	<u>42,0mm</u>
	<u>"Deckel" unter Rahmenblech/Dämmschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm	<u>1,8mm</u>
<b>B-T</b>	<u>Tragschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm 1x Wabenpappe 40,0mm 1x Vollpappe 1,8mm 2x Wellpappe kreuzlam. 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm	<u>59,4mm</u>
<b>B-K</b>	<u>Kernschicht</u> 1x Wabenpappe 60,0mm	<u>60,0mm</u>
<b>B-T</b>	<u>Tragschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm 2x Wellpappe kreuzlam. 7,0mm 1x Vollpappe 1,8mm 1x Wabenpappe 40,0mm 1x Vollpappe 1,8mm	<u>59,4mm</u>
	<u>"Deckel" über Dämmschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm	<u>1,8mm</u>
<b>B-D</b>	<u>Dämmschicht</u> 6x Wellpappe kreuzlam. 7,0mm	<u>42,0mm</u>
	<u>"Deckel" unter Dämmschicht</u> 1x Vollpappe 1,8mm	<u>1,8mm</u>
<b>B-A</b>	<u>Oberflächenschicht Außen</u> 5x Katz Hygrotec 1,8mm 1x Tetrapak 0,5mm	<u>9,5mm</u>
<b>Insgesamt:</b>		<b>288,6mm</b>

Demonstrator  
Notunterkünfte aus Papier



**Bodenaufbau**





**Demonstrator  
Notunterkünfte aus Papier**

Schicht	Material	Stärke
W-B	Brennholzschnitte	11,2mm
Zk	Klebeband	0,8mm
Zk	Verklebung	3,8mm

**Insgesamt 16 Platten ca. 2.500x1.250mm herstellen**

Hieraus entstehen die folgenden Einzelteile:

W-B1	275,5 x 1.050mm	4 Stück
W-B2	1.200 x 1.050mm	8 Stück
W-B3	1.200 x 1.050mm	8 Stück
W-B4	200,5 x 209,5 x 1.200mm	6 Stück
W-B5	343,5 x 1.154 x 1.050mm	6 Stück

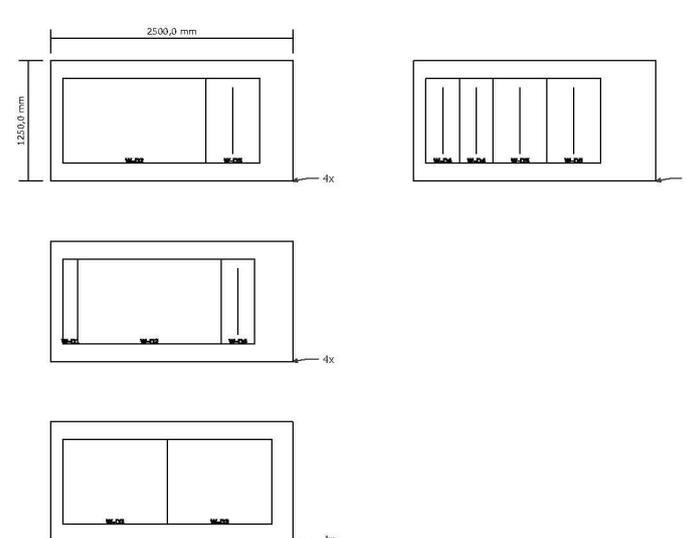
In Falle eines Nördlichen Zugschnittes ist für alle Ausschnitte ein Übermaß von ca 10mm in beide Richtungen herzustellen.  
Eine exakte Besäumung würde dem bei der Bearbeitung der Holzplattenelemente mit der CNC-Fräse erfolgen.  
Falls der Zugschnitt mit Hilfe der CNC-Fräse erfolgt, kann ohne Übermaß geschnitten werden.

**Zuschnitte W-B**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ISM+D  
Institut für Strukturmechanik und Design  
Institut für Statik und Konstruktion



**Demonstrator  
Notunterkünfte aus Papier**

Schicht	Material	Stärke
W-D	Dübelbohle	42,0mm
Zk	Verklebung	3,8mm

**Insgesamt 13 Platten ca. 2.500x1.250mm herstellen**

Hieraus entstehen die folgenden Einzelteile:

W-D1	195,5 x 880mm	4 Stück
W-D2	1.480 x 880mm	8 Stück
W-D3	1.080 x 880mm	8 Stück
W-D4	173,5 x 173,5 x 880mm	6 Stück
W-D5	277 x 177 x 880mm	6 Stück

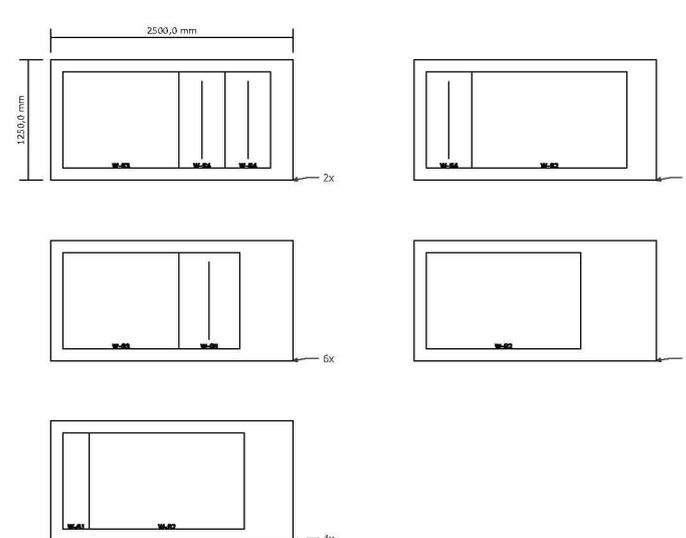
**In jedem Fall ist für alle Ausschnitte ein Übermaß von 10mm in beide Richtungen herzustellen, da diese Platten später in den Verbinderrahmen sitzen, welche zur Besäumung an der CNC-Fräse leicht überstehen müssen!**

**Zuschnitte W-D**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ISM+D  
Institut für Strukturmechanik und Design  
Institut für Statik und Konstruktion



**Demonstrator  
Notunterkünfte aus Papier**

Schicht	Material	Stärke
W-S	Schutzpapier	6,3mm
	1x Vollzappe	1,8mm
	2x Halb SZ	0,8mm
	1x Vollzappe	1,8mm

**Insgesamt 16 Platten ca. 2.500x1.250mm herstellen**

Hieraus entstehen die folgenden Einzelteile:

W-S1	270,5 x 1.000mm	4 Stück
W-S2	1.600 x 1.000mm	8 Stück
W-S3	1.200 x 1.000mm	8 Stück
W-S4	237 x 237 x 1.000mm	6 Stück
W-S5	312,5 x 312,5 x 1.000mm	6 Stück

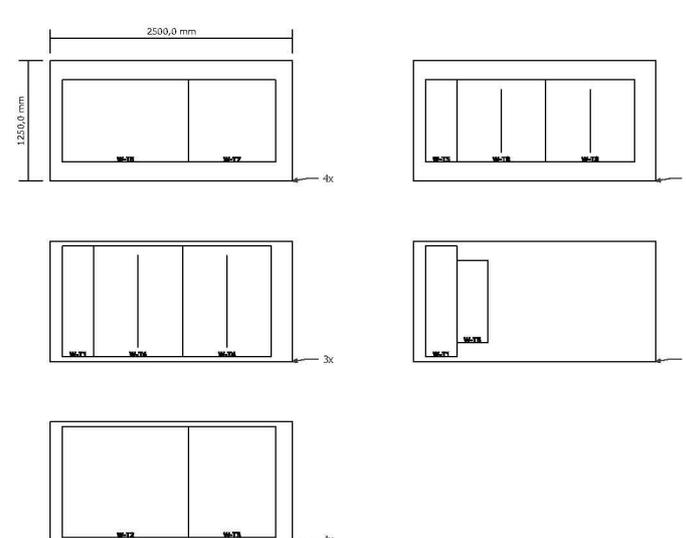
In Falle eines händischen Zuschnittes ist für alle Ausschnitte ein Übermaß von ca. 10mm in beide Richtungen herzustellen.  
Eine exakte Bezeichnung würde dann bei der Bearbeitung der Komplettlemente mit der CNC-Fräse erfolgen.  
Falls der Zuschnitt mit Hilfe der CNC-Fräse erfolgt, kann ohne Übermaß geschritten werden.

**Zuschnitte W-S**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ISM+D  
Institut für Strukturmechanik und Design  
Institut für Statik und Konstruktion



**Demonstrator  
Notunterkünfte aus Papier**

Schicht	Material	Stärke
W-T	Innenzappe	6,2 Zuzinn
	1x Vollzappe	1,8mm
	1x Weßzappe stehend	7,0mm
	1x Vollzappe	1,8mm
	2x Weßzappe stehend	7,0mm
	1x Vollzappe	1,8mm
	2x Weßzappe stehend	7,0mm
	1x Vollzappe	1,8mm

**Insgesamt 16 Platten ca. 2.500x1.250mm herstellen**

Hieraus entstehen die folgenden Einzelteile:

W-T1	320,5 x 1.150mm	4 Stück
W-T2	1.300 x 1.150mm	4 Stück
W-T3	200 x 1.150mm	4 Stück
W-T4	200,5 x 209,5 x 1.150mm	6 Stück
W-T5	282,5 x 850mm	4 Stück
W-T6	1.300 x 850mm	4 Stück
W-T7	200 x 850mm	4 Stück
W-T8	459 x 59 x 850mm	6 Stück

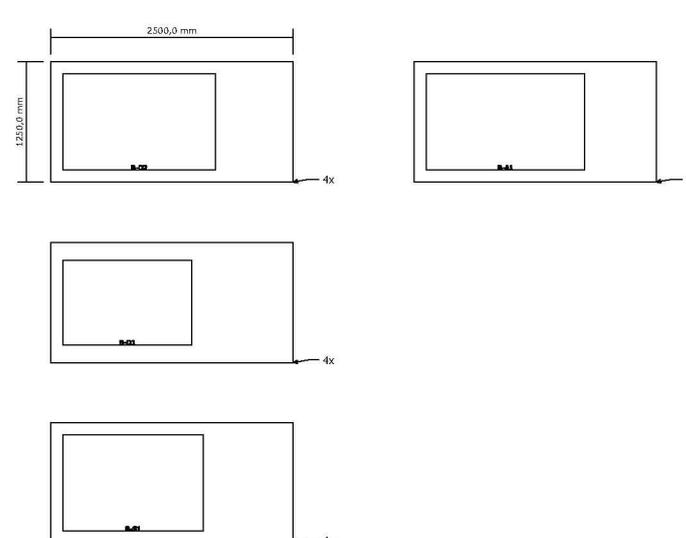
In Falle eines händischen Zuschnittes ist für alle Ausschnitte ein Übermaß von ca. 10mm in beide Richtungen herzustellen.  
Eine exakte Bezeichnung würde dann bei der Bearbeitung der Komplettlemente mit der CNC-Fräse erfolgen.  
Falls der Zuschnitt mit Hilfe der CNC-Fräse erfolgt, kann ohne Übermaß geschritten werden.

**Zuschnitte W-T**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ISM+D  
Institut für Strukturmechanik und Design  
Institut für Statik und Konstruktion



### Demonstrator Notunterkünfte aus Papier

Schicht	Material	Sollstärke
B-S	Schutzschicht	7,2mm
	3x Katz Hydrotec	1,8mm
	1x Wellpappe	1,8mm
B-D	Düresschicht	62,0mm
	6x Wellpappe kreuzfamt.	7,0mm
B-A	Oberflächenschicht Außen	9,5mm
	5x Katz Hydrotec	1,8mm
	1x Wellpappe	1,8mm

**Jeweils 4 Platten ca. 2.500x1.250mm herstellen**

Hieraus entstehen die folgenden Einzelteile:

B-S1	1.450 x 1.000mm	4 Stück
B-D1	1.300 x 880mm	4 Stück
B-D2	1.575 x 1.000mm	14 Stück
B-A1	1.635 x 1.080mm	6 Stück

Im Falle eines händischen Zuschnittes ist für alle Ausschnitte ein Übermaß von ca. 10mm in beide Richtungen herzustellen. Eine exakte Besäumung würde dann bei der Bearbeitung der Komplettteile mit der CNC-Fräse erfolgen. Falls der Zuschnitt mit Hilfe der CNC-Fräse erfolgt, kann ohne Übermaß geschritten werden.

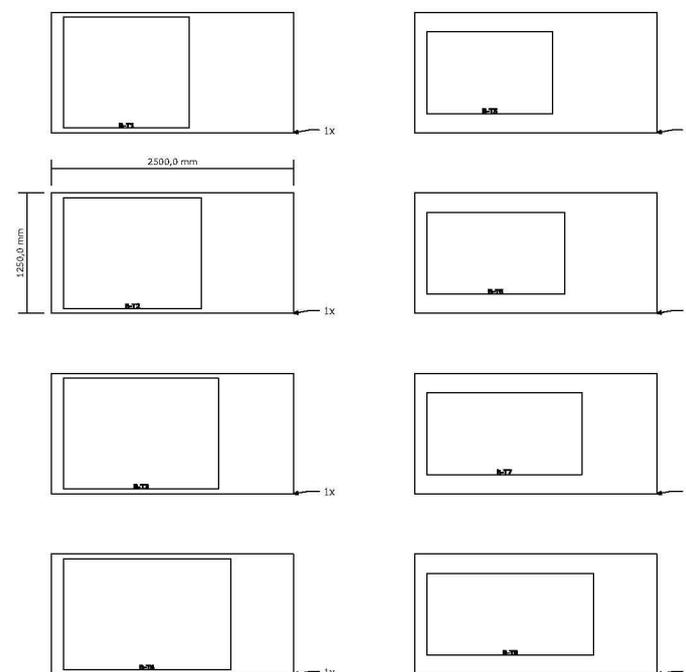
**Im Fall von B-D1 und B-D2 ist für alle Ausschnitte ein Übermaß von 10mm in beide Richtungen herzustellen, da diese Platten Spitzer in den Verbinderrahmen sitzen, welche zur Besäumung an der CNC-Fräse leicht überstehen müssen!**

### Zuschnitte B-S/B-D/B-A



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ISM+D Institut für Strukturmechanik und Design Institut für Statik und Konstruktion



### Demonstrator Notunterkünfte aus Papier

Schicht	Material	Sollstärke
B-T	Transporschicht	59,4mm
	1x Wellpappe	1,8mm
	1x Wellpappe	40,0mm
	1x Wellpappe	1,8mm
	2x Wellpappe kreuzfamt.	7,0mm
	1x Wellpappe	1,8mm

**Insgesamt 8 Platten ca. 2.500x1.250mm herstellen**

Hieraus entstehen die folgenden Einzelteile:

B-T1	1.300 x 1.150mm	1 Stück
B-T2	1.425 x 1.150mm	1 Stück
B-T3	1.600 x 1.150mm	1 Stück
B-T4	1.725 x 1.150mm	1 Stück
B-T5	1.300 x 850mm	1 Stück
B-T6	1.425 x 850mm	1 Stück
B-T7	1.600 x 850mm	1 Stück
B-T8	1.725 x 850mm	1 Stück

Im Falle eines händischen Zuschnittes ist für alle Ausschnitte ein Übermaß von ca. 10mm in beide Richtungen herzustellen. Eine exakte Besäumung würde dann bei der Bearbeitung der Komplettteile mit der CNC-Fräse erfolgen. Falls der Zuschnitt mit Hilfe der CNC-Fräse erfolgt, kann ohne Übermaß geschritten werden.

### Zuschnitte B-T



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

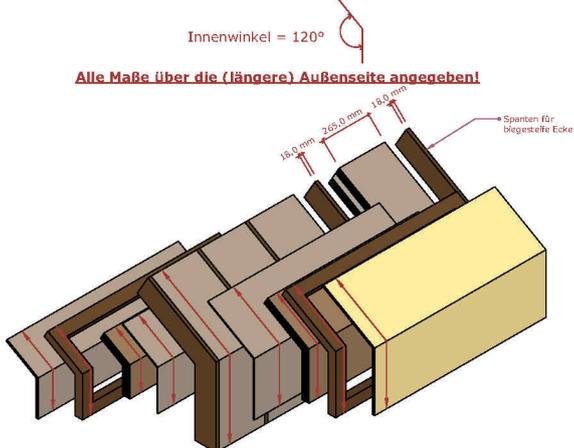
ISM+D Institut für Strukturmechanik und Design Institut für Statik und Konstruktion





Innenwinkel = 120°

**Alle Maße über die (längere) Außenseite angegeben!**



Spanten für biegesteife Ecke

**M.44**

2x Hygrotec  
208,5 x 100,5 x 1,00mm

**M.45**

2x Vollzappe  
231,5 x 231,5 x 1,00mm

2x Vollzappe kreuzlaminiert  
208,5 x 171,5 x 1,00mm

**M.46**

2x Vollzappe  
231,5 x 231,5 x 1,00mm

2x Vollzappe  
231,5 x 231,5 x 1,00mm

**M.47**

1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend

**M.48**

1x Hygrotec  
2x Vollzappe  
312,5 x 312,5 x 1,00mm

**M.49**

1x Hygrotec  
2x Vollzappe  
337,327 x 1,00mm

**M.50**

2x Vollzappe  
343,5 x 343,5 x 1,00mm

**M.51**

1x Webzappe 40mm

**M.52**

1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend

**M.53**

1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
459 x 459 x 1,150mm

**M.54**

1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend

**M.55**

1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
377,777 x 1,00mm

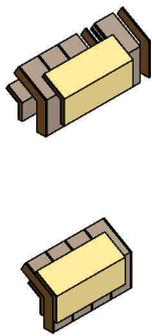
**M.56**

Rahmenblech 40x60mm  
337,327 x 1,00mm

**M.57**

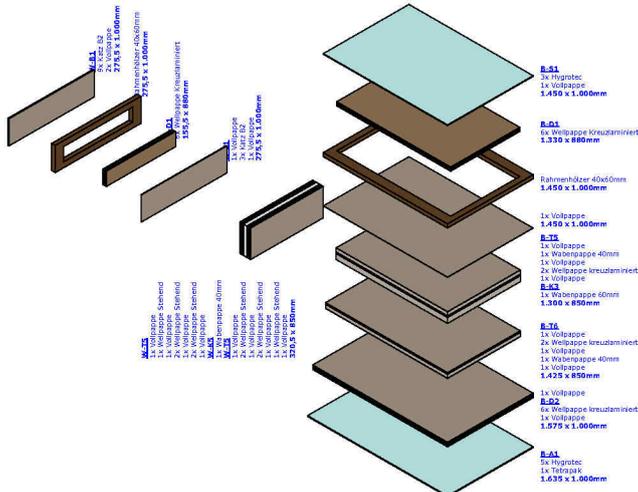
2x Vollzappe  
343,5 x 343,5 x 1,00mm

**Demonstrator**  
Notunterkünfte aus Papier



**Bauteil AE**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT | ISM+D  
Institut für Statik, Mechanik und Design  
Institut für Statik und Konstruktion



**M.58**

1x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe Stehend

**M.59**

1x Vollzappe 40mm  
2x Vollzappe Stehend  
1x Vollzappe Stehend

**M.60**

1x Vollzappe  
2x Vollzappe Stehend  
376,5 x 1,00mm

**B.61**

1x Hygrotec  
1,450 x 1,000mm

**B.62**

2x Webzappe kreuzlaminiert  
1,330 x 880mm

Rahmenblech 40x60mm  
1,450 x 1,000mm

1x Vollzappe  
1,450 x 1,000mm

**B.75**

2x Vollzappe  
1x Webzappe 40mm  
1x Vollzappe  
2x Webzappe kreuzlaminiert  
1x Vollzappe  
1,330 x 850mm

**B.76**

1x Vollzappe  
2x Vollzappe kreuzlaminiert  
1x Vollzappe  
1x Vollzappe kreuzlaminiert  
1x Vollzappe  
1,425 x 850mm

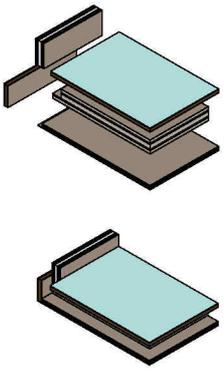
**B.82**

1x Vollzappe  
1x Hygrotec  
1,575 x 1,000mm

**B.84**

1x Hygrotec  
1x Vollzappe  
1,635 x 1,000mm

**Demonstrator**  
Notunterkünfte aus Papier

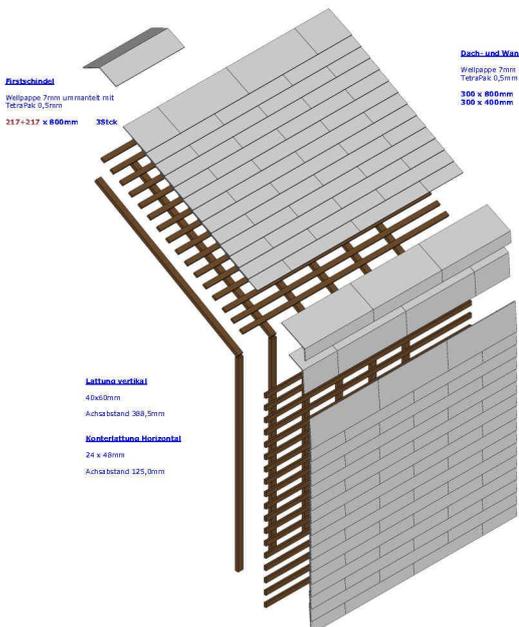


**Bauteil BB1**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT | ISM+D  
Institut für Statik, Mechanik und Design  
Institut für Statik und Konstruktion







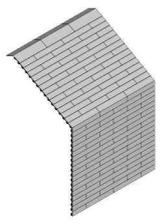
**Dach- und Wandschindeln**  
Wellpappe 7mm ummantelt mit TetraPak 0,2mm  
300 x 800mm 144 Stück  
300 x 400mm 60 Stück

**Traufschindel**  
Wellpappe 7mm ummantelt mit TetraPak 0,2mm  
303 x 117 x 800mm 6 Stück  
181 x 237 x 800mm 4 Stück  
181 x 237 x 400mm 4 Stück

**Luftkammerstütze**  
40x60mm  
Achsabstand 369,5mm

**Konkretfahne Horizontal**  
24 x 48mm  
Achsabstand 125,0mm

**Demonstrator  
Notunterkünfte aus Papier**



**Bauteil FD/FW**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ISM+D  
Institut für Integrierte Mechanik und Design  
Institut für Stahl- und Holzverbände